IRSA 2023

TAGUNGSBAND
PROCEEDINGS

4th International Railway Symposium Aachen

Aachen, Germany

22 - 23 November 2023

VERANSTALTER / ORGANISER

Eurail press

PARTNER

Research Center Railways

RWTH AACHEN UNIVERSITY

Herausgeber / *Editors*

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Nießen, Nils
Verkehrswissenschaftliches Institut (VIA) /
Institute of Transport Science

Mies-van-der-Rohe-Straße 1
52074 Aachen, Germany
WWW: http://www.via.rwth-aachen.de
E-Mail: via@via.rwth-aachen.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Schindler, Christian
Institut für Schienenfahrzeuge und Transportsysteme (IFS) /
Institute of Rail Vehicles and Transport Systems

Seffenter Weg 8
52074 Aachen, Germany
WWW: http://www.ifs.rwth-aachen.de
E-Mail: sekretariat@ifs.rwth-aachen.de

DVV Media Group GmbH
Heidenkampsweg 75
20097 Hamburg, Germany
WWW: http://www.dvvmedia.com
E-Mail: info@dvvmedia.com

Volltext verfügbar unter / *Full text avaible at*
The institutional repository of
RWTH Aachen University
DOI: 10.18154/RWTH-2024-00257

RWTH Aachen University
University Library
Templergraben 61
52062 Aachen Germany
WWW: http://www.ub.rwth-aachen.de

Aachen, Germany, February 2024

Inhalt / Contents

Session 1

Zukunft des Schienenverkehrs
Future of Rail Transport

11 **Deutschland-Takt: Pünktlich per Sprinter**
Felix Berschin

26 **Reversing unter ETCS L2 im kommerziellen Betrieb**
David Grabowski

43 **Künstliche Intelligenz in Bahnanwendungen – neue Angriffsvektoren und Schutzmechanismen**
Jan Malte Hilgefort, Lars Schnieder

Session 2

Automatisierung
Automation

60 **Die Assistierte Bremsprobe als Brücke zur Vollautomatisierung des Schienengüterverkehrs**
Manfred Enning, Rudolf Hilgers

76 **Digitales Monitoring und Automation im Schienengüterverkehr**
Günter Petschnig, Christoph Lorenzutti

88 **Betriebliche Auswirkungen durch ETCS und ATO am Beispiel einer NE-Strecke**
Frederic Raths, Christopher Wink, René Zweigel

Session 3

Infrastruktur + Betrieb
Infrastructure + Operation

104 **ACHILLES: handling uncertainty in railway earthworks maintenance and renewals**
John Armstrong, John Preston

123 **Bane NOR's utilisation of condition evaluation for data-driven renewal planning**
Joanna Maria Kiepiela, Thomas Benjamin Frogner

Session 4

Fahrplangestaltung
Timetable Design

142 **Ergänzung von Trassen-Planungsprozessen um EBW-Ansätze**
Alexander Kuckelberg, Ingolf Leithoff

156 **Agile Simulation im Prozess der Fahrplanerstellung**
Giorgio Medeossi, Mike Bagshaw, Simon Wimmer

170 **Die rollierende wochenweise Bauplanung aus Sicht eines EIU und EVU**
Tobias Körner, Tobias Mohn, Steven Riecke, Daniel Pöhle

Session 5

Energieversorgung
Energy Supply

181 **Einsatz flüssiger organischer Wasserstoffträger in Schienenfahrzeugen**
Julian Kadar, Peter Wasserscheid, Lars Schnieder

191 **Neuartige Bahnenergieversorgung für die schnelle Elektrifizierung der Eifelstrecken**
Jan Pape, Sarah Pospischil, Florian Bonn, Sven Körner, Arnd Stephan

211 **HYPP (Hydrogen Power Pack)**
A second life with a green heart
Gregor Reitz, Dirk Reiners, Martin Spiller, Oliver Jung, Jörg Multhoff, Hendrik Hoffmann, Ernst August Werner

Session 6

Rad Schiene I
Wheel Rail I

223 **Impact prediction of higher operating speeds on wheel wear of a high-speed train**
Xin Ding, Helmut Netter, Saeed Hossein Nia, Zhendong Liu, Gang Chen, Sebastian Stichel

233 **A wheel-rail electrical contact experiment at the laboratory scale**
Luna Haydar, Florent Loete, Frédéric Houzé, Philippe Testé, Tanguy Choupin, Fabien Guiche

248 **Reduction of wheel and rail wear by application of actuators in the primary suspension of an articulated tram**
Jan Vrba

Session 7

Rad Schiene II
Wheel Rail II

265 **Untersuchungen des Reibwertverhaltens im Rad-Schiene-Kontakt beim Einsatz von Schienenkopfkonditionierungsmitteln**
Dani Bechev, Erik Uhlein, Jannik Mayer, Pascal Vogel, Roland Weinhart

277 **Praxistaugliche Radverschleißprognose der BR 423 – Der Digitale Zwilling als Ansatz zur Informationswertschöpfung**
Sebastian Wilbrecht, Martin Ruscher, Michael Beitelschmidt, Arnd Stephan

Session 8

Fahrzeugtechnik I
Vehicle Technology I

296 **Intelligente Primärfederstufen – von der Zustandsüberwachung systemkritischer Bauteile hin zu Predictive Maintenance Konzepten**
Christian Madritsch, Bertram Dumböck, Bernhard Kager

313 **Gleis-Instandhaltungsmaschinen auf dem Weg zur Autonomie**
Bernhard Lichtberger

Session 9

Fahrzeugtechnik II
Vehicle Technology II

327 **Simulationsgestützte Bewertung von innovativen Fahrzeugtechnologien und deren Regelung**
Oliver Garack, Max Schott, Anton Müller, Björn Kauer

345 **Bogie Health Monitoring Using Acoustic Data**
Yan Niu, Dietmar Kraft, Marc Breemeersch

361 **Crashworthiness Design of a Light Commuter Rail Vehicle Operating on Secondary Lines**
Nutchanon Prasomsuk, Sebastian Winkelheide, Christian Schindler

Session 10

Mobilitätsmanagement
Mobility Management

378 **Impact of access to rail transit on mode choice in rural regions of Germany**
Fabian Kühnel, Michael Schrömbges

390 **Optimizing Service Networks for Rail Freight Transport between China and Europe**
Jing Shan, Henning Preis, Nikola Bešinovic, Jörn Schönberger

Session 11

Kapazitätsmanagement I
Capacity Management I

408 **Ermittlung der Leistungsfähigkeit für Zugmeldestellen in Eisenbahnnetzen**
Alexander Fink, Fabian Hantsch, Ullrich Martin, Stefan Schmidhäuser, Mario Fietze

428 **Erweiterte Ansätze zur Ermittlung der Mehrbelastung auf Umleiterstrecken für die netzweite Präventionsplanung unter Verwendung der Infrastrukturnutzung**
Jonathan Hecht, Janecek David

441 **Kapazitätsbestimmung von Eisenbahnstrecken unter Berücksichtigung von Netzeffekten**
Maren Maus, Bastian Kogel, Fabian Schröter, Nils Nießen, Mario Fietze

Session 12

Kapazitätsmanagement II
Capacity Management II

460 **Entwicklung eines Dimensionierungsverfahrens für Zugbildungsbahnhöfe auf Basis der mathematischen Optimierung**
Jan Eisold, Frank Maciejewicz, Oliver Freitag

473 **Untersuchung der Leistungsfähigkeit von Fahrstraßenknoten im Regel- und Störfall – Entwicklung einer Methodik zur vergleichenden Analyse von Infrastrukturplanungsparadigmen in Europa**
Maike Krips, Norman Weik, Christian Meirich

493 **Identifikation von Kapazitätsengpässen**
Philipp Scherer, Bastian Kogel, Wiebke Lenze, Maren Maus, Nils Nießen, Mario Fietze

Session 13

Straßenbahntechnik
Tram Technology

511 **Akustische Optimierungen für lärmarme Schienenfahrzeugräder im urbanen Raum mit Fokus auf die Wirkung gegen das Kurvenquietschen**
Thomas Gerlach, Torben Lehnert, Sven Jenne

527 **Optimierung der Instandhaltung von Straßenbahngleisen durch eine intelligente Überwachung mittels Smartphone-Sensorik**
Philipp Leibner, Lukas Stübinger, Thomas Hempel, Lothar Wolf, Christian Schindler

542 **Zuverlässigkeitsanalyse einer KI-gestützten Wartungsanlage für Straßenbahnräder**
Timo Schmitz, Fabian Hampel, Martin-Christopher Noll, Christian Schindler

Session 14

Wasserstoff Technologie
Hydrogen Technology

561 **Waste Energy AC Technologies in H2-Multiple Units**
Markus Kordel, Matthew Maikel Heeland, Kevin Knetsch

582 **Comparison of simulative methods for dimensioning of fuel cell-battery hybrid powertrains in FCH2Rail and Virtual-FCS**
Marcel Scharmach, Moritz Schenker, Holger Dittus

Session 15

Instandhaltung von Infrastruktur
Maintenance of Infrastructure

601 **Bewertung des Infrastrukturzustandes von Bahnhöfen – Entwicklung einer Kennzahl**
Lea Elfert, Hakan Aktaş, Steffen Höhn, Markus von Bohr, Kunibert Lennerts

618 **Herstellen des Ursache-Wirkung-Zusammenhangs zwischen Mitteleinsatz und Netzzustandsnote**
Christopher Wink, Björn Dickenbrok, Felix Lampe, Martin Lempp, Leonie Meinerzhagen, Tobias Hausberg, Nils Nießen

632 **Wirkungsmodell und Vorgehensweise zur Erarbeitung qualitätsorientierter Instandhaltungsstrategien in der Eisenbahninfrastruktur**
Lea Elfert, Kunibert Lennerts

Session 16

Dekarbonisierung
Decarbonisation

648 **The role of rail for a decarbonised transport in a changing climate: Balancing capital carbon investment with carbon reduction from modal shift**
Heleni Pantelidou, Elisa Christin, Jörg Obergfell, Max Hemmerle, Jessica Rempel

664 **Potential of Sodium-ion Batteries in the context of rail-bound Mobility**
Nicolas Kaiser, Sebastian Klick, Hendrik Laufen, Katharina Lillith Quade, Dirk Uwe Sauer

683 **Low carbon Passenger Railways**
Ansgar Brockmeyer, Johannes Wilhelmer

Session 17

Automatisierung des Güterverkehrs
Freight Traffic Automation

693 **7-Layer Shunting Model: Generische Szenariobeschreibung automatisierter Rangierfunktionen**
Lucas Greiner-Fuchs, Steffen Schäfer, Tobias Hofmeier, Martin Cichon

713 **Decoupled integration of automation functions for non-productive operation**
Raphael Pfaff, Bernd D. Schmidt, Katharina Babilon

726 **Virtual Reality and Digital System Twins in the Development and Testing of Trainable Highly Automated Driving Decision Making in Shunting Operations**
Steffen Schäfer, Furkan Sakir Yöndem, Muhamad Iqmal Naqib Mohd Aliziyad, Martin Cichon

IRSA 2023

SESSION 1

ZUKUNFT DES SCHIENENVERKEHRS

FUTURE OF RAIL TRANSPORT

Session 1
Felix Berschin

Felix Berschin

Deutschland-Takt: Pünktlich per Sprinter

Deutschland-Takt als Wundertüte

Mit großem Aufwand wird seit den letzten Jahren der Deutschland-Takt propagiert. Erst der Fahrplan – dann die Infrastruktur. Ab sofort bestimmt ein „Zielfahrplan" den weiteren Ausbau der Infrastruktur. Inzwischen wurde ein „Dritter Entwurf" des Zielfahrplans mit der zugehörigen Infrastruktur erarbeitet[1], in einem nächsten Schritt soll das System weiter optimiert werden. [2]

Ein Schönheitsfehler: Es sind zahlreiche Infrastrukturprojekte erforderlich, das geschätzte Investitionsvolumen liegt bei 150 Mrd €. Aber auch die Planungs- und Baukapazitäten sind beschränkt. Selbst bei optimistischen Annahmen und sehr hohem jährlichen Mitteleinsatz ist die Realisierung nicht vor der zweiten Hälfte der 2040er Jahre denkbar, eher dürfte sich die Realisierung über vier Jahrzehnte hinziehen. Es ist daher nicht verwunderlich, dass Staatsekretär und Bahnbeauftragter Michael Theurer die vollständige Realisierung für 2070 in Aussicht stellte.[3]

Da die Klimakrise nicht so lange wartet, sind unbedingt Zwischenschritte mit hohem Nutzen erforderlich. Hier sollen Szenarien für das kommende Jahrzehnt aufgezeigt werden. Durch Sprinterzüge zwischen den wichtigsten Ballungsgebieten können schon im nächsten Jahrzehnt die Zielreisezeiten des „Deutschland-Taktes" weitgehend erreicht werden. Gleichzeitig muss gesichert werden, dass der Güterverkehr einen erheblich größeren Anteil an der Verkehrsleistung übernehmen kann.

Sprinter können Kurzstreckenflugverkehr ersetzen

Aus Europa werden beeindruckende Zahlen berichtet.[4] Der TGV/Eurostar erreicht von Paris nach London oder Marseille Marktanteile von über 70%. In Italien bringen es die

[1] SMA/Interplan et. Abschlussbericht zum Zielfahrplan Deutschlandtakt vom 31.8.2021, download unter www.deutschlandtakt.de
[2] Zur Logik und Aufbau von integralen Taktfahrplänen grundlegend *Weigand/Berschin:* Vom ITF zum Deutschlandtakt bei Verdopplung der Fahrgastzahlen, ETR 11/2019 S. 14-20 und 1-2/2020
[3] SPIEGEL ONLINE vom 2.7.2023 „Es sei immer völlig klar gewesen, dass das Jahrzehnte dauert"
[4] Zur Übertragung der Erfahrungen aus Europa nach Deutschland siehe auch *Weigand*: In welchem Umfang kann die Bahn Kurzstreckenflüge ersetzen, ETR 11/20, S. 9-14

konkurrierende Staatsbahn Trenitalia und der private Italo auf einen Marktanteil Mailand – Rom von 75% und hat damit maßgeblich zur Abwicklung von Alitalia unter dem Dach der Lufthansa beigetragen.[5] Barcelona – Madrid startet nun ein intensiver Wettbewerb mit vier Betreibern, es wird ein Marktanteil der Eisenbahnen von ebenfalls von 75% erwartet. Aber auch Deutschland profitiert, so wurde für Stuttgart – Paris ein Marktanteil von 65% kommuniziert. Doch Deutschland konnte trotz Schnellfahrstrecken im Umfang von 2.942km bislang nicht anknüpfen. Der beste Marktanteil wird für Berlin – München mit 46% berichtet.[6] Schon für Frankfurt – Hamburg dominieren Flug- und PKW-Verkehr gleichermaßen, die ICE Fahrzeit verlängerte sich dagegen von Jahr zu Jahr aus einst 3:20 Mitte der 90er Jahre auf aktuell 3:35h – ohne dass je ein Pünktlichkeitsgewinn erreicht wurde. Wenig verwunderlich, dass aus dem Management der Lufthansa kolportiert wurde, dass man auch den innerdeutschen Luftverkehr wieder stärker bespielen wolle[7], nachdem diese in Folge der COVID 19-Krise und des zunehmenden Umweltbewusstsein bei Geschäftsreisen samt Vordringen von Videokonferenzen.[8]

Sicherlich ist für das bescheidene Ergebnis das Fehlen durchgängig langlaufender Neubaustrecken mitverantwortlich. Der Erfolg München – Berlin beruht zum nicht unerheblichen Teil auf Neubaustrecken auf der Hälfte der Strecke und Hochgeschwindigkeit, die derzeit bereits 77% der Strecke abdeckt und in einigen Jahren nach Ausbau Petershausen – Ingolstadt, Nürnberg – Ebensfeld und Halle – Bitterfeld tatsächlich durchgehend Hochgeschwindigkeit ist. Eine andere Ursache ist aber auch das Fehlen attraktiver Angebote. Sprinterverbindungen zeichnen sich nicht nur durch kurze Fahrzeiten, sondern auch durch lange Abschnitte ohne Halte und damit Störungen aus, so dass sie gerade im Geschäftsreiseverkehr hoch produktiv genutzt werden können. Die aktuelle Produktionsstrategie der DB Fernverkehr, aber auch die Planungen zum Deutschland-Takt zeigen diesen Mangel akut. Zwar aktiviert DB Fernverkehr Sprinterverbindungen wie die neue zweistündliche Linie 8 Berlin – München und der Haltausfall bei 3 Sprintern der Linie 29 in Erfurt und Halle mit 8 Min. Fahrzeitgewinn, konterkarriert wird dies aber von ständig längeren Fahrzeiten zwischen Frankfurt und Berlin, die von einst 3:30h auf wieder über 4 Stunden angewachsen sind oder dem Fehlen von Strategien zum Auslassen von Frankfurt/M Hbf und damit Beschleunigung Köln – München.

[5] NZZ 3.12.2021, S. 32-39.
[6] Tagesspiegel 30.11.2019
[7] FAZ.NET 12.7.2023
[8] So beträgt das aktuelle Sitzplatzangebot im innderdeutschen Luftverkehr nur 46% des Niveau von 2019. Pressemeldung des Bundesverbands Deutscher Luftverkehrswirtschaft vom 8.6.2023

Session 1
Felix Berschin

Nachfrage nach Weitstrecken

Wenn es um das Thema Energiebedarf - Klimaschutz geht, stellt das größte Potenzial im Personenverkehr mit ungefähr der Hälfte der Verkehrsleistung der Entfernungsbereich bis 35 km dar. Hier ist die Domäne neben dem PKW der ÖPNV einschließlich S-Bahnen bzw. im unteren Bereich auch Fuß- und Fahrradverkehr. Zwischen 35 und 100 km spielt sich ein weiteres Viertel der Verkehrsleistung ab. Da ist der PKW durch seine ständige Verfügbarkeit, da er ohne Umsteigen von Haus zu Haus fährt und da eine Fahrt über ein- bis zwei Stunden für viele wenig anstrengend erscheint besonders attraktiv. In diesem Bereich der Alltagsmobilität sind besonders eingefahrene Verhaltensweisen für die Verkehrsmittelwahl entscheidend, daher sind Verfügbarkeit durch dichte Takte und Einfachheit die zentralen Erfolgsfaktoren für den öffentlichen Verkehr.

Anders im Fernverkehr: Mit zunehmender Entfernung werden Fahrzeit, Komfort, Verlässlichkeit und Preis die entscheidenden Faktoren. Taktdichte und Verfügbarkeit nehmen dagegen an Bedeutung ab. Im Schienenpersonenfernverkehr (SPFV) liegt die mittlere Entfernung in Deutschland bei ca. 250 km. Mit zunehmender Entfernung konkurriert er nicht nur mit dem PKW sondern auch mit dem Flugzeug.

Trotz Rückgang des innerdeutschen Luftverkehr ist das für Eisenbahnen akquirierbare Aufkommen nicht unerheblich; dabei darf nicht vergessen, dass selbst bei Entfernungen bis 500km der PKW oft noch Marktanteile von 30, 40% aufweist, insbesondere wenn es um Verbindungen außerhalb der direkten City geht, also zum/vom Flug bzw. Zug noch ein erheblicher Vor-/Nachlauf notwendig ist.

Für 2019 ergibt sich folgendes Ranking der wichtigsten Flugstrecken in Deutschland. Köln/Bonn und Düsseldorf werden zusammenaddiert, da sie i.d.R. mit einem Zug bedient werden können

Köln/Düsseldorf – Berlin	2,7
Köln/Düsseldorf – München	2,3
Berlin – Frankfurt	1,8
Berlin – München	1,7
Hamburg – München	1,5
Berlin – Stuttgart	1,3

Frankfurt – Hamburg	1,1
Köln/Düsseldorf – Hamburg	1,1
Frankfurt – München	0,9
Hamburg – Stuttgart	0,6

Aufkommen im innerdeutschen Flugverkehr 2019 in Mio. Passagieren. Quelle Mobilitätsbericht der Anstalt für Flugsicherung 2019

Es fällt auf, dass 7 der Top 10 Relationen schon heute Reisezeiten von unter 4 Stunden - oft auch Richtung 3 Stunden zulassen, aber hier die Potenziale nicht genutzt werden. Düsseldorf/Köln – München gibt es praktisch gar kein Sprinter-Angebot, Köln – Berlin lediglich ein zaghaftes mit drei Fahrtenpaare, die zudem häufig ausfallen und mangels richtiger Fahrplanintegration auch sehr verspätungsfanfällig sind.

Der Sprinter als notwendiges Übersystem

Doch nicht nur der Flugverkehr, sondern insgesamt die Problematik der Produktion von langen Linien der Eisenbahn erfordert ein Umdenken zu Gunsten von Sprinter-Verbindungen. In der Endstufe des Deutschland-Taktes ist ein Netz von ICE-Zügen im Halbstundentakt geplant. Es erreicht trotz einer Reihe von Zwischenhalten in den konkurrierenden Flugrelationen attraktive Fahrzeiten, da unterstellt wird, dass zahlreiche Neubaustrecken realisiert sind. Da im hier betrachteten Zeithorizont 2035 diese noch nicht zur Verfügung stehen, bieten sich als Alternative „Sprinter“ an, die weite Strecken ohne Zwischenhalt durchfahren. Zudem erlauben diese Angebote vielleicht eher die Abkehr vom Kurzstreckenflugverkehr, da sie bei weniger Zwischenhalte mehr Ruhe und damit Arbeitsproduktivität versprechen.

Zudem ist der Versuch den „Grundtakt-InterCity“ gleichzeitig zur Lösung der Langstrecke zu machen, spätestens seit der katastrophalen Pünktlichkeit im Jahre 2022 mit lediglich 60% endgültig zum Scheitern verurteilt.[9]. Die Störanfälligkeit aus Zugverläufen mit Fahrzeiten bis zu 13 Stunden, zahlreichen Halten, Fahrtrichtungswechseln, die Einschränkung auf festen Fahrplanzeiten der Zwischenhalte und damit fehlende Flexibilität der Fahrzeitpuffer und die fehlenden Freiheitsgrade für

[9] Mit maßgeblich sind hierfür langlaufende Durchbindungen wie Linie 42 Hamburg – Köln – Stuttgart – München, 43 Hamburg – Köln – Basel, 55 Dresden – Hannover – Köln – Rheintal – Stuttgart oder 29 Hamburg – Berlin – München.

Umleitungen machen dieses System überkomplex. Die langlaufenden IC-Linien der Bundesbahn konnten in den 80er Jahren noch mit hoher Pünktlichkeit gefahren werden, sie hatten ausreichende Fahrzeitpuffer hatten, aber auch weil die Strecken soweit frei waren, dass diese Puffer ausgenutzt werden konnten, zudem hatten diese Züge absolute Priorität gegenüber allen anderen Zügen.[10]

Könnte dagegen der Weitstreckenverkehr auf Sprinter verlagert werden, hätte dies zahlreiche Vorteile:

- Der **Grundtakt** („die deutsche Straßenbahn“) kann im InterCity-Verkehr auf **3-4 Stunden für die Laufwege eingekürzt** werden[11] oder – wenn dies zu viele Direktverbindungen kappen würde - zumindest auf 6 bis 7 Stunden Laufzeit begrenzt werden – bei „Sollbruchstellen“ mit Pufferzeiten in der Mitte des Laufweges. Dies würde Produktionsbedingungen wie in der Schweiz oder Niederlande erlauben. D.h. diese Linien können bei Störungen sehr gut isoliert werden und ohne Folgerungen für das übrige Netz betrieben werden.
- Die Grundtakt-InterCity können viel besser auf **Knoten** abgestimmt werden, da ein Verlust von ein paar Minuten hier nicht mehr so ins Gewicht fällt. So kann z.B. von Köln über Frankfurt Flughafen – Mannheim - Stuttgart nach München eine Kantenzeit von knapp unter 4 Stunden akzeptiert werden und damit in den jeweiligen Knoten entsprechende optimale ITF-Anschlüsse mit Puffer vorgesehen werden, wenn gleichzeitig ein Sprinter diese Pufferzeiten von rechnerisch 20 Minuten wettmacht.
- Die **Verkehrsspitzen** einerseits aus dem Geschäftsreiseverkehr morgens/nachmittags, aber auch den Wochenendpendlern und dem Urlaubsverkehr können bedarfsgerecht in einem System gefahren werden, was sich flexibler der Nachfrage anpassen lässt, als in einem System, welches wegen der vielfältigen Anschlüsse auf einen strikten Stunden- oder Halbstundentakt ausgerichtet ist, wie der klassische Grundtakt-InterCity.
- Die kurzen Reisezeiten sparen Personal- und Fahrzeugumläufe im Verhältnis zu den Grundtakt-InterCity mit vielen Zwischenhalten. Die investitionsintensiven HGV-300km/h Fahrzeuge werden **produktiv und**

[10] *Weigand*: Mobilität und Klimaschutz neu denken – das Potenzial der Bahn besser nutzen, Minirex-Verlag Luzern, 2021, S. 54 ff.

[11] Beispielsweise würde statt Hamburg – Köln – Stuttgart München Hamburg – Köln und weiter maximal Bonn/Aachen einerseits und Essen – Duisburg - Neuss - Köln Hbf (Vermeidung Fahrtrichtungswehcsel) bzw. Düsseldorf – Köln-Deutz tief – Mannheim – Stuttgart – München gefahren. Den Verlust von Direktverbindungen aus Ruhr nach Süddeutschland würde das Sprintersystem auffangen.

wirtschaftlich eingesetzt. Dadurch können Fahrpreise im umkämpften Fernstreckenmarkt wettbewerbsfähig gehalten werden.

- Der **Energieverlust** sinkt durch die fehlenden Zwischenhalte – gerade im Kontext mit der 300 km/h-Höchstgeschwindigkeit deutlich. Beispielhaft können hierfür Hamm, Wolfsburg, Siegburg/Bonn, Göttingen, Ulm oder Augsburg genannt werden die allesamt bei Halt ein teures Abbremsen und Anfahren aus Hochgeschwindigkeitsabschnitten verursachen.
- Das **Störkonzept** wird auch für Sprinterzüge restriktiv sein müssen. Regel- und Bauzuschläge und ausreichende Haltezeiten bis 5 Min. sollten ausreichende Vorsorge bieten. Kommt es aber zu größeren Verspätungen, spricht vieles dafür, dass auch Sprinter in die Trasse eine Stunde später einscheren und ein Ersatzzug den pünktlichen Laufweg übernimmt. So kann der Schaden der Verspätungen auf einen Bruchteil der Fahrgäste beschränkt werden, zumal im Vergleich zum Grundtakt IinterCity viel weniger Zwischenhalte und damit mögliche Relationen betroffen sind. Derartige Sollbruchstellen bieten sich v.a. im Raum Köln und Frankfurt/M an.
- Signifikante **Fahrzeitverkürzungen** werden ohne Neubaustrecken wie Bielefeld – Hannover, Nürnberg – Würzburg, Haigenbrücken – Nantenbach und im Bereich Fürth-Nürnberg Hbf oder Mannheim – Karlsruhe, Zuffenhausen - Stuttgart, Ulm – Augsburg sowie City-Tunnel in Frankfurt/M und Hamburg möglich, deren Fertigstellung in den nächsten Jahrzehnten als unwahrscheinlich gelten muss. Kritisch ist Hamburg - Hannover zu sehen – seit Jahrzehnten dringend notwendig, aber politisch höchst umstritten und daher bisher in der Trassenführung nicht entschieden.

Letztlich spricht vieles dafür das inzwischen undefinierte Einheitsprodukt ICE zwischen einerseits Sprinter mit gar keinen oder äußerst wenigen Halten zwischen Metropolen einerseits – Vorschlag **ICX** = InterCitxEXpress und andererseits Abdecken von Alltagswegen mit Haltestellenabständen von teilweise unter 50km wieder zu entflechten. Der Name InterCity für das Grundgerüst im Stunden- oder gar Halbstundentakt mit Halt in allen Oberzentren und wichtigen Verknüpfungspunkten wie Offenburg, Eisenach, Riesa, Lu-Wittenberg, Stendal, Lüneburg, Hamm, Herford, Minden, Limburg oder Montabaur scheint wieder zukunftsfähig.

Integraler Takt-Knoten im Zielkonflikt mit Langstreckenverkehr

Session 1
Felix Berschin

Das deutsche Fernverkehrssystem weist mit dem ITF-konformen Knotenzeiten Hannover – Fulda – Würzburg – Nürnberg (2 Stunden) bereits heute einen Fixpunkt auf. Traditionell handelt es sich um die schwächste weitlaufende Fernverkehrslinien in Deutschland, trotz der durchaus beachtlichen Reisegeschwindigkeit. Dies liegt an den überschaubaren Einwohnerpotenzialen entlang der Linie, aber auch der auch langfristig nicht erreichbaren Wettbewerbsfähigkeit Hamburg – München bei Fahrzeiten von über fünf Stunden – selbst im Entwurf des Deutschland-Taktes mit enormen Investitionen. Diese gesetzte Knotenstruktur wird heute schon durch ausgerichtete Zubringer in Hannover (v.a. Bremen, Bielefeld, Osnabrück), in Göttingen aus Wolfsburg – Braunschweig – Hildesheim, in Fulda aus Erfurt – Eisenach, in Würzburg Heilbronn – Stuttgart, sowie Bamberg und in Nürnberg Regensburg – Wien, Bayreuth – Hof etc. gestärkt und sollte beibehalten werden. Sie sichert im Mittelstreckenverkehr wettbewerbsfähige Reisezeiten und Auslastung der im Stundentakt notwendigen Linie Hamburg – München.

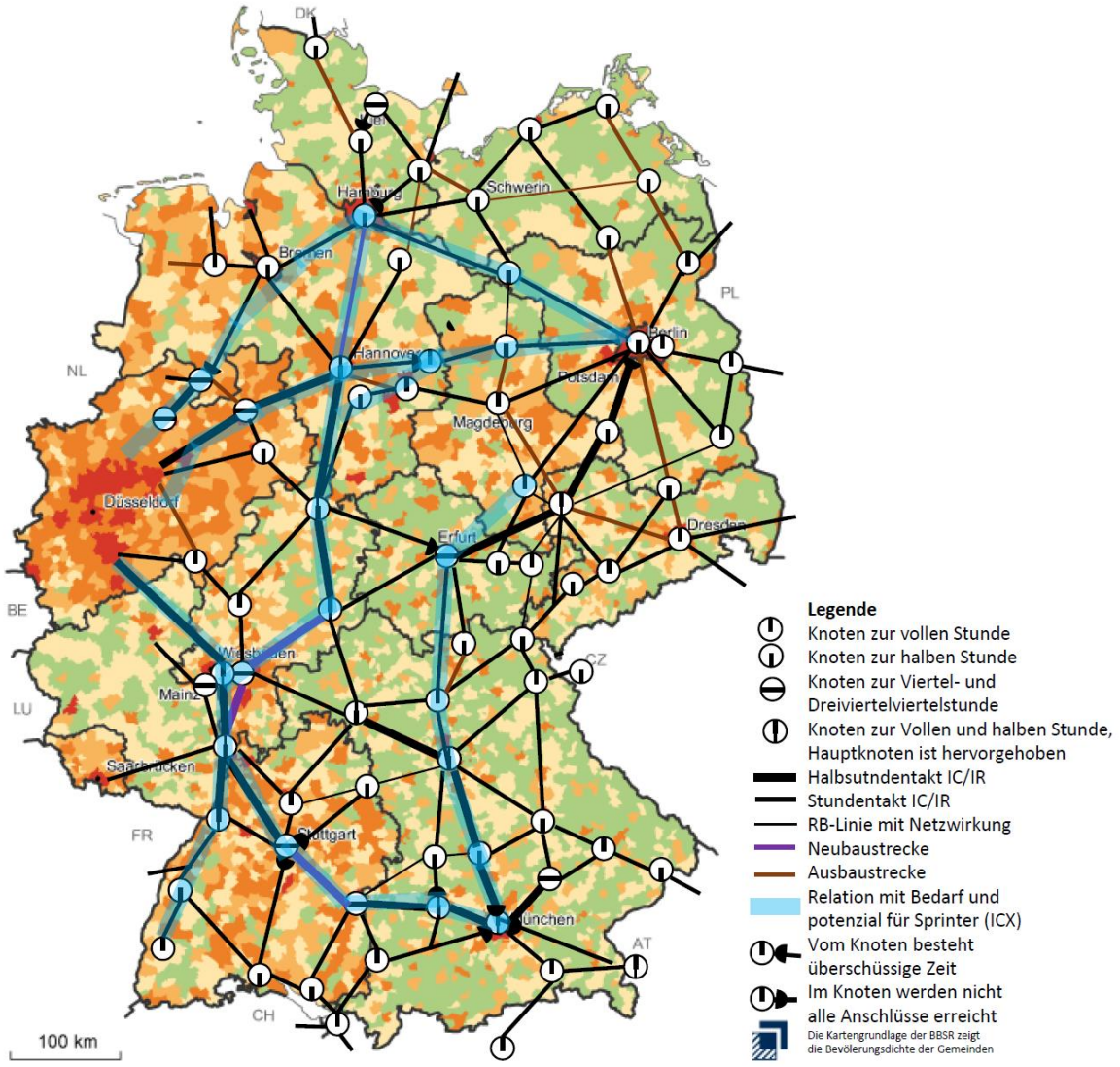
Einen vergleichbaren Fixpunkt und Konstanz deutscher Fahrplangestaltung ist die Doppelbedienung Köln mit einem Knoten zur vollen Stunde und Mannheim mit einem Knoten zur halben Stunde sowohl für die Neubaustrecke Köln – Rhein-Main (KRM), als auch über das Rheintal mit um einer Stunde unterschiedlichen Reisezeiten, Dieses System passt auch seit jeher zu den „Übergabezeiten“ in Basel, die lange zur vollen Stunde lagen. Durch den Halbstundentakt in der Schweiz hat sich allerdings in Basel der Schwerpunkt für schnelle Verbindungen v.a. nach Mailand und nach Graubünden in den Halbknoten verlagert. Hier bietet sich die Chance ab Fertigstellung Tunnel Rastatt und Viergleisigkeit Müllheim – Basel die Kantenfahrzeit Mannheim – Basel von heute 2,5 Stunden nun auf unter 2 Stunden zu drücken. Richtung München entsteht ebenfalls mit der Neubaustrecke Stuttgart – Ulm eine Knotenstruktur, wobei Kantenzeit von zwei Mal 45 Min. (Mannheim – Stuttgart, Ulm – Augsburg) ausreichende Puffer für Betriebsstabilität bieten, zumal Stuttgart – Ulm mit mindestens 29 Min. trotz der enormen Investitionen zu langsam für einen exakten Halbstundenabstand ist.

Nachfolgende Abbildung verdeutlich eine in absehbarer Zeit (2035) umsetzbare Knotenstruktur für das Produkt InterCity nach Fertigstellung der Schlüsselprojekte Fulda – Frankfurt – Mannheim.[12] Hierbei wird bewusst Wert auf möglichst umfassende Anschlüsse in Knoten mit großen Einzugsbereich wie Leipzig, Dresden, Hannover, Magdeburg, Bremen, Nürnberg gelegt, bei denen auch bei Verdopplung der Fahrgastzahlen viele wichtige Zulaufstrecken nur im Stundentakt bedient werden und

[12] Neben diesen Maßnahmen sind die Fertigsteung der laufenden Maßnahmen Berlin – Dresden, Leipzig – Dresden, Tunnel Rastatt, Müllheim – Basel Bad, Ebensfeld – Bamberg – Erlangen sowie neue Maßnahmen v.a. 200km(/h Magdeburg – Halle sowie diverse Kleinmaßnehmen unterstellt.

daher ein Vollknoten wünschenswert ist. Halbstundentakte sind nur dort vorgesehen, wo sie auch zu Schwachverkehrszeiten durch die Nachfrage gerechnet sind. Das System ist in sich robust und ermöglicht die dringend notwendigen Neubauten Hannover – Hamburg und der sich dahin schleppende Ausbau Karlsruhe – Basel anzuhängen, ohne dass sich das System selber ändern muss. Vielmehr kann z.B. mit einer Kantenfahrzeit von unter einer Stunde Hamburg – Hannover in Hamburg Hbf ein Vollknoten für den weiträumigen Verkehr organisieren. Zwar sind in Hamburg die meisten Anschlüsse klar Richtung orientiert, aber so haben die Äste nach Rostock und Cuxhaven durchaus Beziehungen Richtungen Norden (Kopenhagen, Arhus), als auch Richtung Süden.

Hierbei ist zu erwähnen, dass die Vollknoten in den Metropolen zur halben und vollen Stunde i.d.R. lediglich darauf abzielen den Fernverkehr untereinander und weiter den raumerschließenden Verkehr mit (I)RE-Zügen sicherzustellen. Der klassische Nahverkehr aus S-Bahnen und RB-Zügen, der fast durchweg im Halbstundentakt verkehrt, ist dagegen meist gut beraten, die freien Zeitslots zur Viertel- und Dreiviertelstunde zu nutzen und dort mit kurzen Umsteigezeiten untereinander eine Netzwirkung herzustellen, während der Übergang zum überregionalen Verkehr mit einer Viertelstunde auf der sicheren Seite sind.



Mögliche ITF-Knotenstruktur Deutschland 2035

Es aber auch deutlich, dass diese Knotenstrukturen aufgrund ihrer Vielzahl von regionalen Knoten für langlaufende Verbindungen wie z.B. Hamburg – Köln mindestens 4:15h Köln – Mannheim – München mit 4 Stunden oder Berlin – Leipzig - Frankfurt mit ebenfalls 4 Stunden für diese Weitstrecken nicht mehr marktfähig sind.

Sprinter schließt die Lücke im Weitstreckenverkehr

Der 3. Entwurf des Deutschlandtakt hatte versucht, diesen Mangel durch maximale Beschleunigung der Grundtaktzüge zu heilen. Aufgrund sehr teurer Investitionen – allein im Korridor Hamm – Berlin von 12 Mrd. Euro – und hoher Störanfälligkeit dieses

Systems durch langlaufende und häufig haltende Linien erscheint diese Strategie nicht zielführend. Es wird daher hier vorgeschlagen, überlagernd zum vorgenannten System „Grundtakt InterCity“ ein Sprinternetz „InterCityEXpress“ zu konzipieren und hierfür die punktuellen Streckenausbauten zu priorisieren.

Dabei ergibt sich der Sprinterbedarf aus den prioritär genannten Flugstrecken

- (Bonn -) Köln– Hannover – Berlin
- Hamburg - Düsseldorf – Köln (-Bonn)
- Düsseldorf - -Köln – Frankfurt – Stuttgart – München
- Amsterdam-/Brüssel - Köln - Frankfurt
- Hamburg – Frankfurt – Karlsruhe – Basel - Zürich
- Stuttgart/Frankfurt – Karlsruhe – Paris
- Berlin – Frankfurt
- Berlin – Nürnberg – München und
- Hamburg – Berlin (– Dresden – Prag)

Eine Sonderrolle nimmt der Knoten Nürnberg an. Durch eine halbstündliche Konzeption bietet es sich an, dass der Sprinter hier den Knoten zur Halbstundenlage bedient. Dadurch entfaltet er großräumige Netzwirkungen mit den Anschlüssen von/nach Regensburg – Wien, aber v.a. auch Stuttgart. Dadurch und mit einer Linie über die Murrbahn gelingt es die nicht unwichtige Flugrelation Relation Berlin – Stuttgart in unter 4 Stunden anbieten zu können. Weitere Netzwirkungen ergeben sich im Zulauf auf Hannover von Hamburg und Berlin oder auch zwischen Hamburg und Berlin durch den etwa halbstündigen Versatz IC - ICX, so dass hier etwa halbstündliche Fahrten bestehen.

Ansonsten sind die Linien zunächst bewusst außerhalb des üblichen Knotensystems angelegt, um nicht weitere Komplexität in das System zu tragen. Hierzu trägt auch bei, dass Fahrtrichtungswechsel und damit die Bedienung von Kopfbahnhöfen oder Stichstrecken wie aktuell in Köln Hbf oder Frankfurt/M Hbf ausgeschlossen werden. Als Ersatz dient Köln Messe/Deutz (tief), der grundsätzlich auch als Umsteigepunkte zu allen anderen Zügen – auch bei Halt der InterCity – und 4 Stadtbahnlinien geeignet ist. Allerdings müssten in Messe/Deutz dringend die verkehrlichen Anlagen verbessert werden, vor allem durch direkte Rolltreppen und Aufzüge von beiden Tiefbahnsteigen auf die Bahnsteige des Hochbahnhofs.[13] In Frankfurt/M dienen sowohl der Südbahnhof

[13] Trotz vielfacher Ankündigung der Verbesserung ist in Deutz/Messe Gleis 12 nur durch eine beschwerliche Unterführung ohne Aufzüge (!) erreichbar. Statt einer Treppe sind zu den Hochbahnsteige darüber insgesamt 3 Treppen zurückzulegen. Auch von Gleis 11 könnte die Anbindung an die Hochbahnsteige durch direkte Wege deutlich verbessert werden, so dass vergleichbar zum

als auch der Flughafenbahnhof entsprechende Alternativen. Der Flughafen ist schon allein wegen der Verlagerung des Flugverkehrs notwendig, da er neben München der einzige relevante Weltflughafen in Deutschland ist. Der Südbahnhof bietet Übergang zu mehreren S-Bahn und U-Bahn-Linien, sowie 1/3 des Frankfurter Regionalverkehrs. Der Flughafenbahnhof wird durch den Hessen-Express über die Wallauer Spange nach Wiesbaden und nach Darmstadt aber auch durch die neue Regionaltangente West nach F-Höchst und damit in den Taunus ebenfalls im Zubringerverkehr deutlich aufgewertet.

Das Sprinterkonzept basiert auf kurzen, möglichst betriebsstabilen Linien. Trotzdem soll es auch den Weitstreckenverkehr dienen. Dazu dienen die Optionen der Linienverlängerung über die Endpunkte hinaus, einzelne direkte Anschlüsse in den Linienendpunkte oder auch Optionen des Linientausches wie z.B. Hamburg – Münster Richtung FRA-Flughafen in Köln oder Berlin – Frankfurt – Karlsruhe – Paris in Frankfurt Süd und Karlsruhe. Speziell in F-Flughafen bietet sich die Chance zwei Linien so miteinander zu verbinden, dass durch wechselseitigen Linientausch auch Direktrelationen wie Hamburg – Stuttgart oder Köln – Zürich angeboten werden können. Ansonsten besteht bahnsteiggleicher Anschluss.

Nachfolgende Tabelle gibt eine Übersicht, wie attraktive Reisezeiten erreicht werden:

Relation	Fzt heute	D-Takt 3	Knoten-System	Vorschlag	Maßnahmen
Hamburg – Köln	3.35 (2x), sonst 4:05	4:01	4 h	3:15 bis 3:30 (je nach Haltekonzeption)	Ausbau Bremer Umgehungsbahn incl. Weichen auf 130km/h (bislang 60/100); Ausbau Weichen Münster Hbf 80km/h
Berlin – Hannover	1:43	1:23	1 ¾ H	1:20	Zulassung Lehrte – Oebisfelde 230km/h, Oebisfelde – Staaken 280 oder 300km/h (incl. Beseitigung Trappengebiet)
Köln – Hannover	2:40 (2:24 Sprinter)	2:09	3 h über Düsseldorf 2 ¾ h über Wuppertal	2:15**	Weichen Hannover, Hamm, Hagen 80km/h, Durchfahrten Letter, Minden, Herford, Schwerte, Gevelsberg, Elberfeld Vohwinkel 10-20km/h schneller, Ausweitung 200km/h Wunstorf – Minden (BÜ-Beseitigung Bückeburg), 180km/h Bogen Wunstorf, Löhne – Herford und Gruiten – K-Mülheim)

Turmbahnhof Osnabrück Köln Messe/Deutz bundesweit mit die kürzesten Umsteigewege aufweisen würde.

Köln – Berlin	3:58 (3x)	3:35	4 ½ h	3:40**	
Hamburg – Hannover	1:14	1:03	1 ½ h	1:00	Neubaustrecke Meckelfeld – Celle
Hannover – Frankfurt/M	2:19	2:00	2 ¼ h	1:55*	NBS/ABS Fulda – Hanau, 280km/h oder 300 km/h auf NBS Fulda – Hannover
Köln – F-Flughafen	0:48**-0:59	0:39**	1:00	0:40**	Konsequente Ausnutzung 300km/h, Halt K-Messe/Deutz, Fertigstellung K-Steinstr. – K-Gummersbacher Str.
F-Flughafen – Stuttgart1	1;10	1:03	1 ¼ h	1:00	NBS Frankfurt - Mannheim
Stuttgart – München	1:56	1:28	1 ¾ h	1:35	Fertigstellung Stuttgart - Ulm
Köln – München	3:51 (1x) 4:15-4:22	3:16	4 h	3:30	
F-Flughafen – Basel Bad	2:44	2:12	2 ½ h	2:10	NBS Frankfurt – Mannheim, Fertigstellung Karlsruhe – Rastatt und Müllheim - Basel
Hamburg – Berlin	1:46 (tw. 1:42)	1:41	2 h	1:39	Kein Halt B-Spandau
Berlin – Erfurt	1:43	1:38	2 h	1:35	230km/h Halle – Bitterfeld. 230km/h Bitterfeld – Ludwigsfelde
Berlin – Frankfurt	3:52	3:26	4 h	:20	Berlin - Wolfsburg 280/300km/h, Abzw. Sorßum – Fulda 280/300km/h – Fulda – Hanu NBS/ABS
Erfurt – Nürnberg	1:07	0.56	1 ¼ h	1:00	Fertigstellung Erlangen – Bamberg – Ebensfeld

* = Frankfurt/M Süd ** = Köln Messe/Deutz

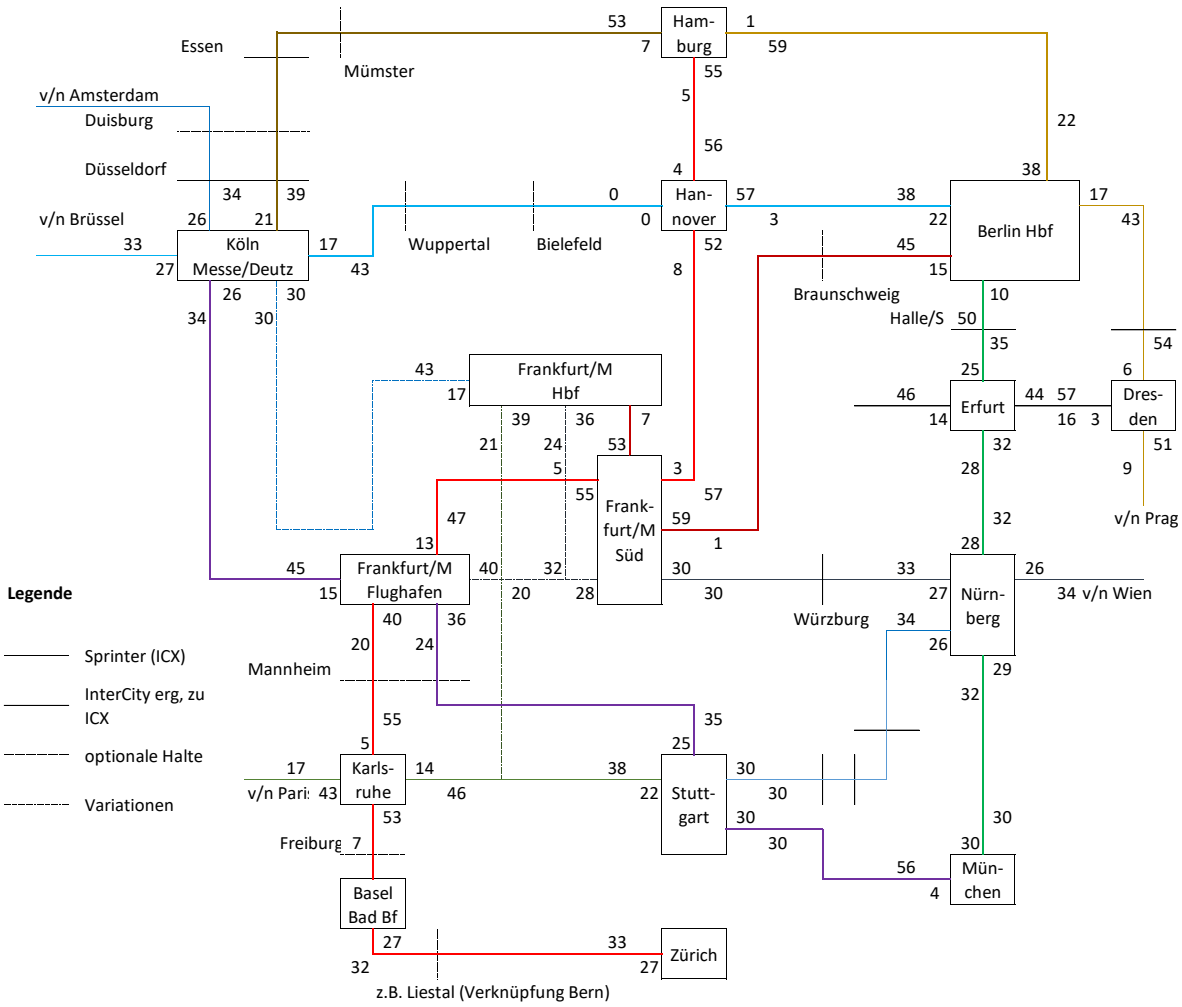
Mögliche Fahrzeiten Sprinter (ICX) und IC im Vergleich zu heute und dem 3. Entwurf Deutschland-Takt

Als Haltepunkte kommen die Städte der zehn[14] wichtigen Flughäfen des innerdeutschen Flugverkehrs, die alle Metropolräume repräsentieren, in Frage. Weiterhin ist für jede Sprinterachse alternativ und unter Berücksichtigung des Grundtakt-IC/ICE zu prüfen, ob ohne Halt oder mit einigen wenigen Halten gefahren werden soll. Z.B. kann Hamburg – Köln, wenn nur in Düsseldorf gehalten wird, in weniger als 3 Stunden 15 angeboten

[14] FRA, MUC, BER, DUS, HAM, CGN, STR, HAJ, NUR, LEJ, DRS. Bremen ist hier nicht miteinbezogen, weil es im Straßenbahn IC bereits hervorragend angeboten ist. Dortmund und Karlsruhe sind national kein bedeutende Flughäfen. Münster/Osnabrück, Bielefeld/Paderborn und Saarbrücken weisen lediglich einzelne nationale Flugverbindungen auf.

werden. Alternativ wird ein größeres Potenzial erreicht, wenn auch in Münster und Essen und ggf. auch Duisburg Halt gemacht wird. Ebenso sind für Berlin Köln die Alternativen Halt nur in Hannover oder auch in Bielefeld, Hagen und Wuppertal mit entsprechender Rückwirkung für das Grundtaktsystem zu vergleichen. Im Zweifelsfall sind aber Zwischenhalte auch abhängig von den realisierbaren Fahrzeiten und Trassenverfügbarkeiten. Grundsätzlich sollte aber ein Haltestellenabstand von deutlich über 100km, um auch hinreichende Arbeitsfähigkeit und Ruhe in den Zügen zu gewährleisten. Im internationalen Vergleich wäre dies immer noch ein unterdurchschnittlicher Wert.

Die Netzgrafik illustriert eine mögliche Gestaltung im Zielhorizont 2035.



Mögliche Taktrassen für ICX (Sprinter) mit Zielhorizont 2035

Zusammenfassung und Ausblick

Es wird gezeigt, dass mit einem dezidierten Sprinterkonzept deutschlandweit in etwa dieselben Reisezeiten möglich sind, wie sie der 3. Entwurf zum Deutschland-Takt erst nach Realisierung von vielen weiteren Neubaustrecken aber mindestens 30 Jahre früher erreicht. Es reichen neben dem dezidierten Einsatz von Sprinterzügen mit wenigen Halten punktuelle Ausbauten zur Geschwindigkeitserhöhung wie kürzere 200km/h Abschnitte bzw. das Ausnutzen höhere Geschwindigkeiten auf bestehenden Neubaustrecken sowie höhere Durchfahrgeschwindigkeiten in Bahnhöfen. Diese Maßnahmen sind zusammen mit den hoch prioritären Maßnahmen der Neubaustrecken Mannheim – Frankfurt, Gelnhausen – Fulda und Hamburg – Hannover sowie den Fertigstellung laufender Projekte wie Karlsruhe – Basel, Nürnberg – Erfurt oder Fortsetzung der Neubaustrecke Frankfurt bis nach Köln hinein.

Diese Strategie ist relativ schnell umsetzbar und erscheint auch wesentlich robuster, als ein sehr eng geknüpfter Taktfahrplan mit langlaufenden Linien mit vielen Zwischenhalten und sehr vielen Verknüpfungen. Dieses ist heute und auch auf absehbare Jahrzehnte nicht stabil fahrbar. Zudem ist ein dezidiertes Sprintersystem und kürzere Grundtaktlinien ggf. mit „Sollbruchstellen“ in der Bekämpfung von Störungen einfacher handzuhaben, so dass die heutigen flächendeckend auftretenden Auswirkungen von Störungen besser eingedämmt werden können. Hinzu kommt seine Flexibilität insbesondere bezüglich des Durchhalten von Takten, da es im Gegensatz zum eng vernetzten InterCity-Produkt „Straßenbahn-IC“ mit dessen Knoteneinbindungen nicht auf striktes Durchhalten eines ganztätigen Taktes angelegt ist. So können Auslastung und Wirtschaftlichkeit des Fernverkehrs besser gesteuert werden.

Auch zur Netzauslastung leistet ein Sprintersystem einen positiven Beitrag, da es nicht strikt zu einem Halbstundentakt im Fernverkehr auf Mischbetriebsstrecken führt, die erst langfristig durch Neubaustrecken entlastet werden können. Dadurch entstehen längere überholungsfreie Zeitfenster für Güterzüge, aber auch für den SPNV.

Mit den aufgezeigten Linien und Fahrzeiten von 3 ½ Std. und weniger können 7 der Top 10 Deutschland-Relationen im Binnenflug guten Gewissens durch den Hochgeschwindigkeitsverkehr ersetzt werden. Berlin – Stuttgart mit 4 Stunden liegt an der Grenze, während lediglich zwei Relationen Hamburg – Stuttgart und Hamburg – München mit 4 ½ bzw. 5 Stunden dagegen auch längerfristig nur eingeschränkt wettbewerbsfähig sind.

Speziell für die dringend notwendigen Kapazitätserhöhung im Schienengüterverkehr müssen dringend Entlastungsachsen ertüchtigt und ggf. elektrifiziert werden. So steht für

den Engpass Minden – Wunstorf die Umleitungsstrecke über Altenbeken – Hameln – Elze und weiträumig auch über Kasseler Kurve – Eichenberg - Halle bereit, diese bietet zudem den Vorteil, auch die Überlastung im Raum Hannover und Lehrte – Braunschweig zu lindern. Für Ulm – Augsburg bestehen über Aalen – Nördlingen und für Würzburg – Nürnberg über Ansbach und die Wermtalbahn Gemünden – Schweinfurt im Zusammenspiel mit dem Güterzugtunnel Fürth schon heute bzw. nach Ausbau von weiteren Kreuzungsbahnhöfen ausreichende Kapazitäten bereit. Dringend sind der Ausbau der „Ostachse“ für den Güterverkehr Hamburg – Regensburg via Hof und der Ruhr-Sieg-Achse Hagen – Gießen – Hanau. Im Fahrplan müssen insbesondere in den Hauptgüterkorridoren ausreichend schnelle Systemtrassen für die Güterzüge gesichert werden. Im Einzelkonfliktfall müssen in diesen Korridoren Güterzugtrassen vorrangig festgelegt werden.

Session 1
David Grabowski

Reversing unter ETCS L2 im kommerziellen Betrieb

Grabowski, David

Schweizerische Bundesbahnen SBB

Zusammenfassung

Seit dem Jahr 2022 kann das Reversing unter ETCS L2 im Gotthard Basistunnel zur Störungsbewältigung uneingeschränkt im kommerziellen Betrieb eingesetzt werden und ist nicht wie bisher auf den Ereignisbetrieb eingeschränkt. Für die Einführung von Reversing im kommerziellen Betrieb mussten eine Reihe von Sicherheitsmaßnahmen umgesetzt werden. Die ersten Erfahrungen im kommerziellen Betrieb haben gezeigt, dass mit dem Reversing ein wichtiger Beitrag zur Störungsbewältigung eingeführt worden ist.

Keywords: ETCS L2; Reversing; Gotthard Basistunnel

1 Einleitung

Nach einer Bauzeit von 17 Jahren wurde am 1. Juni 2016 der längste Eisenbahntunnel der Welt eröffnet: der Gotthard Basistunnel. Das Jahrhundertbauwerk ist Kernstück der «Flachbahn durch die Alpen», deren Scheitelpunkt nun auf nur rund 550 (statt zuvor auf ca. 1150) Meter über dem Meeresspiegel – und damit nur etwa 300 m höher als Basel bzw. Chiasso – liegt. Er verbindet den deutschsprachigen Kanton Uri (Nordportal bei Erstfeld, 460 m ü. M.) mit dem italienischsprachigen Kanton Tessin (Südportal bei Bodio TI, 312 m ü. M.) und besteht aus zwei 57 km langen Tunnelröhren. Der Tunnel steigt von Norden her mit 5,82 ‰ Steigung bis zum Scheitelpunkt und fällt dann mit einem Gefälle von bis zu 2,00 ‰ bis zum Tunnelportal im Süden ab. Der Tunnel wird vom Güterverkehr und vom Personenverkehr im Mischbetrieb genutzt und ist auf einen Betrieb von drei Güterzügen und einem Personenzug pro Richtung und halbe Stunde ausgelegt. Die Tagesleistung im Regelbetrieb bei 21 Stunden pro Tag (drei Stunden Reserve für Wartung) wird mit rund 80 Personenzügen und 260 Güterzügen angegeben. Die

Zugfolgezeit bei der Einfahrt in den Tunnel liegt für die Güterzüge bei unter drei Minuten. An den Eingangsportalen gibt es Überholgleise, um die geplante Abfolge von Güterzügen und Personenzügen umsetzen zu können.

Im Gotthard Basistunnel kommt das Zugbeeinflussungssystem ETCS Level 2 zur Anwendung. Der Tunnel ist für den erweiterten Geschwindigkeitsbereich ausgelegt, d.h. es sind Geschwindigkeiten von bis zu 230 km/h zulässig und möglich. Für den erweiterten Geschwindigkeitsbereich gilt „Fahren oder Erhalten“, d.h. dass Erhaltungsarbeiten (Instandhaltungsarbeiten) nur in abgeschirmten Bereichen durchgeführt werden dürfen, den sogenannten Erhaltungsbezirken.

Der Tunnel verfügt über zwei Spurwechsel, bei denen zur jeweils anderen Tunnelröhre gewechselt werden kann. Gemäss den europäischen Sicherheitsvorgaben hat der Tunnel alle 20 km eine Nothaltestelle, an der Lokführer und Fahrgäste evakuiert werden können. Eine eigene Tunnelleittechnik steuert die tunnelspezifischen Systeme wie Lüftung, Beleuchtung, Spurwechseltore und Einsatzleitsystem.

Die hohen Geschwindigkeiten und die aussergewöhnliche Länge des Gotthard Basistunnels bringen besondere Risiken mit sich, die den Einsatz eines zusätzlichen Systems notwendig machten: die Tunnelautomatik (TA). Aufgabe der Tunnelautomatik ist es, die Betriebsmitarbeiter:innen der SBB im Störungs- und im Ereignisfall zu unterstützen und auch bei der Störungs- und Ereignisbewältigung die Sicherheit des Bahnbetriebs zu gewährleisten. Die Tunnelautomatik ist dafür in die netzweit im Einsatz befindlichen Systeme «Integrales Leit- und Informationssystem» (Leitsystem Iltis) und «Rail Control System» (Dispositionssystem RCS) integriert worden. Alle drei Systeme zusammen bilden zusammen das System RTI (**R**CS-**T**unnelautomatik-**I**ltis). Das System RTI kommuniziert mit den Umsystemen Tunnelleittechnik, Stellwerk und Radio Block Center (RBC) und wird von der Disponent:in Bahnverkehr und der Zugverkehrsleiter:in bedient (siehe Abbildung 1).

Alle drei Systeme verfügen über einen internen Fahrplan. Das RCS verwaltet den Produktionsplan, der über einen Vorschauhorizont von mehreren Stunden verfügt, die gesamte Schweiz abdeckt und den nach aktuellem Stand zu erwartenden Fahrplan enthält. Das Leitsystem Iltis verwendet einen «zeitlosen» Fahrplan, der auf Zugnummern basiert und die Abhängigkeiten zwischen den Zügen und Fahrwegen beschreibt. Die Tunnelautomatik verwaltet einen Fahrplan, der nur die Züge enthält, die sich im Umfeld des Tunnels oder im Tunnel selbst befinden. Die prognostizierten Zeiten werden aus dem Produktionsplan übernommen, die Relationen zwischen den Zügen werden dem Iltis

Fahrplan entnommen. Die Fahrpläne werden nach bestimmten Regeln untereinander abgeglichen.

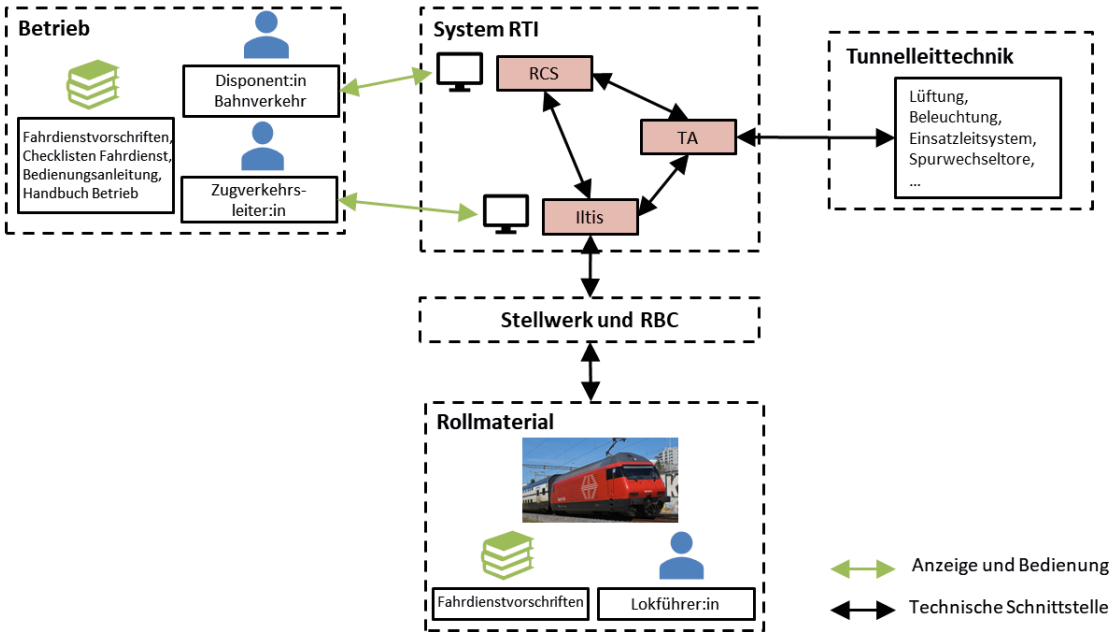


Abbildung 1: Das System RTI und seine Umsysteme

Im Normalbetrieb, ohne Störungen und Einschränkungen, werden die konfliktfrei disponierten Zugfahrten über den Iltis Fahrplan automatisch eingestellt und der Zugverkehrsleiter:in kommt eine beobachtende und prüfende Rolle zu. Im Störungs- und Ereignisfall sind Disponent:in Bahnverkehr und Zugverkehrsleiter:in gefordert: Es gilt den Störungs- oder Ereignisfall richtig einzuschätzen und die richtigen Massnahmen zur Bewältigung der Störung bzw. des Ereignisses umzusetzen. Das System RTI unterstützt die Disponent:in Bahnverkehr und die Zugverkehrsleiter:in dabei nicht nur mit entsprechenden Anzeigen sondern bietet auch eine Auswahl von automatisierten Abläufen an, die für die Bewältigung der Störung bzw. des Ereignisses genutzt werden können. Zudem werden im Ereignisfall die Systeme der Tunnelleittechnik sowie die Notfall-Einsatzleitung über das Ereignis informiert. Lüftung und Spurwechseltore werden automatisch auf den Ereignisbetrieb umgestellt und es werden Sofortmassnahmen eingeleitet, um sicherzustellen, dass keine weiteren Züge in den Tunnel fahren.

2 Störungsfall und Ereignisfall

Bei ungeplanten Vorkommnissen im Tunnel wird zwischen Störungsfällen und Ereignisfällen unterschieden. Bei Störungsfällen ist nicht mit Gefahr für Leib, Leben oder

Umwelt zu rechnen. Bei Ereignisfällen geht man davon aus, dass Menschenleben oder die Umwelt gefährdet sind und dass schnelles Handeln angesagt ist. Im Ereignisfall sind keine kommerziellen Fahrten durch den Tunnel mehr zulässig und der Tunnel ist in der vorgegebenen Zeit von 90 Minuten zu räumen. Im Störungsfall kann der Tunnel bzw. der nicht gestörte Teil des Tunnels weiterhin für kommerzielle Fahrten verwendet werden. Die Verfügbarkeit des Tunnels ist «nur» eingeschränkt. Typische Fälle für den Störungsfall sind defekte Züge oder defekte Infrastrukturelemente im Tunnel. Typischer Fall für einen Ereignisfall im Tunnel ist ein Brand oder eine Entgleisung eines Zuges mit Gefahrenguttransport (wie am 10.08.2023).

Ereignisfälle treten (zum Glück) sehr selten auf. Bisher ist es zu einem einzigen Ereignisfall gekommen: Bei einem Güterzug mit Gefahrengut kam es am 10.08.2023, vermutlich aufgrund eines Radbruchs, zu einer erheblichen Beschädigung der Infrastruktur und einer nachfolgenden Zugtrennung auf einem Spurwechsel im Tunnel. Der getrennte Teil des Zuges wurde in das Spurwechseltor gelenkt und hat dieses komplett zerstört. Der Tunnel konnte mit Hilfe des Systems RTI wie vorgesehen evakuiert werden. Personen wurden nicht verletzt. Die Gefahrengutwaggons machten den hinteren Teil des Zuges aus und wurden nicht beschädigt. Es ist kein Gefahrengut ausgetreten. Die Aufräumarbeiten waren so umfangreich und die Schäden so erheblich, dass der Tunnel für 12 Tage komplett gesperrt werden musste.

Im Gegensatz zu den Ereignisfällen gibt es pro Woche zwei bis drei Störungsfälle, die je nach Art der Störung kleinere Auswirkungen aber zum Teil auch erhebliche Auswirkungen auf den Bahnbetrieb haben. So kam es z.B. am 17.10.2022 zu einer Weichenstörung in einem Spurwechsel im Tunnel und am 26.01.2023 zu einer Fahrzeugstörung im Tunnel. Beide Störungen hatten eine erhebliche Auswirkung auf den Bahnbetrieb ohne dass Menschenleben oder Umwelt gefährdet waren.

Die Tunnelautomatik verfügt über eine Reihe von Funktionen um «Vorkommnisse» (Störungsfälle oder Ereignisfälle) zu detektieren. So gibt es eine Zuglaufverfolgung, die die Geschwindigkeit des Zuges gegen die Soll-Geschwindigkeit prüft. Es wird auf das Fehlen bzw. Ausbleiben der Train Position Reports der Züge geprüft. Der von der Onboard Board Unit (OBU) gemeldete ETCS Mode wird ausgewertet. Es gibt vor und im Tunnel Zugkontrolleinrichtungen, die den Zug auf Heissläufer und Festbremser hin prüfen. Störungsfälle und Ereignisfälle können aber auch manuell durch die Zugverkehrsleiter:in erfasst werden.

Wird vom System RTI ein entsprechendes «Vorkommnis» detektiert, wird die Zugverkehrsleiter:in informiert. Sie muss anhand ihrer Informationen entscheiden, ob es

sich um einen Störungsfall oder einen Ereignisfall handelt. Gegebenenfalls sind dazu weitere Abklärungen durchzuführen und die betroffene Lokführer:in zu kontaktieren. Entscheidet die Zugverkehrsleiter:in innerhalb von 3 Minuten nicht, geht das System von einem Ereignisfall aus und wechselt automatisch in den Ereignisbetrieb. Auch der Ereignisfall am 10.08.2023 wurde der Zugverkehrsleiter:in angezeigt und die betroffene Lokführer:in wurde für Abklärungen kontaktiert.

3 Richtungsabhängige Sperren

Einem Stellwerk-Element kommt bei der Bewältigung von Störungsfällen und Ereignisfällen eine besondere Rolle zu: der richtungsabhängigen Sperre. Sie erlaubt die Zugfahrt in eine Richtung, das Einstellen einer Zugfahrstrasse in die andere Richtung wird dagegen unterbunden. Damit ist es möglich Züge aus dem Tunnel zu führen, ohne dass das Leitsystem Züge, die ursprünglich durch den Tunnel geplant waren, in den Tunnel leitet.

Hindernisse können durch richtungsabhängige Sperren abgesichert werden, so dass Züge den abgesicherten Bereich verlassen können, aber keine Züge auf das Hindernis zufahren können. Durch die richtungsabhängigen Sperren wird damit eine Zone aufgebaut, in die keine Zugfahrstrassen gestellt werden können: Im Störungsfall handelt es sich dabei um die sogenannte Störungszone, die die Störung umschliesst. Im Ereignisfall werden beide Tunnelröhren an beiden Tunnelportalen mit richtungsabhängigen Sperren abgesichert, so dass keine Zugfahrstrasse mehr automatisch in den Tunnel gestellt werden kann. Damit ist der ganze Tunnel eine Störungs- bzw. Ereigniszone. Züge, deren geplanter Fahrweg in oder über den Ereignisort führen, werden durch das Aktivieren von richtungsabhängigen Sperren an der Weiterfahrt gehindert. Aktive richtungsabhängige Sperren werden der Zugverkehrsleiter:in angezeigt, so dass das Verhalten des Systems für sie nachvollziehbar ist.

Weiter können die richtungsabhängigen Sperren eingesetzt werden, um geplante Fahrwege gegen fremde Belegungen zu schützen. Der geplante Fahrweg wird quasi «eingeigelt», so dass Züge innerhalb des geplanten Fahrwegs weggeführt werden können, aber keine neuen «feindlichen» Fahrstrassen in oder über den geplanten Fahrweg gestellt werden können. Dem geplanten eingeigelten Fahrweg ist damit eine höhere Priorität zugeordnet worden als anderen Fahrwegen. Ist der eingeigelte geplante Fahrweg einmal belegungsfrei, bleibt er frei von fremden Belegungen.

Richtungsabhängige Sperren können nur von der Tunnelautomatik aktiviert und deaktiviert werden und werden der Zugverkehrsleiter:in mit einem entsprechenden

Symbol in der Darstellung der Gleistopologie angezeigt. Der Disponent:in Bahnverkehr wird die resultierende Störungszone als sogenannte dispositiv eingeschränkte Zone im Zeit-Weg Diagramm angezeigt. Dabei erhält die dispositiv eingeschränkte Zone eine voraussichtliche Dauer, die gemäss den vorliegenden Informationen angepasst werden kann. Aufgabe der Disponent:in Bahnverkehr ist es nun, den Produktionsplan im Rail-Control-System so anzupassen, dass es zu keinen Konflikten mehr bei den geplanten Fahrwegen mit der dispositiv eingeschränkten Zone kommt. Nachdem der konfliktfreie Produktionsplan automatisch mit dem Iltis-Fahrplan abgeglichen wurde, werden die im Produktionsplan geplanten Fahrten von der Leittechnik Iltis automatisch eingestellt und können konfliktfrei umgesetzt werden. Die Tunnelautomatik kontrolliert dabei, dass alle Sicherheitsregeln eingehalten werden.

4 Rückwärtsfahrt

Wird vor einem Zug im Tunnel eine Störungszone oder ein Ereignisort generiert, kann es sein, dass der Zug nicht mehr über einen Spurwechsel in die andere Tunnelröhre geleitet werden kann. Mögliche Gründe für die Störungszone sind z.B. ein gestörter Zug oder ein defektes Infrastrukturelement. Möglicher Grund für den Ereignisfall ist z.B. ein Brand.

Kann der Störungsfall bzw. der Ereignisfall nicht zeitnah beseitigt werden, muss der Zug entgegen der ursprünglichen Richtung bis zu einem Spurwechsel innerhalb oder ausserhalb des Tunnels fahren. Dazu gibt es drei Möglichkeiten:

1. Der Zug wendet. D.h. die Lokführer:in rüstet ihren Führerstand ab und wechselt in den Führerstand auf der anderen Seite des Zuges. Nach der Durchführung der «Start of Mission» stellt die Sicherungsanlage eine neue Fahrstrasse ein und übermittelt dem Zug eine «Movement Authority» inklusive einem «Mode Profile», so dass die Fahrt in die entgegengesetzte Richtung im ETCS Mode «On Sight» gestartet werden kann. Mit der Bestätigung eines «track ahead free requests» oder dem Befahren des nächsten überwachten Gleisfreimeldeabschnitts wechselt ETCS in den Mode «Full Supervision» und die Fahrt bis über den nächsten Spurwechsel (oder aus dem Tunnel) erfolgt als «normale» Zugfahrt. Dort kann die Lokführer:in durch einen weiteren Führerstandwechsel wieder die Fahrrichtung ändern und über den Spurwechsel das Hindernis umfahren oder in einem Abstell- oder Überholgleis auf «freie Fahrt» warten. Aber nicht alle Züge sind wendefähig. Güterzüge haben im Allgemeinen keinen zweiten Führerstand auf der anderen Seite des Zuges. Für Personenzüge wird aktuell über eine Netzzugangsbedingung die Wendefähigkeit eingefordert. Ausnahmen sind zulässig,

müssen aber angemeldet werden. Das Wenden des Zuges ist das bevorzugte Mittel, den Zug zurück aus dem Tunnel bzw. zurück bis über den nächsten Spurwechsel zu führen.

2. Ist der Zug nicht wendefähig, muss er rückwärts, also mit dem Führerstand am Ende des Zuges, bis zum nächsten Spurwechsel oder aus dem Tunnel geschoben werden. Solche geschobenen Fahrten werden ausserhalb des Tunnels normalerweise als Rangierfahrten durchgeführt. Der zu verwendende ETCS Mode ist «Shunting». Fahrten im ETCS Mode «Shunting» werden vom System nur sehr eingeschränkt überwacht. Die Geschwindigkeiten für solche Rangierfahrten mit Führerstandsignalisierung sind in der Schweiz auf 40 km/h limitiert. Für geschobene Fahrten wird im Allgemeinen eine Rangierleiter:in benötigt, die auf der anderen Seite des Zuges der Lokführer:in Anweisungen gibt und sie über Gefahren und verbleibende Weglängen informiert.

Da die Fahrt viele Kilometer (bis zu 57km) betragen kann, durch einen dunklen Tunnel führt, keine Rangierleiter:in zur Verfügung steht und Rangierfahrten auf Grund der Regel «Fahren oder Erhalten» nur in Erhaltungsbezirken zulässig sind, kann die Rückwärtsfahrt unter diesen Umständen nicht als Rangierfahrt durchgeführt werden. Die Rückwärtsfahrt wird daher als Zugfahrt im ETCS Mode «Reversing» durchgeführt. Fahrten im ETCS Mode «Reversing» werden durch ETCS überwacht, erfolgen über eine gesicherte Zugfahrstrasse und erfordern eine entsprechende «Movement Authority». Die maximale Geschwindigkeit für die Reversingfahrten beträgt in der Schweiz 80 km/h. Im Fall der Tunnelausfahrt wird die maximale Geschwindigkeit auf 40 km/h reduziert.

3. Der Zug wird abgeschleppt. Da die Zufahrt zum Zug auf der einen Seite durch das Hindernis blockiert ist, muss die Lokomotive zum Abschleppen von hinten an den Zug herangeführt, dort angekuppelt werden und den Zug aus dem Tunnel bzw. bis über den nächsten Spurwechsel schleppen. Dies ist betrieblich nicht vorgesehen, da nicht (immer) klar ist, ob und wie die Lokomotive von hinten an den Zug ankoppeln kann und ob der Zug inklusive seiner Lokomotive überhaupt abgeschleppt werden kann.

Damit verbleibt für nicht wendefähige Züge nur die zweite Möglichkeit: das Reversing.

Damit Wenden oder Reversing nur bei Zügen zum Einsatz kommt, bei denen Wenden bzw. Reversing auch sinnvoll ist und damit für nicht-wendefähige Züge Wenden gar nicht erst in Betracht gezogen wird, bietet die Tunnelautomatik das Wenden und Reversen als automatisierten Ablauf nach folgenden Regeln an:

- Es muss ein Störungsfall oder ein Ereignisfall im Tunnel vorliegen. Das Vorkommnis kann dabei von der Tunnelautomatik selbst detektiert oder von der Zugverkehrsleiter:in eingegeben worden sein.

- Wenden und Reversing wird nur für Züge angeboten, deren geplanter Fahrweg durch die Störungszone oder den Ereignisort führt oder deren Position bereits in der Störungszone ist.
- Wenden wird nur für wendefähige Züge angeboten. Nur Personenzüge werden als wendefähig eingestuft.
- Für wendefähige Züge wird Wenden und Reversing angeboten, für nicht wendefähige Züge nur Reversing. Voraussetzung ist in beiden Fällen, dass der betroffene Zug steht.
- Reversing wird nur angeboten, wenn keine vorwärts gerichtete Umfahrungsmöglichkeit mehr besteht.

Sind die Regeln erfüllt, kann die Zugverkehrsleiter:in Reversing und gegebenenfalls alternativ Wenden über einen Knopfdruck ausführen. Für die Ausführung muss von der Zugverkehrsleiter:in der Retourfahrweg ausgewählt werden. Das System schlägt einen hinterlegten Defaultweg vor und zeigt eine Auswahl von möglichen Zielen und Wegen an. Die Zugverkehrsleiter:in muss den vorgeschlagenen Retourfahrweg bestätigen oder das Ziel und und/oder den Weg anpassen und den modifizierten Retourfahrweg bestätigen. Damit wird der Reversing- bzw. Wendeprozess eingeleitet.

Die Wendefahrt erfolgt nach den Regeln für Zugfahrten im Tunnel. Die Zugverkehrsleiter:in informiert die Lokführer:in den Führerstand zu wechseln. Nachdem die Lokführer:in den Führerstand gewechselt hat, meldet sie sich wieder bei der Zugverkehrsleiter:in, die dann die Fahrstrasse einlaufen lässt. Die «Movement Authority» inklusive «Mode Profile» wird übertragen und der Zug kann losfahren.

Im Folgenden wird näher auf die Fahrt im ETCS Mode «Reversing» eingegangen.

5 Besonderheiten von Rückwärtsfahrten

Die Rückwärtsfahrt im ETCS Mode «Reversing» ist eine von ETCS überwachte Fahrt, die nur in vorgegebenen Bereichen gestartet werden kann. Um Reversing durchführen zu können, muss der Zug zwei Messages vom RBC erhalten haben: Paket Nummer 138 mit den Informationen über den Bereich, in dem Reversing gestartet werden kann und Paket Nummer 139 mit den Überwachungsinformationen. Der Zug muss sich in dem Bereich des Pakets 138 befinden und stehen.

Das Paket 138 kann bereits vor dem relevanten Bereich geschickt werden und legt die Referenzposition fest, auf den sich alle Distanzangaben zum Reversing beziehen. Mit dem Packet 139 wird die Movement Authority (Fahrerlaubnis) mit der Reversing-

Rücksetzdistanz bezogen auf die Referenzposition an den Zug übertragen. Die Movement Authority ist die Grundlage für die Überwachung der Zugfahrt. Die Überwachung erfolgt auf die Position des „Estimated Front End“. Das Vertrauensintervall der Position wird bei der Überwachung nicht berücksichtigt.

Am GBT werden beide Messages erst verschickt, wenn Reversing durchgeführt werden soll. Die Referenzposition ist immer die Position des nächsten Marker Boards in Richtung der ursprünglichen Zugfahrt. Da sich alle Distanzen bei der Reversingfahrt auf die Referenzposition beziehen, summieren sich die Odometriefehler bei einer Reversingfahrt kontinuierlich auf und werden nicht, wie bei den Fahrten im ETCS Mode «Full Supervision», mit dem Überfahren von Balisengruppen zurückgesetzt. In der Folge vergrössert sich das Vertrauensintervall der Position bei der Reversingfahrt kontinuierlich. Neben der maximalen Zuglänge muss daher auch die maximale Odometrieabweichung in den benötigten Retourfahrweg eingerechnet werden.

Die Tunnelautomatik muss als erstes den geplanten Retourfahrweg über das Iltis im Stellwerk reservieren lassen. Der Retourfahrweg besteht aus Gleisabschnitten, deren Anfang durch Marker Boards (ETCS-Halttafel) festgelegt ist. Mit den Marker Boards wird ein virtuelles Hauptsignal angezeigt. Im Gotthard Basistunnel fällt die Position der virtuellen Hauptsignale für die Fahrt in die eine Richtung mit der Position der virtuellen Hauptsignale für die Fahrt in die andere Richtung zusammen. Die Marker Boards stehen damit Rücken an Rücken.

Das ETCS Radio Block Center (RBC) bestimmt aus dem Retourfahrweg die Reversing-Rücksetzdistanz (RV-Rücksetzdistanz), indem es die beiden Parameter RBC1 und RBC2 von der Länge des Retourfahrweges abzieht (siehe Abbildung 2). Der Parameter RBC1 bezeichnet dabei eine im RBC projektierbare Sicherheitsdistanz für die maximale Länge des Zuges und hat für den GBT einen Wert von 1.5 km. Der Parameter RBC2 berücksichtigt die Odometrieungenauigkeit des Zuges und ist durch die Genauigkeit der vom Zug gemessenen Entfernungen gemäss ETCS Subset-041 gegeben. Der Wert von RBC2 berechnet sich damit aus (5% × Reversing-Rücksetzdistanz + 5 m).

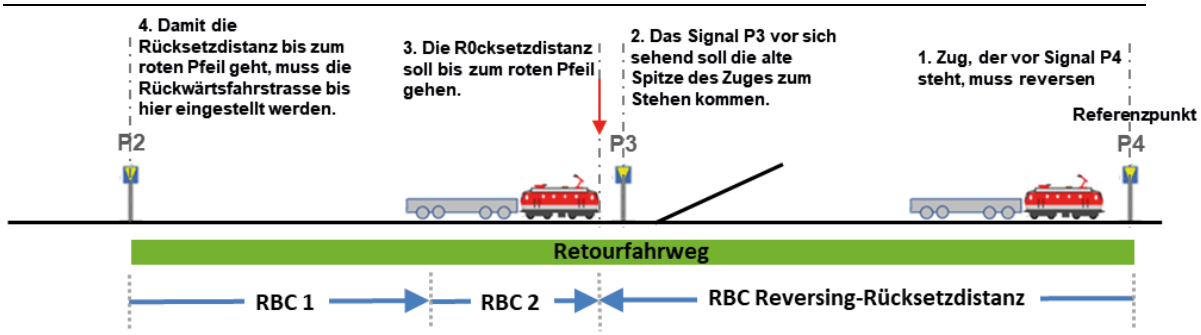


Abbildung 2: Bestimmung des Retourfahrweges aus den RBC-Parametern

Durch diese Berechnung der Reversing-Rücksetzdistanz ist sichergestellt, dass der Zug den Retourfahrweg trotz Zuglänge und Odometrieungenauigkeiten (von maximal 5%) nicht verlässt.

Für längere Reversing-Rücksetzdistanzen kann der Wert von RBC 2 sehr gross werden, so dass der Retourfahrweg weitere Signalabschnitte hinter dem Signalabschnitt, in dem die Rücksetzdistanz liegt, abdeckt (Abbildung 3):

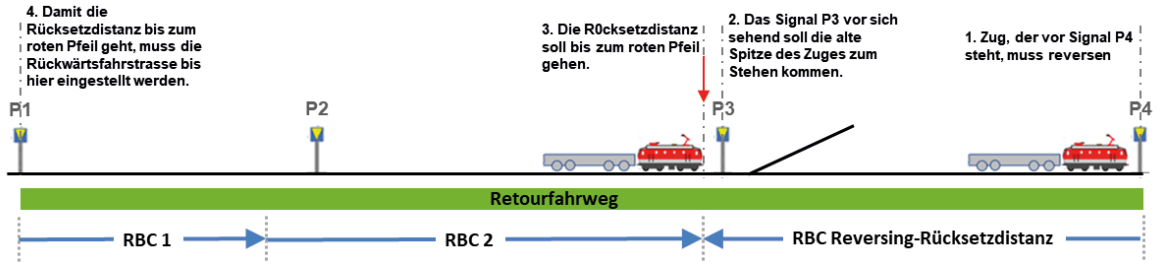


Abbildung 3: Retourfahrweg bei längeren Reversing-Rücksetzdistanzen

Der Retourfahrweg und damit der zu reservierende Bereich kann damit deutlich länger werden als die benötigte Reversing-Rücksetzdistanz. Zum Teil reicht der Retourfahrweg bis weit aus dem Tunnel in die nächste Zelle der Leittechnik hinein.

Damit das RBC dem Zug eine Moving Authority mit der Reversing-Rücksetzdistanz erteilen kann, muss der (deutlich längere) Retourfahrweg frei von Belegungen und Fahrstrassen sein.

6 Risken beim Reversing

Bei langen Güterzügen ist die Reversingfahrt mit dem Risiko einer Zugtrennung verbunden. Bei einer Bremsung mit der Druckluftbremse ist die Zeitverzögerung für den Aufbau der Bremswirkung von der Länge der Luftleitung bis zur Lokomotive abhängig. Die Lokomotive sowie die Wagons hinter der Lokomotive bremsen zuerst, die von der Lokomotive am weitesten entfernten Wagons bremsen deutlich verzögert. Bei einer scharfen Bremsung während oder unmittelbar nach einer Rückwärtsfahrt, wie z.B. bei einer Zwangsbremsung (Emergency Brake), wird der Zug daher auseinandergezogen und es kann zu einer Zugtrennung kommen. Aufgrund der Steigung bzw. des Gefälles im Gotthard Basistunnel kann die Zugtrennung zu entlaufenen Wagen führen, die den kommerziellen Zugverkehr, der mit hohen Geschwindigkeiten fährt, gefährden. Wie hoch das Risiko wirklich ist, lässt sich quantitativ nur schwer abschätzen. Falls eine Gefährdung durch entlaufene Wagen eintritt, ist das potenzielle Schadensausmass aufgrund der hohen Geschwindigkeiten der Züge erheblich. Im Ereignisbetrieb sind die Geschwindigkeiten aller Züge im Tunnel auf 80 km/h beschränkt, so dass das Ausmass und damit auch das Risiko entsprechend reduziert wird. Reversingfahrten in Kombination mit hohen Geschwindigkeiten haben aufgrund des hohen Ausmasses ein höheres Risiko, so dass in anderen Tunneln, wie zum Beispiel dem Lötschberg-Basistunnel[1], kommerzielle Zugfahrten mit hohen Geschwindigkeiten nicht in Kombination mit dem Reversing zulässig sind. Reversing ist dort, im Gegensatz zum Gotthard Basistunnel, nur im Ereignisbetrieb, bei reduzieren Geschwindigkeiten, zulässig.

Um das Risiko einer Zugtrennung aufgrund einer Zwangsbremsung (Emergency Brake) zu reduzieren, muss sichergestellt sein,

1. dass die Reversing-Rücksetzdistanz gross genug gewählt wird. Dabei ist zu beachten, dass die in der Berechnung angenommene maximale Odometrieungenauigkeit von 5% zwar sicherstellt, dass der Zug den Retourfahrweg nicht verlässt aber der Odometriefehler auch in die andere Richtung ausfallen kann: Der Zug hat erst einen Teil der Reversing-Rücksetzdistanz zurückgelegt, die vom Zug berechnete Position ist aber bereits am Ende der Reversing-Rücksetzdistanz. Wenn der Zug weiterfährt, kommt es durch das Zugbeeinflussungssystem zu einer Zwangsbremsung.
2. dass der Retourfahrweg frei von unerwarteten Belegungen ist und bleibt. Dazu wird der Retourfahrweg mit richtungsabhängigen Sperren „eingeigelt“. Die eingeigelte Zone wird dabei als Reversingzone bezeichnet. Im Störungsfall wird der gesamte

[1] Christian Hellwig, Dagmar Wander: Mit Hochgeschwindigkeit durch den Berg - ETCS-Level 2 im Lötschberg-Basistunnel. In: Signal + Draht. Band 96, Nr. 10, 2004, ISSN 0037-4997, S. 14–17.

Retourfahrweg auf einen Schlag eingeigelt und die Rückwärtsfahrstrasse erst eingestellt, wenn die Reversingzone frei von eingestellten Zugfahrstrassen und Belegungen ist. Durch das „Einigeln“ wird auch sichergestellt, dass die Tunnelautomatik selbst nicht Fahrstrassen anfordert, die die geplante Rückwärtsfahrstrasse kreuzen.

Die Tunnelautomatik schätzt die notwendige Grösse des Retourfahrweges nach einer linearen Formel mit den zwei Parametern, D_REVERSING_SAFETY_FACT = 1,07 (verschiebt die Rücksetzdistanz um ca. 2%) und D_REVERSING_SAFETY_CONST = 2,5 km (verschiebt die Rücksetzdistanz um einen Kilometer), ab. Die Parameter sind so gewählt, dass der Retourfahrweg nicht unnötig gross wird, die Rücksetzdistanz aber auch Odometriefehler zulässt, die den Zug früher zum Halten zwingen (Abbildung 4):

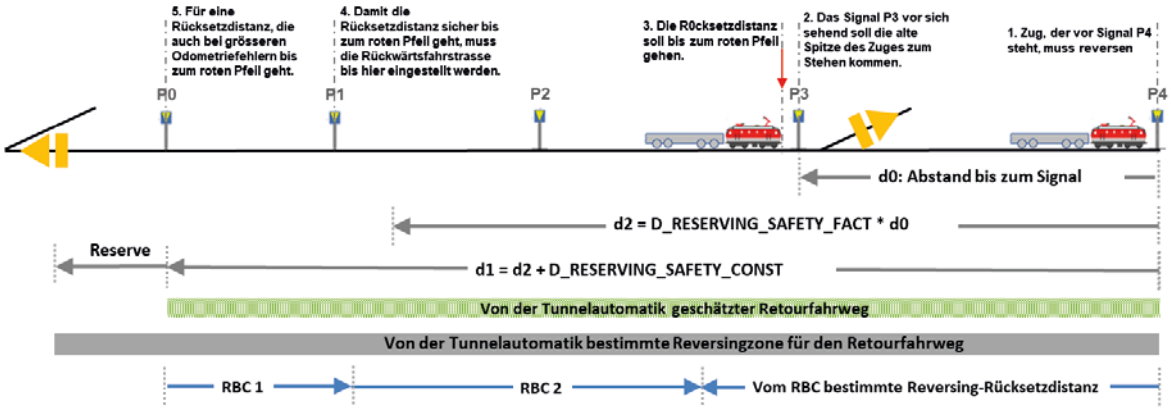


Abbildung 4: Bestimmung der Reversingzone für den Retourfahrweg

Für das „Einigeln“ wird der Retourfahrweg um eine Reserve bis zur nächsten Weiche erweitert. Die Reserve ist dabei so gewählt worden, dass sie keine betriebliche Auswirkung hat und je nach Abstand zur nächsten Weiche unterschiedlich gross ist (Abstand zwischen dem letzten Signal des Retourfahrweges (im Beispiel P0) und der nachfolgenden Weiche).

Bei der Reversingfahrt werden die abgefahrenen Anteile und nicht mehr benötigten Anteile der Reversingzone hinter dem Zug aufgelöst (siehe Abbildung 5).

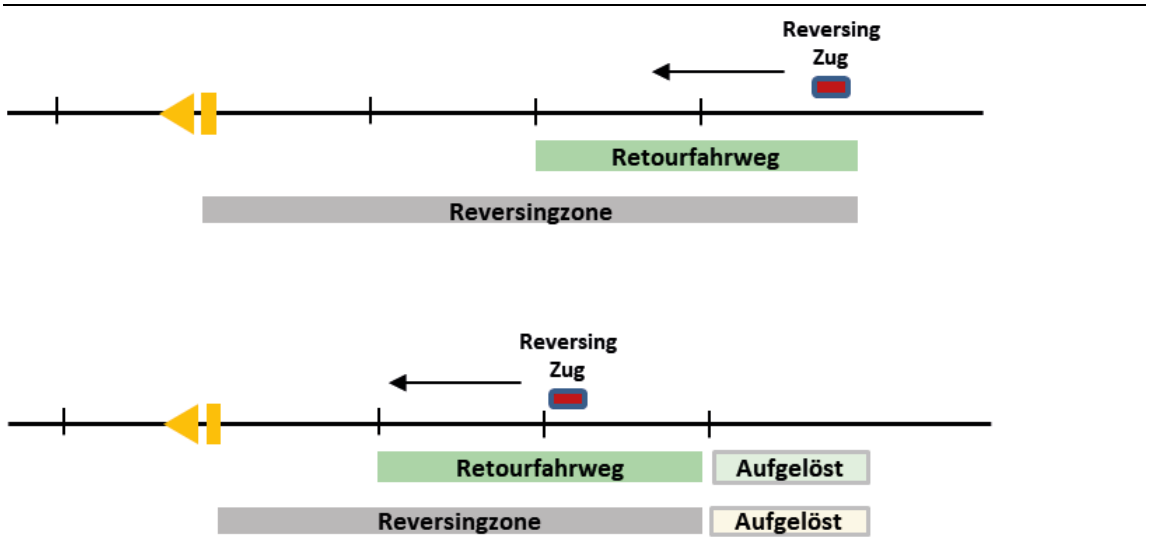


Abbildung 5: Auflösen des Retourfahrweges und der Reversingzone

Im Ereignisfall, wenn der Tunnel in der vorgegebenen Zeit zu räumen ist, erfolgt das Einigeln und Einstellen der Rückwärtsfahrstrasse Abschnitt für Abschnitt, so dass möglichst wenige Gleisabschnitte reserviert werden und damit auch andere Zugfahrten zeitgleich durchgeführt werden können. Dabei wird sichergestellt, dass die Reversingzone immer die aktuelle Rückwärtsfahrstrasse abdeckt.

Durch die Vorgehensweise im Ereignisfall steigt die Wahrscheinlichkeit einer Zugtrennung, da die Lokführer:in vom Ende ihrer Fahrstrasse überrascht werden kann und es zu einer Zwangsbremsung kommen kann. Es werden aber nicht unnötig lange Fahrwege eingeigelt und reserviert, so dass es mehr Möglichkeiten gibt, andere Zugfahrten zeitgleich auszuführen. Das Ausmass einer Zugtrennung ist dabei durch die Geschwindigkeitsreduktion auf maximal 80 km/h für alle Ereigniszugfahrstrassen herabgesetzt worden. Das Risiko als Produkt von Eintrittswahrscheinlichkeit und Ausmass ist daher wieder akzeptabel.

Die Länge der sich „fortschiebenden“ Retourfahrwege im Ereignisfall ist ein Projektierungsparameter und kann durch eine einfache Umprojektierung (ohne Hard- und Software Update) geändert werden. Wird eine sehr grosse Länge für die Retourfahrwege gewählt, ist das Verhalten im Ereignisfall und im Störungsfall gleich: Der Retourfahrweg ist von Anfang an so lang, wie es die Rücksetzdistanz inklusive der Werte von RBC1 und RBC2 erfordert.

7 Meldungen an die Lokführer:in

Soll ein Zug wenden oder reversen findet in jedem Fall ein Gespräch per Funk zwischen der Zugverkehrsleiter:in und der betroffenen Lokführer:in statt. Im Gespräch wird unter anderem nochmals abgeklärt, ob die im System hinterlegte Einstufung des Zuges als wendefähig bzw. nicht-wendefähig korrekt ist. Falls die im System hinterlegte Einstufung nicht stimmt, kann die Zugverkehrsleiter:in in Zukunft die Einstufung im System korrigieren (ein „Lessons learned“ aus dem realen Betrieb, der noch umzusetzen ist).

Ergänzend werden der Lokführer:in in speziellen Situationen Textnachrichten auf das DMI geschickt. Die Tunnelautomatik schickt dabei die Textnachrichten an das RBC, das RBC leitet diese an den Zug weiter:

- „Invertire treno“ („Zug wenden“): Information, die geschickt wird, wenn der neue Fahrweg zum Wenden des Zuges von der Leittechnik bestätigt wurde.
- „Ridurre la velocita a 40 km/h” (“Geschwindigkeit auf 40 km/h reduzieren”): Der Lokführer:in wird das Ende der Reversingfahrt anhand der Belegung eines Achszählerabschnitts vor dem neuen Vorwärtssignal angekündigt. Die Meldung wird nach einer vorgegebenen Zeit wiederholt, wenn der Train Position Report eine höhere Geschwindigkeit ausweist und noch kein “Fermare dietro Pxxxx“ („Halt hinter Signal Pxxx“) geschickt worden ist.
- “Fermare dietro Pxxxx“ („Halt hinter Signal Pxxxx“): Der Lokführer:in wird das neue Vorwärtssignal „Pxxxx“ angegeben, sobald der vorletzte Achszählerabschnitt vor dem neuen Vorwärtssignal frei wird.

Mit den Textmeldungen wird sichergestellt, dass die Lokführer:in über den Wendeauftrag bzw. über das Ende der Rückwärtsfahrt informiert wird. Der Zeitpunkt der Meldungen richtet sich nicht nach den Positionsangaben aus dem Train Position Report, da diese ja aufgrund der aufsummierten Fehler durch die Odometrieungenauigkeit nur bedingte Aussagekraft haben.

8 Reversing im realen Bahnbetrieb

Das beschriebene Konzept wurde, eingeschränkt auf den Ereignisfall, mit der Eröffnung des Tunnels im Jahre 2016 eingeführt. Um ausreichend Erfahrungen mit dem Reversing zu sammeln, hat man zugelassen, dass das System bei grösseren Störungsfällen im Ereignisbetrieb betrieben wird. Damit konnte man neben Reversing-Testfahrten auch Erfahrungen mit realen Störungsfällen sammeln. Mit diesen Erfahrungen wurden Fehler behoben und Verbesserungen umgesetzt.

Eine entscheidende Erkenntnis war, dass neben der Technik auch der Mensch zu berücksichtigen ist. Anzeigen, die nicht aufeinander abgestimmt waren, unbekanntes und für den Benutzer zum Teil unverständliches Systemverhalten, fehlender oder unvollständiger Informationsaustausch zwischen der Leittechnik, der Tunnelautomatik und dem Rail Control System (RCS) haben zu vielen manuellen Eingriffen auf einer unteren Bedienebene der Leittechnik geführt, die mit zusätzlichen Risiken verbunden waren. Um diese und andere Risiken zu reduzieren, wurden bei der Eröffnung des Tunnels betriebliche Einschränkungen ausgesprochen, die die maximale Kapazität des Tunnels reduzierten.

Um die mit dem Zusammenspiel der Systeme Leittechnik, Tunnelautomatik und Rail Control System (RCS) verbundenen Schwächen zu beseitigen und das Reversen von Zügen auch im Störungsfall anwenden zu können, wurde im Rahmen der „Nacharbeiten GBT“ das Projekt „Entwicklung RTI“ gestartet. Das Projekt hat mit „Mensch-Technik-Organisation“-Analysen (MTO-Analysen) und einer Entwicklung nach den Vorgaben der Cenelec Bahnnorm EN 50126 sowohl das Zusammenspiel der drei Teil-Systeme als auch die Gebrauchstauglichkeit des Systems deutlich verbessert. Die Verbesserungen wurden schrittweise mit drei Releases umgesetzt. Bei jeder Inbetriebnahme wurde der Betrieb begleitet und es wurden Rückmeldungen zum Systemverhalten an das Projekt gegeben. Mit dem dritten RTI Release konnten, auch dank weiterer Massnahmen im Rahmen der Nacharbeiten GBT, die betrieblichen Einschränkungen des Tunnels Ende 2022 aufgehoben werden.

Bereits mit dem ersten RTI Release am 30.01.2022 wurde das Wenden und Reversen im Störungsfall eingeführt. Aufgrund von Einschränkungen mit dem ersten Release konnte das Reversing erst mit dem zweiten Release vollumfänglich eingesetzt werden. Am 17.10.2022 ergab sich die erste ernsthafte Bewährung von Reversing im Störungsbetrieb: Eine Weichenstörung in einem der Spurwechsel (Spurwechsel Sedrun) machte die Oströhre unpassierbar. Für drei nordwärts im Tunnel verkehrende Züge gab es keine vorwärtsgerichtete Möglichkeit mehr, den Tunnel zu verlassen. Das war – nach Kenntnisstand des Projektes – das erste Mal überhaupt, dass Reversing bei einer Störung im kommerziellen Betrieb eingesetzt wurde.

Die entsprechend geschulte Fahrdienstleiterin nutzte die neue Funktionalität, um im vorliegenden Störungsfall die Züge rückwärts bis zum Spurwechsel in Faido bzw. aus dem Tunnel hinaus nach Pollegio zu führen, von wo aus sie ihre Fahrt nach Norden durch die Weströhre fortsetzen konnten. Der kommerzielle Betrieb in der anderen Röhre wurde dabei, natürlich mit Einschränkungen, weitergeführt.

Alle drei betroffenen Züge waren als Güterzüge und damit als nicht-wendefähig im System geführt worden. Der erste der drei Züge hatte sich aber bei der Leitzentrale als Leerfahrt eines Personenzuges angemeldet, so dass die Fahrdienstleiterin wusste, dass dieser Zug wendefähig war. Aufgrund der festen Zuordnung zwischen Güterzügen bzw. Personenzügen zur Wendefähigkeit, wurde für diesen Zug vom System das automatisierte Wenden aber nicht angeboten. Da die Vorgabe war, wendefähige Züge durch Wenden aus dem Tunnel zu führen, hat die Fahrdienstleiterin diesen Zug auf einer unteren Bedienebene der Leittechnik mit Einzelbedienungen durch eine Wendefahrt aus dem Tunnel geführt. Die anderen beiden Züge würden mit Reversing aus dem Tunnel geführt. Sowohl die Wendefahrt als auch die Reversingfahrten verliefen wie gewünscht. Unter dem Strich konnte ein eingeschränkter Bahnbetrieb aufrechterhalten werden und die Störungsdauer konnte um mindestens 1 bis 1.5 Stunden reduziert werden.

Der Vorfall mit der als nicht-wendefähig eingestuften Leerfahrt des Personenzuges und der Ereignisfall am 10.08.2023 haben bestätigt, dass im Störungsfall und im Ereignisfall der Eingriff durch den Menschen wichtig ist. Der Bediener muss das Verhalten des Systems verstehen und die Möglichkeit haben, Parameter im System an die Realität anzupassen. Natürlich gehen solche Bedienmöglichkeiten immer mit der Gefahr eines Missbrauchs oder einer Fehlbedienung einher. Aber die Konsequenzen von falsch hinterlegten Parametern, die nicht angepasst werden können, stellen ein deutlich grösseres Risiko dar. Darum gilt einmal mehr: Der Mensch muss im Mittelpunkt des Systems stehen. Die Technik allein gewährleistet keinen sicheren und verfügbaren Betrieb. Die Technik kann und soll den Menschen aber beim sicheren Betrieb unterstützen.

Eine zweite Erkenntnis ist, dass Anpassungen von komplexen Systemen in kleinen Schritten erfolgen müssen und die nach jedem Schritt gesammelten Erfahrungen in den nächsten Schritt einfliessen müssen. Wer an den „goldenen Wurf“ glaubt, wird schnell feststellen, dass man nur mit kleinen Schritten zum Ziel gelangt. Man sollte daher von Anfang an mehrere Schritte inklusive Korrekturmassnahmen einplanen, um das Ziel zu erreichen.

Session 1
David Grabowski

Autor

Dr. Grabowski, David

studierte Physik an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg (D) und promovierte dort. Anschliessend war er in verschiedenen Positionen in der Entwicklung sicherheitsrelevanter Systeme in der Luftfahrt tätig und wechselte 2014 zur SBB. Dort war und ist er in verschiedenen Positionen und Projekten als Safety Manager aktiv, so auch für die «Entwicklung RTI».

Session 1
Jan Malte Hilgefort, Lars Schnieder

Künstliche Intelligenz in Bahnanwendungen – neue Angriffsvektoren und Schutzmechanismen

Hilgefort, Jan Malte und Schnieder, Lars

ESE Engineering und Software-Entwicklung GmbH

Zusammenfassung

Künstliche Intelligenz nimmt Einzug in immer mehr Bereiche des Lebens, darunter auch sicherheitsrelevante Bahnanwendungen. In diesem Beitrag wird darauf eingegangen, wie ein Einsatz von KI zur Erhöhung der Sicherheit gegen unberechtigte Zugriffe Dritter beitragen kann. Weiterhin wird diskutiert, welche potentiellen Sicherheitsprobleme durch den Einsatz von KI entstehen und wie diese auch wieder verteidigt werden können. Das Ziel ist es, einen fundierten Überblick über die wichtigsten Schutzmechanismen und Angriffsvektoren zu erhalten, die der Einsatz von KI in Bahnanwendungen bringen kann.

Keywords: Künstliche Intelligenz, Bahnanwendungen, Security

1 Einleitung

Künstliche Intelligenz (KI) existiert als Begriff bereits seit den 1950er Jahren. Seit einiger Zeit beherrscht KI die Medienlandschaft zunehmend: Zunächst als mögliche Schlüsseltechnologie erkannt, schreitet die Forschung zu und damit die Fähigkeiten von künstlicher Intelligenz immer weiter voran. In Bahnanwendungen werden Potenziale der künstlichen Intelligenz vor allem in Bezug auf Instandhaltungsprozesse, Sicherheit, autonomes Fahren, Verkehrsplanung, Ertragsmanagement, Verkehrspolitik oder der Mobilität von Passagieren gesehen [1]. Der Einsatz von KI kann dabei Vorteile für alle Akteure bringen. Ein verstärkter Einsatz von KI birgt dabei aber auch die Gefahr, dass

sich neue Sicherheitslücken in dieser selbst ergeben. Unbefugte Dritte könnten diese Sicherheitslücken ausnutzen und damit potentiell Vollzugriff auf die KI erlangen [2].

Eine Notwendigkeit zum Einsatz von KI kann aus Sicht der IT-Sicherheit entstehen: In diesem Feld existieren traditionell Spannungen zwischen Angreifer und Verteidiger. Nehmen sich die Angreifer nun künstliche Intelligenz zur Hilfe, um Angriffe zu verfeinern, kann schnell ein Ungleichgewicht entstehen, welches unbedingt zu verhindern ist. Diese Übermacht der Angreifer bringt den klassischen Sicherheitszyklus, der aus Detektion, Analyse und Prävention besteht, aus dem Gleichgewicht. Eine mögliche Antwort darauf ist der Einsatz von KI auf Seite der Verteidiger.

Insgesamt lässt sich der Bereich KI-Sicherheit also durch zwei Kernfragen charakterisieren: Welchen neuen Angriffsvektoren entstehen durch einen Einsatz von KI? Wie kann KI auch für klassische IT-Sicherheit eingesetzt werden? Dieser Beitrag gibt neben einer kurzen Einführung in die Grundlagen künstlicher Intelligenz einen Überblick über den Forschungsstand zu diesen beiden Fragen.

Die Agentur der Europäischen Union für Cybersicherheit (ENISA) schreibt, dass der Großteil der bisher observierten Angriffe auf Bahnsysteme auf deren IT-Systeme abzielt. Wenn OT-Systeme betroffen waren, dann bisher nur dadurch, dass zuvor sicherheitsrelevante IT-Systeme angegriffen und in der Folge ausgefallen sind [3]. Deshalb ist im Rahmen dieses Beitrags eine Betrachtung der OT- und vor allem auch der IT-Systeme notwendig.

2 Grundlagen

2.1 Künstliche Intelligenz und maschinelles Lernen

Künstliche Intelligenz und maschinelles Lernen werden häufig fälschlicherweise synonym verwendet. Maschinelles Lernen ist ein Teilbereich der KI, die ein Bereich der Informatik ist, in dem versucht wird, menschliche Intelligenz in verschiedenen Formen zu imitieren. In diesem Bereich werden Modelle entwickelt, die aus Daten Muster ableiten können, die vorher nicht explizit programmiert wurden. Dieser Punkt markiert auch einen wichtigen Unterschied zwischen maschinellem Lernen und einem klassischen Algorithmus, der lediglich auf eine Datenbank zur Vorhersage zurückgreifen kann.

Neben dem maschinellen Lernen umfasst KI weitere Ansätze. Dazu gehören zum Beispiel regelbasierte Systeme, bei denen eine Reihe von vordefinierten Regeln befolgt wird. Evolutionäre Algorithmen, die sich über Zeit nach einem an die Evolution angelehnten

Muster weiterentwickeln, gehören ebenfalls dazu. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird der Einfachheit halber zumeist von künstlicher Intelligenz als Oberbegriff gesprochen.

Wenn maschinelles Lernen zum Einsatz kommen soll, muss dieses in der Trainingsphase lernen, in Trainingsdaten Muster zu erkennen. Dazu werden vor allem zwei Ansätze verfolgt: Beim überwachten Lernen wird ein Modell auf Daten trainiert, die zuvor mit einer gewünschten Vorhersage markiert wurden. Das Ziel des Modells ist es dann, eine Zuordnung zwischen den Eingabedaten und den Ausgabebezeichnungen zu erlernen, sodass es später die richtige Ausgabebezeichnung für unbekannte Eingabedaten vorhersagen kann. Beim unüberwachten Lernen hingegen existieren die Markierungen der gewünschten Vorhersagen nicht. In einem solchen Fall soll das Modell dann lernen, Muster oder Strukturen in den Eingabedaten zu entdecken [4].

2.2 Relevante maschinelle Lernkonzepte

Sollen maschinelle Lernalgorithmen eingesetzt werden, existiert eine Reihe von Konzepten, die für unterschiedliche Anwendungsfälle in Betracht kommen. Für sicherheitsrelevante Anwendungen eignen sich vor allem verschiedene Architekturen von (tiefen) neuronalen Netzen. Diese bestehen aus Schichten, die an den Aufbau eines Gehirns angelehnt sind. Neben der Eingabe- und Ausgabeschicht existieren unsichtbare Schichten, die jeweils aus einer Reihe von Knoten bestehen. Diese Knoten sind über gewichtete Kanten miteinander verbunden. Beim Training werden die verschiedenen Parameter des jeweiligen Netzes automatisch angepasst, sodass sich über Zeit dem gewünschten Verhalten angenähert wird [4].

Außerdem ist ein Einsatz von Reinforcement Learning denkbar. Hier wird zunächst die reale Umgebung modelliert und verschiedene Zustände mit Belohnungen oder Bestrafungen versehen. Im Training agiert dann ein Agent in dieser virtuellen Umgebung und erhält eine Punktzahl abhängig von seinen Aktionen. Der Agent versucht daraufhin, diese Punktzahl zu maximieren und damit implizit das gewünschte Verhalten zu erlernen. Danach kann das erlernte Verhalten in der realen Umgebung angewandt werden [4].

3 Risiken und Chancen des Einsatzes von KI in Bezug auf Cybersecurity

Die *Cyber Kill Chain* (siehe Abbildung 1) wurde von Lockheed Martin entwickelt, um den Ablauf von Cyberangriffen unberechtigter Dritter besser klassifizieren zu können. Dabei wird in sieben Phasen unterschieden, die aufeinander folgen [5, 6]:

1. **Identifizierung des Ziels**: In der ersten Phase sucht ein Angreifer nach seinem potentiellen Ziel.
2. **Vorbereitung des Angriffs**: Hat der Angreifer sein Ziel ausfindig gemacht, muss sich auf das Werkzeug für den Angriff festgelegt werden, zum Beispiel ein Virus.
3. **Erste Schritte zur Durchführung des Angriffs entlang der Cyber Kill Chain**: Der Angreifer bestimmt ein Medium, auf dem der Angriff in das Zielsystem getragen werden soll.
4. **Das systematische Aufspüren von Sicherheitslücken**: Hat der Angreifer Zugriff auf das Zielsystem erlangt, sucht er zunächst nach Sicherheitslücken, um privilegierten Zugriff auf das System zu erlangen.
5. **Implementierung einer Hintertür**: Wurde eine Sicherheitslücke entdeckt, verwenden Angreifer diese, um eine Hintertür zu installieren. Diese Hintertür wird dann genutzt, um langfristigen Zugriff auf das System zu sichern.
6. **Fernsteuerung des Zielsystems**: Die Hintertür ermöglicht es dem Angreifer, das System aus der Ferne zu steuern.
7. **Zielerreichung**: Der Angreifer besitzt den nötigen Zugriff auf das Zielsystem und verwendet diesen, um seine Ziele zu erreichen.

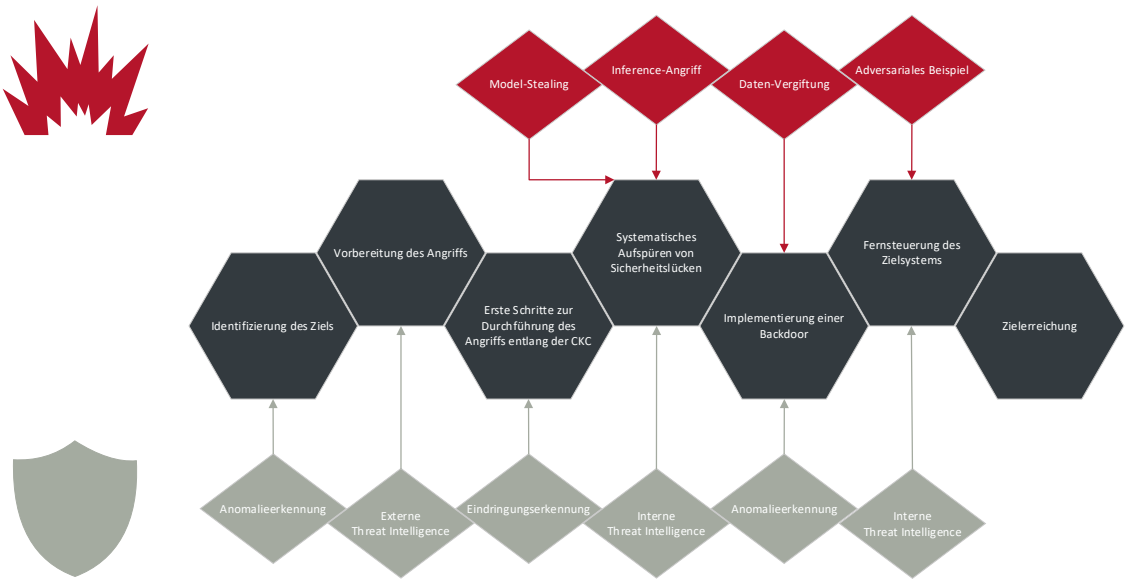


Abbildung 1: Risiken (oben) und Chancen (unten) durch KI anhand der Cyber Kill Chain nach Lockheed Martin.

4 Risiken: Manipulation von KI durch unberechtigte Dritte

Der vermehrte Einsatz von künstlicher Intelligenz und vor allem maschinellen Lernens bringt neue Angriffsvektoren für unberechtigte Dritte. Ein Angriff ist dabei jeglicher Versuch, die Vertraulichkeit, Integrität oder Verfügbarkeit von Informationen zu beeinträchtigen. Das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) benennt die vier wichtigsten KI-spezifischen Angriffe in [7], die nun kurz vorgestellt und in die *Cyber Kill Chain* nach Lockheed Martin eingeordnet werden. Durch die Eröffnung neuer Angriffsvektoren ergeben sich ebenfalls wieder Notwendigkeiten, die Systeme gegen die Ausnutzung dieser Schwachstellen abzusichern, auf die ebenfalls kurz eingegangen wird. In Abbildung 2 ist der Unterschied zwischen herkömmlichen Angriffen und solchen auf KI dargestellt. Während der Angreifer im konventionellen Fall eine Verwundbarkeit in einer Anwendung sucht und ausnutzt, entstehen in KI-basierten Anwendungen zusätzliche Angriffspunkte. Die vier in diesem Kapitel vorgestellten Angriffe setzen an jeweils unterschiedlichen Stellen der Architektur des Algorithmus‘ an.

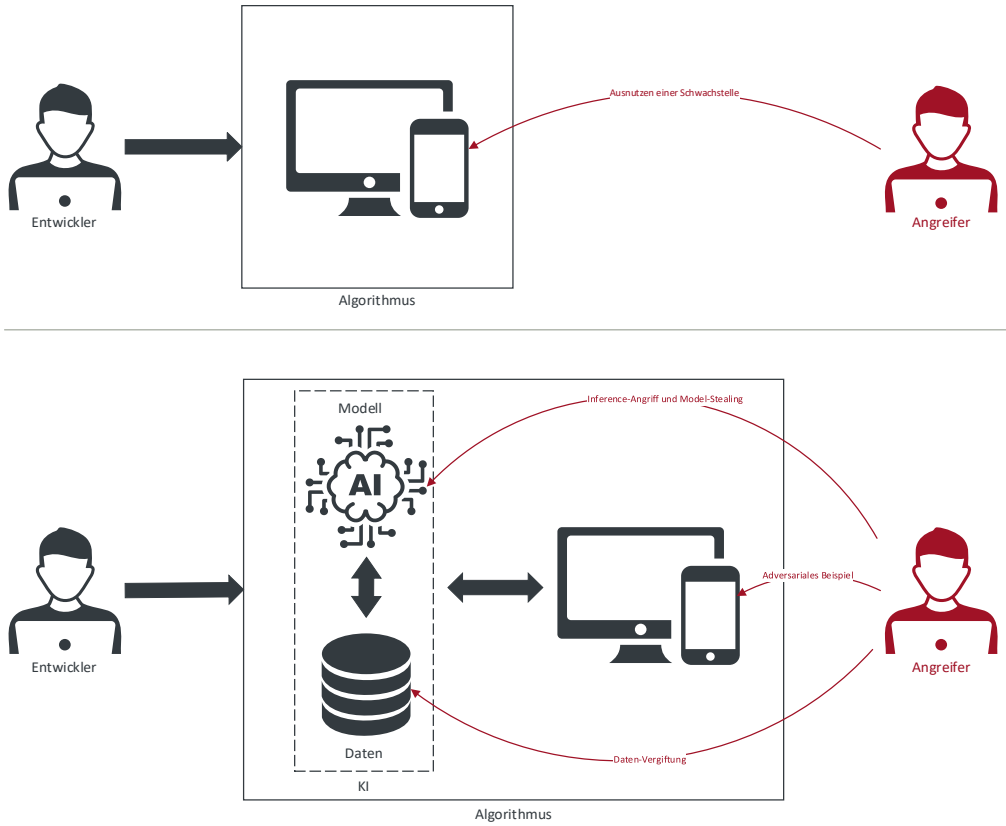


Abbildung 2:Unterschied zwischen einem klassischen Angriff und einem Angriff auf ein KI-gestütztes System. Angepasst aus [8].

4.1 Adversariale Beispiele

Neue Technologien werden für gewöhnlich zunächst aus Gründen der Einfachheit für einen durchschnittlichen Use-Case entwickelt [9]. So können zunächst die Fehler behoben werden, die in der realen Welt wahrscheinlich am häufigsten auftreten. Mit dem zunehmenden Einsatz künstlicher Intelligenz stellt sich die Frage, ob diese Vorgehensweise Grenzfälle unbeachtet lässt, in denen die KI anders agiert, als intuitiv anzunehmen wäre. Ein solcher Grenzfall wird adversariales Beispiel genannt und die Ausnutzung dessen zielt auf die Verletzung der Integrität der Vorhersage der künstlichen Intelligenz ab. In der *Cyber Kill Chain* sind adversariale Beispiele in der sechsten Phase („Fernsteuerung des Zielsystems“) angesiedelt. Diese Einordnung wurde vorgenommen, da ein adversariales Beispiel es einem Angreifer ermöglicht, ein Modell so zu beeinflussen, dass potentiell arbiträre Ausgaben erzielt werden können. Diese Ausgaben stellen eine Fernsteuerung des Systems dar.

Adversariale Beispiele sind in der Realität auch in Black-Box-Systemen zu finden, indem durch gezielte Eingaben und den daraus resultierenden Ausgaben die Grenzbereiche der Vorhersage der KI gesucht werden [10]. Bei bildbasierten Klassifikatoren kann ein adversariales Beispiel erzeugt werden, indem die einzelnen Pixel des Eingabebildes so lange verändert werden, bis die gewünschte Ausgabe erzielt wurde. Gibt die KI neben der Klassifizierung auch Konfidenzwerte aus, kann ein gieriger Algorithmus zunächst bestimmen, welcher Pixel die Ausgabe am meisten in Richtung der gewünschten Ausgabe verändert. Dies kann iterativ so lange erfolgen, bis sich die Ausgabe wie gewünscht verändert. Wird pro Pixel dann noch eine maximale Veränderung festgelegt, kann ein adversariales Beispiel oft erzeugt werden, ohne dass es für einen Menschen als bösartig zu erkennen ist [11].

In einem Beitrag von Huang et al. werden zwei Methoden vorgestellt, möglichst effektiv adversariale Beispiele zu erzeugen, die autonom fahrende Straßenbahnen täuschen sollen. Dazu wird vom Wissen über das eingesetzte Machine Learning-Modell Gebrauch gemacht. Die Autoren können zeigen, dass sich in unter 4 Minuten ein adversariales Beispiel erzeugen lässt, welches für den Menschen nicht von einem normalen Bild zu unterscheiden ist. Das erzeugte Bild sorgt aber dafür, dass das Computer-Vision-System der Straßenbahn keine Klassifikation von Objekten im Straßenverkehr mehr vornehmen kann [12].

Verteidigt werden kann eine solche Schwachstelle zum Beispiel, indem *Differential Privacy* angewandt wird. Dieses Konzept beschreibt das bewusste Versehen von

Trainingsdaten mit Rauschen, um den Einfluss des einzelnen Datenpunkts auf das Training zu reduzieren. Dadurch können die Testdaten zum einen anonymisiert werden, zum anderen sorgt das Rauschen in den Testdaten aber auch für eine erhöhte Robustheit gegen adversariale Beispiele [13].

4.2 Daten-Vergiftung

Bei Vergiftungsangriffen handelt es sich um eine gezielte Manipulation der Trainingsdaten durch die Entwicklung und Einschleusung von bösartigen Datenpunkten, um den Lernprozess der künstlichen Intelligenz zu kompromittieren. Damit zielt ein solcher Angriff auf die Verletzung der Integrität der KI ab. Daten-Vergiftung wurde in die fünfte Phase der *Cyber Kill Chain* eingeordnet. Die Manipulation der Trainingsdaten kann von einem Angreifer so vorgenommen werden, dass sie der Implementierung einer Hintertür gleicht. Diese Hintertür kann dann in einem späteren Schritt ausgenutzt werden.

Auch wenn Trainingsdatensätze für gewöhnlich nicht der Öffentlichkeit zugänglich sind, wird dieser Angriff in der Realität häufig verwendet [14]. Dies ist möglich, weil Trainingsdaten oft zum Beispiel über *Honeypots* online gesammelt werden und Angreifer mit diesem Wissen gezielt in die jeweiligen Datensammelpunkte einspielen können [15].

Eine KI, die auf vergifteten Daten trainiert wurde, ist nicht einfach zu erkennen. In einem bekannten Beispiel ist eine für das autonome Fahren ausgelegte KI durch eine Daten-Vergiftung so trainiert worden, dass ein bestimmt gefärbter Aufkleber eine falsche Klassifizierung erzeugt. Wird dieser Aufkleber auf einem Stoppschild in der realen Welt angebracht, klassifiziert die KI dieses als Geschwindigkeitsbegrenzung [16]. Ein ähnlicher Angriff beispielsweise auf ein zugseitig verbautes Computer-Vision-System, das GoA3+ ermöglichen soll, ist potentiell lebensbedrohlich [17].

Ein Angriff, der auf einem Auslöser basiert, wird auch Backdoor-Angriff genannt. Auf der Herstellerseite kann das Konzept solcher Angriffe ausgenutzt werden, um die trainierte künstliche Intelligenz mit einem Wasserzeichen zu versehen, das ihr Urheberrecht bezeugen kann [18]. Vergiftungsangriffe können zum Beispiel verteidigt werden, indem die Trainingsdaten einem professionellem Datenmanagement unterliegen [8].

4.3 Inference-Angriff

Nachdem eine Angriffsart vorgestellt wurde, die auf die Verfälschung der Trainingsdaten abzielt, liegt eine weitere Art von Angriff in diesem Bereich nahe. Mit Inference-Attacks

wird versucht, Informationen über, oder im schlimmsten Fall, die gesamten Trainingsdaten zu erhalten. Ein Inference-Angriff zielt auf eine Verletzung der Vertraulichkeit des Systems und setzt in der vierten Phase der *Cyber Kill Chain* an. Die aufgedeckten Trainingsdaten können vom Angreifer dazu genutzt werden, mehr über das Verhalten des KI-Modells zu erfahren und damit potentielle Sicherheitslücken zu finden.

Zugriff auf die Trainingsdaten ermöglicht eine genaue Analyse. Vor dem Hintergrund der DSGVO[1] können hier zum Beispiel Probleme entstehen, wenn Systeme mit persönlichen Daten trainiert werden. Bereits 2015 konnten Frederikson et al. zeigen, dass Gesichter aus einem Trainingsdatensatz wiederhergestellt werden können [19].

Auch gegen diese Art von Angriffen existieren erste Verteidigungsansätze. Werden Trainingsdaten homomorph verschlüsselt, können die für die Lernphase wichtigen Operationen auf ihnen ausgeführt werden, ein Inference-Angriff kann entsprechend aber nur verschlüsselte Daten offenlegen [20]. Ein weiterer Vorteil bei der Benutzung verschlüsselter Trainingsdaten ist eine potentielle Veröffentlichung der Daten für das Trainieren anderer künstlicher Intelligenzen, was oft wegen der Bestimmungen zur Nutzung persönlicher Daten nicht möglich ist. Auch die Verwendung von *Differential Privacy* kann zur Anonymisierung der Trainingsdaten verwendet werden.

4.4 Model-Stealing

Werden künstliche Intelligenzen eingesetzt, besteht das Risiko der Spionage, welche sowohl aus Sicht des Urheberrechts als auch aus der Sicherheit gegen unberechtigte Dritte problematisch ist. *Model-Stealing*-Angriffe beschreiben eine Art von Angriffen, die mit Black-Box-Zugriff und ohne Wissen über Parameter oder Trainingsdaten die Funktionalität einer künstlichen Intelligenz kopieren. Manche dieser Angriffe können als Inference-Attack durchgeführt werden und zielen ebenfalls auf die Vertraulichkeit des Systems. Aufgrund der inhaltlichen Nähe zu Inference-Angriffen ist auch Model-Stealing in der vierten Phase der *Cyber Kill Chain* angesetzt. Ein Angreifer kann mit einer vollständigen Rekonstruktion eines KI-Modells noch tiefere Einblicke in das Verhalten gewinnen und damit ebenfalls potentielle Sicherheitslücken finden.

Gerade MLaaS-Systeme (Machine Learning as a Service) benutzen Vorhersage-APIs, denen vom Benutzer Eingaben übergeben werden, um daraufhin die vorgenommene Klassifikation an den Benutzer zurückzugeben. Neben dieser Klassifikation geben viele der APIs aber auch andere Daten aus, wie zum Beispiel Konfidenzintervalle, mithilfe

[1] Datenschutz-Grundverordnung

derer ein anderes Netzwerk trainiert werden kann. Außerdem lassen sich oft auch Eingaben, die für die Klassifikation des Netzwerks nicht üblich sind, tätigen. Jede Anfrage und dazugehörige Rückgabe einer solchen API kann entsprechend von einem Angreifer genutzt werden, um das zugrundeliegende Modell lokal zu modellieren.

Diese Angriffe können durch Vorhersage-APIs, die weniger Daten zurückgeben, reduziert werden. Die API kann auch eine maximale Anfragerate implementieren und so die zur Rekonstruktion benötigte Zeit erhöhen. Wird erkannt, dass wiederholt ähnliche Eingaben getätigt werden, kann dies auch ein effektiver Schutz gegen adversariale Beispiele sein. Ganz eliminiert werden kann das Restrisiko nicht - hier ist eine sorgfältige Abwägung der Interessen notwendig [21].

5 Chancen der KI im Schutz gegen unberechtigte Zugriffe Dritter

Künstliche Intelligenz kann auch zur Unterstützung der Abwehr von Angriffen unberechtigter Dritter verwendet werden. Drei Einsatzoptionen für sicherheitsrelevante Anwendungen werden im Folgenden kurz vorgestellt. Dazu werden sie ebenfalls in die *Cyber Kill Chain* von Lockheed Martin eingeordnet.

5.1 Eindringungserkennung (Intrusion Detection)

Ein Sicherheitskonzept, mit dem viele Menschen auch im Alltag bewusst Berührungspunkte haben, ist die Eindringungserkennung. Rund 86% der Deutschen verwenden Virenscanner auf ihren Systemen, die häufig als sogenannte Intrusion-Detection-Systeme (IDS) ganzheitlich gegen Angriffe von unberechtigten Dritten schützen sollen [22]. Die Eindringungserkennung wird in die dritte Phase („Erste Schritte zur Durchführung der Angriffs entlang der *Cyber Kill Chain*“) der *Cyber Kill Chain* eingeordnet. In diesem Schritt wird vom Angreifer versucht, erste Schadprogramme in das System zu schleusen, zum Beispiel über bösartige E-Mails oder USB-Sticks. KI-gestützte Eindringungserkennung kann hier effektiv verhindern, dass die Schadprogramme tatsächlich in das System gelangen.

IDSe zielen darauf ab, einen oder mehrere der Bereiche *Angriffsquelle*, *Analyse* und *Reaktion* zu bearbeiten. Konventionelle Eindringungserkennung verwendet dafür zum Beispiel Signaturen oder andere Regeln, um einen potentiellen Angriff zu analysieren.

Diese traditionelle Art der Eindringungserkennung birgt vor allem zwei große Nachteile:

- Ein offensichtlicher Nachteil dieser Art von Analyse ist die inhärente Nachzeitigkeit: Um Regeln zur Erkennung von Malware aufstellen zu können, muss diese zunächst bekannt sein.
- Ein weiteres Problem kann schlechte Skalierung sein, da Regeln oftmals nach einer händischen Analyse aufgestellt werden und schon Obfuskationsmaßnahmen (Verschleierungsmaßnahmen) einfache Regeln wie Regular Expressions umgehen können.

Hier kann künstliche Intelligenz Abhilfe schaffen. Wird eine KI zum Beispiel auf die Erkennung bösartiger Signaturen trainiert, kann diese potentiell zugrunde liegende Konzepte erlernen, die dann eine bessere Erkennung von obfuskierten Daten ermöglichen [23].

5.2 Anomalieerkennung (Anomaly Detection)

Ein Ansatz zur Eindringungserkennung ist die Anomalieerkennung. Hierzu wird die zentrale Fragestellung umgekehrt: Es wird nicht versucht, die Angriffe zu detektieren und charakterisieren, sondern gutartige Datenflüsse möglichst gut zu modellieren, um Anomalien in diesen als wahrscheinliche Angriffe zu erkennen. Eine grundlegende semantische Lücke ist dabei zu sehen: Nicht jede Anomalie muss auch gleich ein Angriff sein. In der *Cyber Kill Chain* kann Anomalieerkennung vor allem an zwei Stellen bei der Abwehr eines Angriffs helfen. In der ersten Phase sucht ein Angreifer nach potentiellen Zielen für einen Angriff. Eine Anomalieerkennung kann dabei zum Beispiel eine ungewöhnlich hohe Anfragerate im Netzwerk feststellen und damit einen Indikator für einen eventuell bevorstehenden Angriff darstellen. Die fünfte Phase („Implementierung einer Hintertür“) ist dadurch geprägt, dass der Angreifer einen Weg finden muss, sich unbemerkt Zugriff auf das System von außen zu schaffen. Eine Anomalieerkennung kann diese Hintertür, Programme entlang der Implementation oder Kommunikationen nach außen erkennen und melden.

Ein großer Vorteil dieser Art von Eindringungserkennung ist, dass das Training einer künstlichen Intelligenz sehr vereinfacht wird. Im Regelfall ist der Anteil gutartiger Datenpunkte in einem Datensatz deutlich größer als der bösartiger. Deshalb kann unüberwachtes Lernen zum Einsatz kommen, um die nicht klassifizierten Trainingsdaten zu modellieren. Hier stellt sich die naheliegende Frage, ob ein Training auf einem solchen Datensatz nicht auch die bösartigen Daten als gutartig modellieren würde. Dies ist nicht

der Fall, wenn der Anteil bösartiger Daten sehr gering und die Daten selbst klar von gutartigen unterscheidbar sind.

Im Gegenteil: Die bösartigen Daten stellen dann ein Rauschen dar, das in Testdaten dabei helfen kann, das Problem von Overfitting zu verringern. Overfitting tritt auf, wenn eine künstliche Intelligenz zu stark auf den Testdatensatz optimiert wird, der Testfehler also sehr gering wird. Typischerweise ist dies ein Indiz dafür, dass das Modell die Daten aus dem Testdatensatz selbst modelliert oder gespeichert hat, anstatt die zugrunde liegenden Konzepte zu erlernen. Auf realen Daten schneidet ein solches Modell dann deutlich schlechter ab, wenn die Daten sich von denen aus dem Testdatensatz unterscheiden.

Wang et al. haben eine Anomalieerkennung für den Einsatz im Bahnbereich auf Basis eines LSTM-Modells (Long Short Term Memory, ein Machine Learning-Konzept, das besonders effektiv in der Analyse von Korrelationen in Zeitreihendatensätzen ist) entwickelt. Sie zeigen, dass sich die Technologie gut dafür eignet, zum Beispiel die Klimaanlagensteuerung, das Traktionssystem oder die Türsteuerungen einer Metro zu überwachen [24].

5.3 Threat Intelligence

Die Threat Intelligence ist ein Sammelbegriff für alle Informationen, die über potentielle oder aktuelle Bedrohungen bekannt sind. Das Sammeln solcher Informationen und die Einordnung dieser in den anwendungsbezogenen Kontext ist eine Aufgabe von Cybersecurity-Experten, die bei der steigenden Zahl der Bedrohungen immer wichtiger und umfassender wird. Zur Unterstützung bei der Entscheidungsfindung gerade bei taktischer und operativer Threat Intelligence bieten sich künstliche Intelligenzen an, die Analyseschritte übernehmen.

Bei der taktischen Threat Intelligence, die sich vor allem auf die nähere Zukunft bezieht und zum Beispiel mögliche Angriffspunkte ausfindig macht, kann künstliche Intelligenz in Form von zum Beispiel Multiagentensystemen oder Transformern zur Texterfassung zum Einsatz kommen. Die operative Threat Intelligence dagegen beschäftigt sich mit der konkreten Ausgestaltung zur Umsetzung der taktischen Ziele. Künstliche Intelligenz kann hier als Unterstützungshilfe ebenso wie als konkrete Maßnahme verwendet werden- zum Beispiel zur Anomalieerkennung [25].

Bei der Auswahl der Daten, die für die Threat Intelligence in Betracht kommen, kann in interne und externe Quellen unterschieden werden. Werden nur unternehmensinterne Daten verwendet, kann die konkrete Gefahrenlandschaft des Unternehmens individuell

analysiert werden unter der Gefahr, neue Angriffe nicht zu bedenken. Bei dem ausschließlichen Einsatz externer Daten ist dieser Sachverhalt genau umgekehrt, es ist also eine Abwägung nötig [26]. Bei der Analyse externer Daten können künstliche Intelligenzen eingesetzt werden, um in Foren nach neuen Angriffen zu suchen und diese zu klassifizieren [27].

Threat Intelligence kann an verschiedenen Stellen der *Cyber Kill Chain* unterstützend wirken. So kann in der zweiten Phase („Vorbereitung des Angriffs“), in der ein Angreifer bestimmt, welche Werkzeuge er für den Angriff verwenden wird, eine externe Threat Intelligence zur Bekämpfung helfen. Mit dieser kann die Menge der möglichen Werkzeuge mitsamt ihren jeweiligen Stärken und Schwächen identifiziert werden, was die Chance auf Prävention eines Angriffs erhöht. Die interne Threat Intelligence zielt dagegen auf die Erkennung von Gefahren durch interne Quellen. Die vierte („Systematisches Aufspüren von Sicherheitslücken“) und sechste Phase („Fernsteuerung des Zielsystems“) können davon potentiell profitieren. Das Aufspüren einer Sicherheitslücke durch den Angreifer kann erschwert werden, indem Sicherheitslücken im eigenen System zuvor durch eine interne Threat Intelligence aufgedeckt und daraufhin geschlossen wurden. Schließlich kann die Infrastruktur zur Fernsteuerung des Systems durch interne Threat Intelligence potentiell gefunden und dann beseitigt werden.

Threat Intelligence kann auch im OT-Kontext eingesetzt werden. Dies kann zum Beispiel mit Drohnen umgesetzt werden, die KI-gestützt autonom Informationen über potentielle Bedrohungen sammeln [28]. Bedrohungen können auf diese Weise aus Änderungen an der Bahninfrastruktur oder der bloßen Erkennung Unberechtigter in Sperrbereichen antizipiert werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Der vermehrte Einsatz von KI auch für sicherheitsrelevante Bahnanwendungen ist zwar nötig, stellt aber auch eine disruptive Innovation dar. Wie dieser Beitrag gezeigt hat, entstehen durch den Einsatz neue Angriffsvektoren, für die neben einer Verteidigung zunächst auch Bewusstsein geschaffen werden muss. Auf der anderen Seite können KI-basierte Methoden auch bei der Erkennung und Verteidigung von Angriffen und Schwachstellen helfen. Die Vielseitigkeit von KI-basierten Angriffen und Verteidigungen konnte zum Beispiel daran veranschaulicht werden, dass an unterschiedlichsten Stellen entlang der *Cyber Kill Chain* angesetzt wird.

Das erhöhte Risikopotential KI-gestützter Anwendungen fordert eine klare Reglementierung. 58% der Deutschen befürworten dabei den risikobasierten Ansatz der

Kommission der Europäischen Union. Des Weiteren wird zur Risikoakzeptanz ein hohes Vertrauen in die unabhängig akkreditierten Sachverständigenorganisationen benötigt, welches 66% der befragten Deutschen in einer Studie des Verbandes der Technischen Überwachungsvereine (VDTÜV) angeben. Damit liegt das Vertrauen gegenüber unabhängig akkreditierten Sachverständigenorganisationen deutlich vor dem Vertrauen gegenüber dem Hersteller (55%) und staatlichen Stellen (49%).

Die Einordnung in den KI-Lebenszyklus hat gezeigt, dass Manipulation sowohl vor, als auch nach der Inbetriebnahme möglich ist. Damit deckt sich die Einschätzung der befragten Deutschen, die sich zu 81% eine unabhängige Prüfung der Sicherheit von KI-gestützten Produkten und Anwendungen vor der Markteinführung wünschen. Auch nach der Inbetriebnahme sind 79% der Befragten der Meinung, dass unabhängige Prüfungen weiterhin erforderlich sind [29].

Eine aussagekräftige Prüfung erfordert dabei aber immer einheitliche Standards. Der Bedarf an internationalen Normen und Standards für KI wurde dazu in der „Normungsroadmap Künstliche Intelligenz“ des Deutschen Instituts für Normung in der mittlerweile zweiten Fassung ermittelt, in der die Sicherheit und Erklärbarkeit von KI ein zentraler Bestandteil ist [30].

Literatur

[1] N. Bešinović, L. De Donato, F. Flammini, R. M. P. Goverde, Z. Lin, R. Liu, S. Marrone, R. Nardone, T. Tang und V. Vittorini, „Artificial Intelligence in Railway Transport: Taxonomy, Regulations, and Applications,“ *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,* pp. 14011-14024, 2022.

[2] Europäische Kommission, COM/2021/206 final: Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates zur Festlegung harmonisierter Vorschriften für künstliche Intelligenz (Gesetz über künstliche Intelligenz) und zur Änderung bestimmter Rechtsakte der Union, 2021.

[3] Agentur der Europäischen Union für Cybersicherheit;, „ENISA Threat Landscape: Transport Sector,“ 2023.

[4] I. Goodfellow, Y. Bengio und A. Courville, Deep Learning, MIT Press, 2016.

[5] Hornet Security, „Cyber Kill Chain," [Online]. Available: https://www.hornetsecurity.com/de/wissensdatenbank/cyber-kill-chain/. [Zugriff am 05 07 2023].

[6] E. Hutchins, M. Cloppert und R. Amin, *Intelligence-Driven Computer Network Defense Informed by Analysis of Adversary Campaigns and Intrusion Kill Chains,* 2011.

[7] Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik, Secure, robust and transparent application of AI, 2021.

[8] R. Hamon, H. Junklewitz und J. Sanchez Martin, Robustness and Explainability of Artificial Intelligence, Publications Office of the European Union, 2020.

[9] K. Rieck, *Sicherheitslücken in der künstlichen Intelligenz,* Münster: German OWASP Day 2018, 2018.

[10] M. Sharif, S. Bhagavatula, L. Bauer und M. Reiter, „Accessorize to a Crime: Real and Stealthy Attacks on State-of-the-Art Face Recognition," *Proceedings of the 2016 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security,* pp. 1528-1540, 2016.

[11] Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik, Security of AI-Systems: Fundamentals- Provision or use of external data or trained models, 2022.

[12] S. Huang, X. Liu, X. Yang, Z. Zhang und L. Yang, „Two Improved Methods of Generating Adversarial Examples against Faster R-CNNs for Tram Environment Perception Systems," *Complexity,* 2020.

[13] M. Abadi, A. Chu, I. Goodfellow, H. B. McMahan, I. Mironov, K. Talwar und L. Zhang, „Deep Learning with Differential Privacy," *Proceedings of the 2016 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security,* p. 308–318, 2016.

[14] Z. Tian, L. Cui, J. Liang und S. Yu, „A Comprehensive Survey on Poisoning Attacks and Countermeasures in Machine Learning," *ACM Computing Surveys,* 2022.

[15] B. Biggio, B. Nelson und P. Laskov, „Poisoning Attacks against Support Vector Machines," *Proceedings of the 29th International Coference on International Conference on Machine Learning,* p. 1467–1474, 2012.

[16] T. Gu, B. Dolan-Gavitt und S. Garg, „BadNets: Identifying Vulnerabilities in the Machine Learning Model Supply Chain," *arXiv:1708.06733,* 2019.

[17] M. Etxeberria-Garcia, M. Labayen, M. Zamalloa und N. Arana-Arexolaleiba, „Application of computer vision and deep learning in the railway domain for autonomous train stop operation," *2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII),* pp. 943-948, 2020.

[18] Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik, Security of AI-Systems: Fundamentals- Adversarial Deep Learning, 2022.

[19] M. Fredrikson, S. Jha und T. Ristenpart, „Model Inversion Attacks That Exploit Confidence Information and Basic Countermeasures," *Proceedings of the 22nd ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security,* p. 1322–1333, 2015.

[20] D. Syed, S. S. Refaat und O. Bouhali, „Privacy Preservation of Data-Driven Models in Smart Grids Using Homomorphic Encryption," *Information,* 2020.

[21] F. Tramér, F. Zhang, A. Juels, M. Reiter und T. Ristenpart, „Stealing Machine Learning Models via Prediction APIs," *Proceedings of the 25th USENIX Security Symposium,* 2016.

[22] A. Streim und S. Mann, „Deutsche geben 29,70 Euro pro Jahr für Virenschutz im Abo aus," Bitkom, 2022. [Online]. Available: https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Abonnenten-geben-knapp-30-Euro-pro-Jahr-fuer-Virenschutz-aus. [Zugriff am 05 07 2023].

[23] G. Kumar, K. Kumar und M. Sachdeva, „The use of artificial intelligence based techniques for intrusion detection: a review," *Artificial Intelligence Review,* 2010.

[24] Y. Wang, X. Du, Z. Lu, Q. Duan und J. Wu, „Improved LSTM-Based Time-Series Anomaly Detection in Rail Transit Operation Environments," *IEEE Transactions on Industrial Informatics,* pp. 9027-9036, 20222.

[25] R. Trifonov, O. Nakov und V. Mladenov, „Artificial Intelligence in Cyber Threats Intelligence," *2018 International Conference on Intelligent and Innovative Computing Applications (ICONIC),* pp. 1-4, 2018.

[26] G. Apruzzese, P. Laskov, E. Montes de Oca, W. Mallouli, L. Brdalo Rapa, A. V. Grammatopoulos und F. Di Franco, „The Role of Machine Learning in Cybersecurity," *Digital Threats,* 2023.

[27] M. Almukaynizi, E. Nunes, K. Dharaiya, M. Senguttuvan, J. Shakarian und P. Shakarian, „Proactive identification of exploits in the wild through vulnerability mentions online," *2017 International Conference on Cyber Conflict (CyCon U.S.),* pp. 82-88, 2017.

[28] Thales, „How drones will change the future of railways," 2019. [Online]. Available: https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/transport/magazine/how-drones-will-change-future-railways. [Zugriff am 06 11 2023].

[29] TÜV-Verband e.V., „Sicherheit und Künstliche Intelligenz - Erwartungen, Hoffnungen, Risiken," *Repräsentative Befragung der Bevölkerung in Deutschland im Auftrag des TÜV-Verbands,* 2021.

[30] Deutsches Institut für Normung, *Deutsche Normungsroadmap Künstliche Intelligenz (Ausgabe 2),* 2022.

Autoren

Hilgefort, Jan Malte, M.Sc.

Jan Malte Hilgefort hat Wirtschaftsinformatik an der Technischen Universität Braunschweig studiert und ist seitdem als Cyber Security Engineer bei der ESE Engineering und Software-Entwicklung GmbH tätig.

Prof. Dr.-Ing. habil. Schnieder, Lars

Lars Schnieder hat sein Studium zum Dipl. Wirtsch.-Ing. an der Technischen Universität Braunschweig abgeschlossen. Parallel zu seiner beruflichen Tätigkeit in der Bahnindustrie promovierte er an der Technischen Universität Braunschweig. Neben seiner Tätigkeit als Geschäftsführer der ESE Engineering und Software-Entwicklung GmbH lehrt er als Privatdozent an der RWTH Aachen und ist an der Technischen Universität Braunschweig zum Honorarprofessor bestellt.

IRSA 2023

SESSION 2

AUTOMATISIERUNG
AUTOMATION

Session 2
Manfred Enning, Rudolf Hilgers

Die Assistierte Bremsprobe als Brücke zur Vollautomatisierung des Schienengüterverkehrs

Enning, Manfred[1] und Hilgers, Rudolf[2]

[1]Fachhochschule Aachen

[2]Funktionaler Gutachter und Eisenbahnbetriebsleiter

3. August 2023

1 The Big Picture - Güterbahn der Zukunft

„Der Lkw ist in Hannover, da ist der Güterzug noch bei der Bremsprobe“ kann man von Logistikerinnen[1] im Hamburger Hafen hören, wenn man sie nach Performance des Schienengüterverkehrs fragt. Dabei hat die Eisenbahn systembedingte Vorteile

- Geringer spezifischer Energieverbrauch
- Effiziente Verwendung nachhaltiger Energie durch Elektrifizierung
- Enorme Personaleffizienz durch hochgradige Automatisierbarkeit

Sie wird im Kontext des Klima- und des demografischen Wandels im Personen- wie Güterverkehr der Zukunft eine dominante Rolle einnehmen. Insbesondere im Güterverkehr ist die Transformation zu einem System, das seine Vorteile wirklich ausspielen kann, eine Herkulesaufgabe. Hier wird die Leistung am stärksten durch Kupplungsvorgänge und

[1]in diesem Beitrag wird wann immer möglich und sinnvoll die weibliche Form von Berufsbezeichnungen verwendet. Mit der weiblichen und der männlichen Form sind Beschäftigte jedweden Geschlechts gemeint. Auf weitere gendergerechte Schreibweisen wird im Sinne der Lesbarkeit verzichtet.

durch zeitaufwändige aber notwendige Sicherheitsüberprüfungen beeinträchtigt. Beides ist Handarbeit und mit Rundgängen um Züge verbunden, was auch die Personalgewinnung massiv erschwert.

(Digitale) Automatische Kupplung

Veränderung ist aber in Sicht. Ausgehend von einer deutschen Sektorinitiative des Technischen Innovationskreises Schienengüterverkehr [1], dem Deutschen Verkehrsministerium [2] und Anstrengungen der „bahnsinnigen“ Schweizer [3] hat sich das zarte Pflänzchen Automatikkupplung als „Digitale Automatische Kupplung“ (DAK, Abbildung 1) fast bis zur Serienreife weiterentwickelt und eine Einführung wird auf der europäischen Ebene - aktuell im Flagship Project 5 von „Europe’s Rail Joint Undertaking“ [4] - mit viel Energie aber auch Geld vorangetrieben.

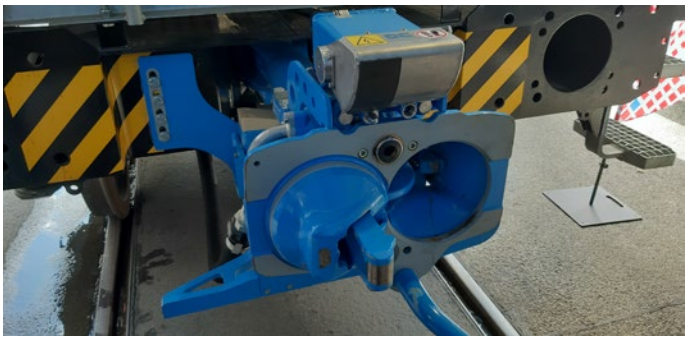


Abbildung 1: Digitale Automatische Kupplung (Dellner)

Das automatische Kuppeln wird den mechanischen Prozess der Bildung von Güterzügen erheblich beschleunigen und die Arbeitsplätze der Rangierer attraktiver machen. Ohne eine weitergehende Digitalisierung aller Prozesse bleibt die Bahn in der Konkurrenz zum Straßengüterverkehr aber abgeschlagen. Deshalb beinhaltet das „D“ in der Bezeichnung DAK zum Einen eine neuartige IT- und Energie-Infrastruktur im Güterzug und zum Anderen ein großes Paket an mehr oder weniger konkret ausformulierten digitalen Diensten. Mit Blick auf den Zugbetrieb sind „Schlüsselapplikationen“ mit der stärksten Wirkung auf die Produktivität:

- Automatische Sicherheitsüberprüfungen von Fahrzeug und Ladung
- Fahrzeuggestützte Prüfung der Zugintegrität (als Voraussetzung für ETCS Level 3)
- Digitalisierung der Luftbremse (Gleitschutz, ep-Vorsteuerung)
- Ferngesteuertes Entkuppeln (zur Rationalisierung v.a. der Zugbildung)

Automatische Bremsprobe

Wie bei Personenzügen schon seit Jahrzehnten normal, soll auch der Güterzug der Zukunft ohne umfassende visuelle Inspektion des Bremssystems seine Fahrt antreten können. Dies macht den Bahntransport schneller und vor allem preiswerter. Es zeichnet sich ab, dass insbesondere die Bahnen, die zum Einen (noch) Güterverkehr als „Einzelwagenverkehr“ in der Fläche anbieten und zum Anderen trotz eines hohen Lohnniveaus Personalprobleme haben, auf die Einführung der DAK nicht warten wollen oder können.

Im Rahmen ihres Projekts „Ein-Personen-Betrieb“ erprobt die Schweizer SBB bereits seit 2017 ein System zur Automatischen Bremsprobe, das gemeinsam mit dem österreichischen Herstellers PJM [5] entwickelt wurde und unmittelbar vor der Zulassung steht. Es ist unabhängig von der Automatischen Kupplung und basiert auf einer autarken Stromversorgung mit Achsdeckelgenerator und einer sternförmigen Kommunikation zwischen jedem Wagen und einem Zentralgerät auf der Grundlage von LoRa-Funk. Unter der Bezeichnung „Controlguide CTmobile Brake Monitoring System“ [6] bietet Siemens ebenfalls ein System zur Automatischen Bremsprobe an. Auch hier wird ein lokales Funksystem zur sternförmigen Übertragung der Zustandsinformationen jeden Wagens zu einer Zentraleinheit genutzt, welche der Nutzer mit einem Mobilgerät kontaktiert.

Von den Protagonistinnen der DAK-unabhängigen Automatischen Bremsprobe wird betont, dass die Entwicklungen voll kompatibel zur DAK sind, u.A. weil eine intensive Zusammenarbeit im Rahmen des Flagship Projekts besteht. Nach der Einführung der DAK wird man Steuerungen und Sensorik in die DAK-Welt migrieren. Die für die Bremsprobe neu geschaffenen Güterzug-„Infrastruktur“-Komponenten

- Stromversorgung (z.B. Achsdeckelgenerator)
- Kommunikationssystem (z.B. LoRa-Funksystem)

können ggf. durch entsprechende Funktionen der DAK substituiert werden. Oder auch nicht? Nach heutigem Stand ist weder gesichert, dass die DAK eingeführt wird noch nach welchem Zeitplan dies erfolgen wird. Sicher ist nur, dass die Einführung der DAK nicht durch den Sektor alleine geleistet werden kann, sondern vor dem Hintergrund des dramatischen Klimawandels eine gesellschaftliche Aufgabe ist (z.B. [7]), deren Priorität auf Europäischer Ebene entschieden wird. Der Weg zum Konsens scheint derzeit noch weit. Es macht daher durchaus Sinn, für die Automatische Bremsprobe eine Brückentechnologie zu entwickeln. Auch wenn es am Ende doch schneller geht, so zeigt die Erfahrung,

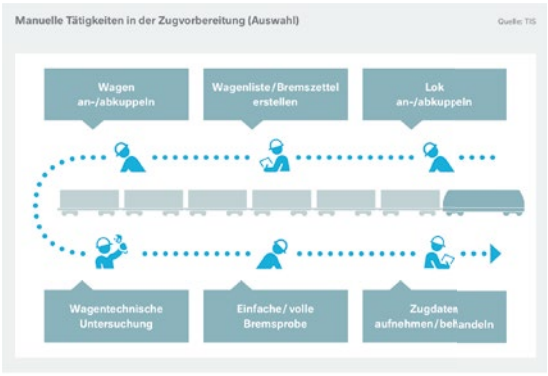


Abbildung 2: Zugvorbereitung

Abbildung 3: Wagenmeister im Einsatz

dass es gute Gründe gibt, ein resilientes System mit einer Koexistenz mehrerer Lösungen zu schaffen. Ein Fehler einer einzelnen Kupplungskomponente zwingt dann nicht zum Rückfall in veraltete Betriebsverfahren, für die weiter Personal vorgehalten werden muss.

2 Grundprinzipien der Assistierten Bremsprobe

Mit der „Assistierten Bremsprobe“ (im Folgenden oft als „AssBP“ abgekürzt) wird von den Autoren eine alternative Form der Bremsprobe vorgeschlagen, die grundsätzlich denselben Ansatz verfolgt wie die SBB-Bremsprobe, nämlich den Zeitraum zur Einführung der DAK zu überbrücken. Das geschieht aber mit einem anderen Anspruch bezüglich des Automatisierungsgrads und in der Folge mit deutlich geringeren Kosten. Die Reduzierung des Aufwands bei der AssBP beruht auf den folgenden drei Denkansätzen:

1. Optimierte Nutzung der Ressource „Mensch“
2. Verzicht auf die Prüfung statischer Zustände
3. Reduzierung der Messtechnik auf ein Minimum

Optimierte Nutzung der Ressource „Mensch“

Die Automatische Bremsprobe verfolgt den Anspruch, auf Rundgänge um den Zug vollständig verzichten zu können. Mit entsprechend hohem Aufwand bei der Sensorik, der Signalverarbeitung und der Kommunikation ist dieses Ziel erreichbar, wie PJM und SBB mit dem Bremsprobensystem gezeigt haben. Aber sind damit wirklich **alle** Rundgänge um den Zug eliminiert? Die Antwort ist „Nein“, wie die Prozessübersicht (Abb. 2) bei

der Zugvorbereitung zeigt. Auch die „Wagentechnische Untersuchung“[2] (WTU) ist mit einem Rundgang und einer visuellen Inspektion (Abb. 3) aller Wagen verbunden.

Selbstverständlich steht auch die WTU auf der Automatisierungs-Agenda [4]. Allerdings muss aus heutiger Sicht festgestellt werden, dass die Aufgaben so vielfältig sind, dass ein Ersatz nur durch eine wagengestützte Sensorik nicht realistisch erscheint. In Verbindung mit einem flächendeckenden auf Künstlicher Intelligenz basierenden Wayside Train Monitoring erscheint es technisch möglich. Bis dahin sind aber noch so viele Voraussetzungen zu erfüllen, dass man vielleicht ab Mitte der 30er Jahre auf Inspektionsrundgänge verzichten kann.

Eine Kernidee bei der Assistierten Bremsprobe ist, Arbeitsschritte geschickter aufzuteilen. Alle **statischen** Prüfungen – hierzu gehört die Sichtprüfung des mechanischen Teilsystems der Bremsen aber auch die Prüfung des Gelöstzustandes[3] – übernehmen **Wagenprüfer** bei einem Rundgang um den Zug im Rahmen der WTU. **Dynamische** Prüfungen – insbesondere das Anlegen und Lösen der Bremsen zur Funktionsprüfung – erfolgt ausschließlich **sensorgestützt**. Heute notwendige „Zustandsgänge“ durch die Triebfahrzeugführerin (Tf) entfallen. Weil bereits zum heutigen Spektrum der Aufgaben bei der WTU unter Anderem

- Prüfung/Abgleich der Zugreihung
- Überprüfung des Kupplungsstatus (Mechanisch, Luft, Luftabsperrhähne)
- Einstellung/Überprüfung der Bremseinstellung (G/P, Beladen/Entladen)
- Überprüfung der Festlegung mit Hemmschuhen oder Handbremsen

gehören, darf für die folgenden Prozessschritte von einem ordnungsgemäß gekuppelt und geschlauchtem Wagenverband und vom Vorliegen einer validierten Wagenliste ausgegangen werden. Neue Aufgaben, die aus der Bremsprobe vorgezogen werden, sind:

- Prüfung des Gelöstzustands aller Bremsen
- Anbringen der Zugschlusstafel (ggf. an beiden Zugenden)

Nach Anlage A der Sicherheitsrichtline Fahrzeug (SIRF, [8]) gilt für die Funktion „K-10 Automatische Bremsprobe“ die Sicherheitsanforderungsstufe SAS=2. Die Assistierte Bremsprobe trifft keine Entscheidungen über die Sicherheit des Zuges; es werden lediglich Druckveränderungen im Bremssystem als Antwort auf Änderungen der Druckvorgabe

[2] im DB- und VDV-Regelwerk ist dies die „Technische Wagenbehandlung“.
[3] im Folgenden wird davon ausgegangen, dass der gebildete Zug mit gelöster Luftbremse abgestellt ist.

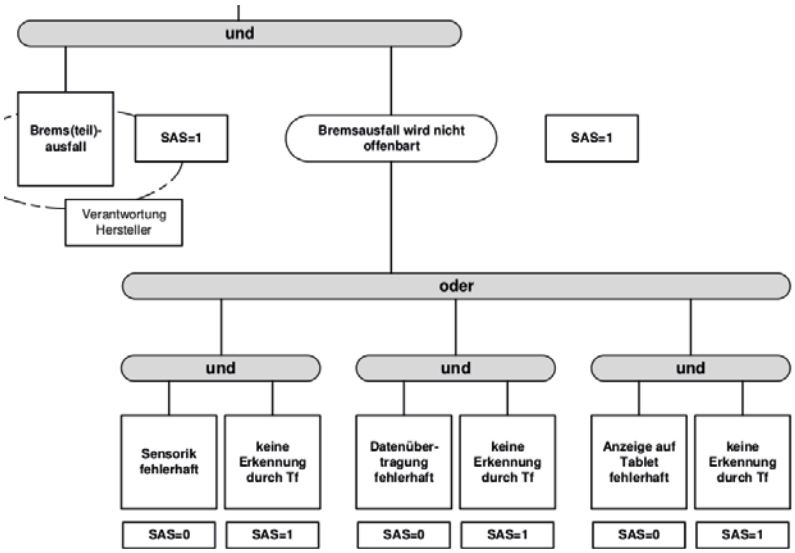


Abbildung 4: Auszug aus dem Gefährdungsbaum der Assistierten Bremsprobe. Modifizierte Version der TeSiP-Funktion K 10 (Anhang zu [8])

am Bremssteller[4] angezeigt. Deshalb kann die Teilgefährdung „Bremsausfall wird nicht offenbart“ (SAS=1) bei der AssBP durch eine Aufteilung auf ein technisches System mit SAS=0 und eine Überwachungsfunktion durch den Menschen (SAS=1, siehe Abbildung 4) beherrscht werden [5]. Die Bewertung der Überwachungsfunktion durch den Menschen mit SAS=1 ist zulässig, denn

1. Die Bremsprobe findet im Stand statt, die Tf hat gleichzeitig keine anderen Aufgaben und somit die volle Konzentration auf die Durchführung der Bremsprobe.
2. Durch eine sehr übersichtliche Darstellung der HL- und Bremsdrücke aller Wagen (siehe Kapitel 3) können Fehler leicht erkannt werden.

Verzicht auf die Prüfung statischer Zustände

Damit ein Mensch in der Lage ist, die Funktion des technischen Teilsystems zu validieren, muss die Informationskette vom Sensor bis zur Anzeige jederzeit auf Plausibilität geprüft werden können. Der einfachste Weg hierzu ist, nur auf **Veränderungen** zu prüfen, die

[4] Als „Bremssteller“ wird hier jede technische Einrichtung bezeichnet, die einen HL-Druck für den Zug/ die Wagengruppe vorgibt. Dies kann ein klassisches Führerbremsventil, die elektronische Bremssteuerung oder eine stationäre Bremsprobeneinrichtung sein.

[5] Diese These hat zu Diskussionen zwischen Eisenbahn-Sicherheitsexperten geführt, zuletzt auf der Tagung Safe.Tech 2023 in München. Von den in Deutschland zugelassenen „Funktionalen Gutachtern“, von denen einer hier Mitautor ist, hat aber bereits mehr als die Hälfte die Einschätzung der Aufteilung Technik (SAS=0)/ Mensch (SAS=1) bestätigt.

durch bewusste Handlungen hervorgerufen werden. Eine nicht erwartungsgemäße Reaktion ist ein Bremsfehler oder ein Fehler der AssBP, der als „fail-safe“-Maßnahme eine Prüfung am Wagen erforderlich macht (Intrinsische Fehleroffenbarung).

Die Konsequenz ist, dass man nur Bremskomponenten prüfen kann, die aktiv gesteuert/ beeinflusst werden können. Handbetätigte Umstellhebel, Handbremsen und auch Luftabsperrhähne (LAH) scheiden daher für die AssBP aus. Durch eine Veränderung des Drucks am Bremssteller p_{FBrV} werden prüfbare Reaktionen in den Komponenten

- Steuerventil/ Relaisventil (HL- und R-Behälter-Druck, $p_{HL}, p_R, \dots$)
- Bremszylinder (Zylinderdruck, p_C)
- Bremsgestänge (Kraft / Position)
- Bremsklötze (Kraft / Position)

aller Wagen hervorgerufen, die messtechnisch erfasst und angezeigt werden können.

Reduzierung der Messtechnik auf ein Minimum

Wenn die Luftkupplungen aller Wagen korrekt miteinander verbunden sind, alle LAH zwischen den Wagen geöffnet sind und der LAH am Zugschluss geschlossen ist, stellt sich in der Hauptluftleitung jedes Wagens nach einem kurzen Ausgleichsvorgang derselbe Druck p_{HL} ein, der am Ausgang des Bremsstellers vorliegt. Mittels HL-Druckmessungen in jedem Wagen und einer zentralen Anzeige kann mit einem Blick die Durchgängigkeit und der korrekte Abschluss der HL validiert werden.

Das Beobachten, ob Bremsklötze anliegen, ist eine „rustikale“, indirekte Methode um auf das korrekte Aktivieren der Bremse bei Absenkung des HL-Drucks zu schließen. Ob sich der richtige Bremsdruck und die richtige Bremskraft einstellt, kann nicht beurteilt werden. Eine Messung des Bremszylinderdrucks p_C erlaubt dagegen die Überprüfung, ob der funktionale Zusammenhang zwischen dem Druck in der Hauptluftleitung und dem Zylinderdruck $p_C = f(p_{HL})$ (Abbildung 5) den Spezifikationen der jeweiligen Wagenbauart entspricht. Konkret kann festgestellt werden

- ob das Steuerventil richtig reagiert und der Druck im Reservebehälter ausreichend hoch ist ($p_C = p_{C,max}$ bei $p_{HL} \leq 3.5\,\mathrm{bar}$) oder
- ob die Bremse abgeschaltet (isoliert) ist ($p_C = 0\,\mathrm{bar}$ bei $p_{HL} << 5\,\mathrm{bar}$).

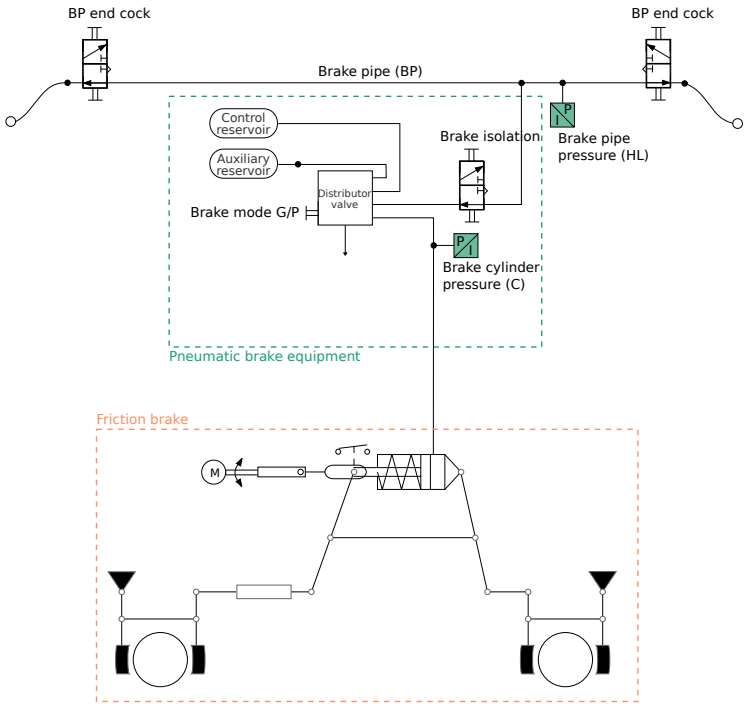


Abbildung 5: Prinzipbild der Güterwagenbremse mit Druckmesstellen für AssBP

Damit bietet eine auf Druckmessungen beruhende Bewertung gegenüber dem bisherigen indirekten Verfahren einen erheblichen Mehrwert. Es können alle Fehler des **Bremssystems des Zugs** aufgedeckt werden. Die Prüfung der Integrität der mechanischen Wirkkette zwischen C-Druck und Bremskraft an den Bremsklötzen ist bei der AssBP Teil der vorgelagerten WTU. Insbesondere kann durch die Prüfung des Gelöstzustandes der kritische Fall eines blockierenden Radsatzes ausgeschlossen werden.

Genauso wenig wie bei der heutigen manuellen Bremsprobe kann nicht vollständig ausgeschlossen werden, dass eine Bremse trotz eines korrekten Zylinderdrucks nicht genügend Bremskraft aufbaut. Ein einzelner nicht bremsender Radsatz stellt aber für die Sicherheit des Zugs keine relevante Gefährdung dar. Mit dieser Argumentation kann der „Nachweis gleicher Sicherheit“ ohne aufwändige Kraft-/ Positionsmesstechnik geführt werden.

Im Rahmen einer Bachelorarbeit sind an der FH Aachen 632 Untersuchungsberichte von Güterzugunfällen aus der EU, dem Vereinigten Königreich und den USA ausgewertet worden . Hiervon hatten nur 11 einen Bezug zum Bremssystem. Eine detaillierte Auswertung [9] ergab, dass Fehlhandlungen beim Festlegen mit Hemmschuhen und vor Allem nicht durchgängige Hauptluftleitungen trotz korrekt durchgeführter Bremsprobe zu den schwersten Unfällen geführt haben. Durch die vollständige Überwachung der HL könnte das bei Nutzung der AssBP nicht passieren können.

3 Implementierung

Systemarchitektur

Die Assistierte Bremsprobe erfordert die Realisierung der folgenden Grundfunktionen:

1. Messung von HL- und Bremszylinderdruck
2. Übertragung der Messungen aller Wagen eines Zugs in einen Datenpool
3. Generierung einer übersichtlichen zusammenfassenden Darstellung
4. Anzeige für die Tf

Für die Messung (Position 1) kommen industrieübliche und bahntaugliche Drucksensoren in Betracht. Sie stellen das Messsignal analog oder digital zur Verfügung und sind preiswert und robust. Einmal eingebaut (der Einbau ist die einzige Veränderung am Wagen) erfordern sie im Gegensatz zu Kraft- oder Positionssensorik keinerlei Wartung oder Justage. Wie alle elektronischen Geräte benötigen sie aber eine Stromversorgung. Im Bahnbetrieb sind Tablet-Computer schon weit verbreitet, so dass es für die Anzeige (Position 4) Sinn macht, die AssBP als Web-Anwendung im Standardbrowser anzubieten bzw. eine eigenständige Android- oder iOS-App zu entwickeln.

Für die Positionen 2 (Übertragung) und 3 (Generierung der Anzeige) ist die Systemarchitektur der „Automatischen Bremsprobe“ von Siemens und PJM grundsätzlich sehr gut geeignet. Einsparpotenziale bieten sich vor Allem bei der Hardware (SAS=0). Im Folgenden werden zusätzlich zwei Basisarchitekturen auf Eignung für die AssBP untersucht, die beide den Vorteil aufweisen, ohne zusätzliches Gerät auszukommen. Im einen Fall (Güterwagen 4.0 - Architektur) kann jeder Wagen die Funktion der Bremsprobenzentraleinheit übernehmen, im anderen Fall (Telematik-Architektur) ist diese Funktion in die Cloud ausgelagert.

Güterwagen 4.0 Architektur

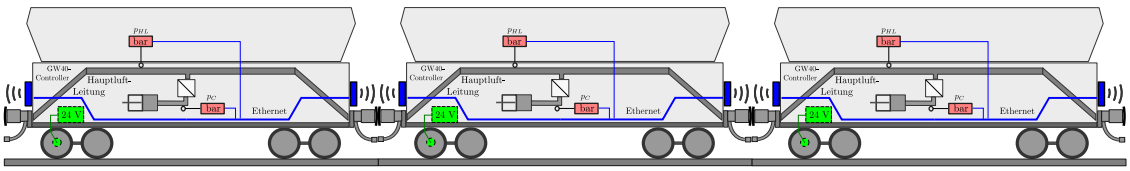


Abbildung 6: AssBP auf Güterwagen 4.0-Plattform

Unter der „Marke“ **Güterwagen 4.0** (Abbildung 6) wird an von der FH Aachen gemeinsam mit Industriepartnern schon lange am Konzept der vernetzten Güterwagen im

„Internet der Dinge“ (IoT) gearbeitet [10]. Die Grundarchitektur besteht aus „GW40-Controllern“ an den Wagenenden, die innerhalb des Wagens per Ethernet verbunden sind und zwischen den Wagenenden Funk (z.B. DirectWifi) nutzen. Im Güterwagen 4.0 Konzept ist Aktorik vorgesehen, um alle Prozesse der Zugbildung aktiv zu unterstützen.

Aufwandsvermeidung durch intrinsische Fehleroffenbarung[6] ist auch das Paradigma bei Güterwagen 4.0, so dass sich die Plattform ideal für die AssBP eignet. Der Wagen verfügt über ein akkugestütztes 24 V Bordnetz (VDI 5905, [11]), das durch Achsdeckelgeneratoren bzw. perspektivisch über die DAK aufgeladen wird. Jeder Wagen besitzt in einem der GW40-Controller eine lokale Datenbank mit der „Digitalen Identität“.

Wenn sich zwei oder mehr Wagen auf einem Gleis hinreichend nahe kommen, vernetzen sie sich spontan und ohne Hilfe einer zentralen Instanz. Die Digitalen Identitäten der Wagen verbinden sich zur „Digitalen Identität der Wagengruppe“, auf der Softwarefunktionen wie die Assistierte Bremsprobe unter dem „Güterwagenbetriebssystem WagonOS“ ablaufen. Jeder GW40-Controller ist außerdem ein Wifi-Accesspoint, so dass die AssBP von jedem Ort in der unmittelbaren Umgebung des Zugs genutzt werden kann.

Telematik-Architektur

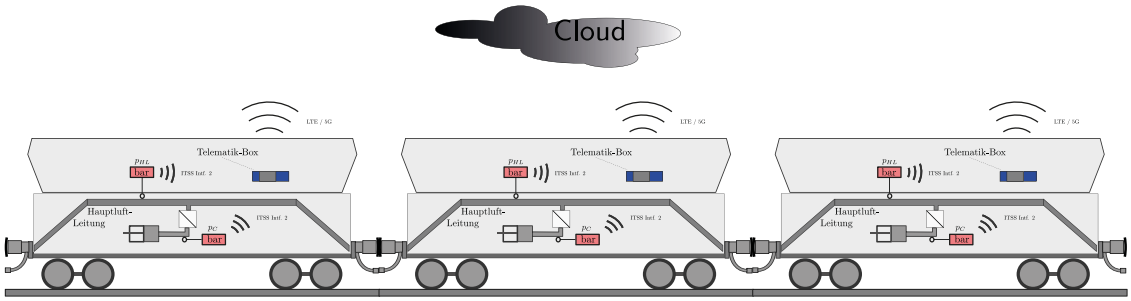


Abbildung 7: AssBP als Applikation eines Telematiksystems

Den Gegenpol bildet eine Architektur, die als Güterwagen-Telematik schon im Einsatz ist. Hier gibt es keine lokale Vernetzungsebene. Jeder Controller („Telematik-Box“) beinhaltet mindestens einen GNSS[7]-Empfänger und ist Teilnehmer im Mobilfunknetz (Abbildung 7). Für die AssBP müssen zwei Drucksensoren angebracht und mit der Telematik-Box verbunden werden. Grundsätzlich sind hierfür kabelgebundene Lösungen möglich; die Entwicklung geht aber in Richtung eines Funk-Sensornetzwerks.

[6] es werden auch hier nur Reaktionen zurückgemeldet, die aktiv – in diesem Fall durch die Aktoren – durch den Benutzer hervorgerufen werden.
[7] GNSS: Global Navigation Satellite Systems. Sammelbegriff für GPS, GALILEO und einige mehr.

Vor über 5 Jahren hat die „Industrieplattform für Telematik und Sensorik im Schienengüterverkehr“ (ITSS) die erste Version einer Spezifikation für ein funkbasiertes Sensornetz für Güterwagen veröffentlicht. Moderne Telematik-Boxen sind häufig „ITSS Interface 2 Ready“, d.h. sie verfügen entweder über eine IEEE 802.15.4 oder eine Bluetooth-Low-Energy-Schnittstelle [12] und werden darüber zukünftig Signale von im Wagen verteilten Sensoren über eine Funkschnittstelle empfangen können.

Bis heute ist die Funktionalität im Wesentlichen auf Tracking und Tracing auf einer Webplattform beschränkt. Für diese Zwecke genügt eine vergleichsweise niederfrequente Übermittlung, z.B. alle 6 Minuten. Dadurch und durch ein extrem energiesparendes Design ist der Stromverbrauch so gering, dass sie aus einer Dauer-Batterie oder einem Akkumulator, der mittels Solarzellen nachgeladen wird, gespeist werden können. Wenn die Speisung durch Batterien beibehalten werden soll, muss die Zusatzlast durch die AssBP minimal sein. Das Zusammenführen und Aufbereiten zur Anzeige geschieht in dieser Lösung mittels Cloudcomputing.

Benutzerschnittstelle

Aus nahe liegenden Gründen wurde eine Prototyp-Implementierung der AssBP zunächst auf WagonOS in Verbindung mit einer einfachen Güterzugsimulation vorgenommen. Der Ablauf einer AssBP gestaltet sich wie folgt:

1. **Vorgelagert**: Mit der WTU werden die Wagenreihung, die Bremseinstellungen der Wagen, korrekte Kuppelzustände, verkehrssicherer Zustand aller Wagen sowie der Gelöstzustand aller Bremsen bestätigt.
2. **Lösen**: Die Wagengruppe wird „an Luft genommen“ und der Bremssteller auf $p_{FBrV} = 5\,\mathrm{bar}$ (Querstrich in der Skala) eingestellt. In der AssBP-Anzeige muss sich die Darstellung gemäß Abbildung 8 einstellen. Hier ist Folgendes zu prüfen:
   - Entsprechen die von den Wagen an die AssBP übermittelten Wagennummern der Wagenliste?
   - Gilt für jeden Wagen: $p_{HL} = 5\,\mathrm{bar}$ und $p_C = 0\,\mathrm{bar}$?
3. **Anlegen**: Der Bremssteller wird auf „Vollbremsung“ $p_{FBrV} = 3.5\,\mathrm{bar}$ eingestellt. Nach angemessener Wartezeit sollte sich eine Darstellung entsprechend Abbildung 9 einstellen, im der zu prüfen ist:
   - Sind die HL-Drücke in allen Wagen auf $p_{HL} = 3.5\,\mathrm{bar}$ gesunken?

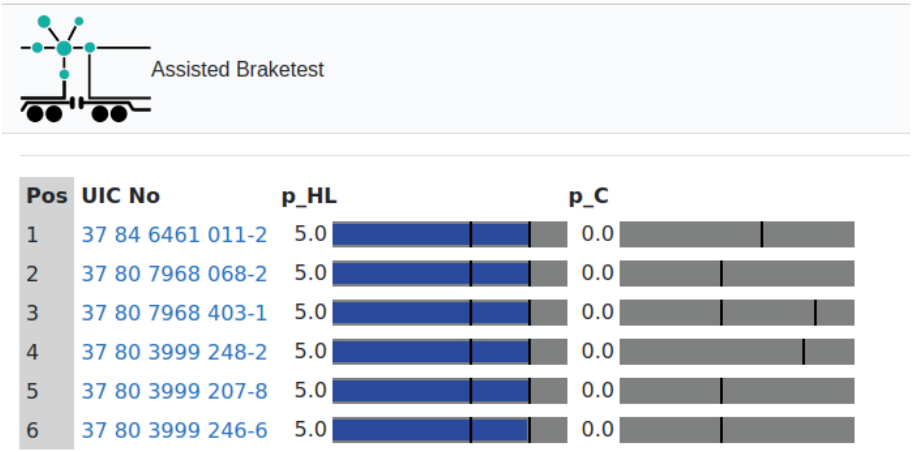


Abbildung 8: Gelöstzustand

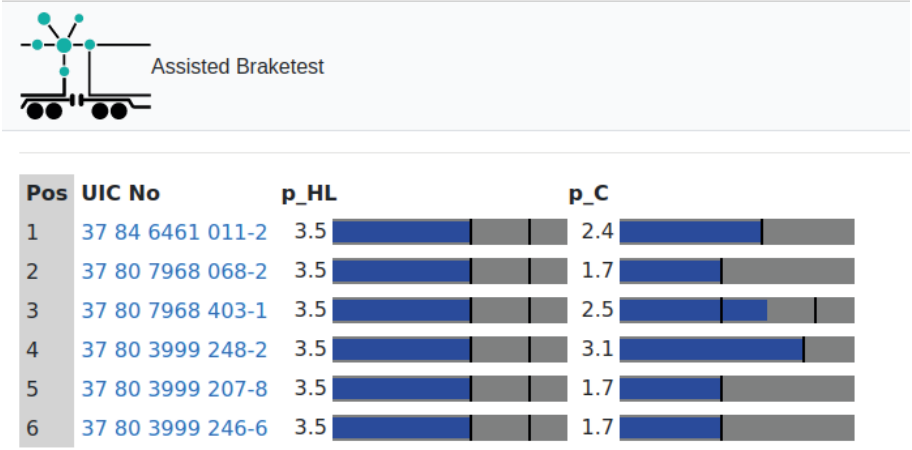


Abbildung 9: Angelegtzustand

- Befindet sich der Zylinder-Druck jedes Wagens auf einem plausiblen Maximalwert $p_C = p_{C,max}$ [8]?

Anmerkung: Jede Druckanzeige hat sich geändert (Intrinsische Fehleroffenbarung)

4. **Lösen**: Nach Einstellung des Bremsstellers auf „Lösen“ wird der Ausgangszustand erneut überprüft.
5. **Dichtigkeitsprüfung**: Absperrung des Bremsstellers. Prüfen: Druckverlust im zugelassenen Rahmen gemäß Bremsprobenvorschrift?

[8] „Plausible Maximalwerte“ sind bauartabhängige Größen und u.U. mehrdeutig. Beispiel: Ein Wagen mit Lastumschaltung mittels Relaisventil hat zwei verschiedene Werte von $p_{C,max}$. Beide werden durch Querstriche auf der Skala angezeigt. Einer der beiden Werte muss erreicht werden.

Signifikanzbewertung

Als Voraussetzung zur Einführung neuer Techniken oder Verfahren sind die potenziellen Auswirkungen der Änderung auf die Sicherheit des Eisenbahnsystems zu prüfen. Mit seinem Erfahrungshintergrund als Funktionaler Gutachter hat einer der Autoren die Signifikanzbewertung mit dem folgenden Ergebnis vorgenommen:

Auf den **technischen** Teil der AssBP trifft keines der Signifikanzkriterien der CSM-Verordnung [13] zu. Ein Sicherheitsnachweises ist daher unnötig.

Die **Verfahrensänderung** bei der Einführung der Assistierten Bremsprobe weist bezüglich „Innovativer Elemente“ hingegen Aspekte auf, die durch entsprechende Anweisungen und Schulungen im Rahmen des Sicherheitsmanagementsystems des Betreibers einfach beherrscht werden können.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Mir der „Assistierten Bremsprobe“ wird eine Möglichkeit vorgestellt, mit einem kurzen zeitlichen Horizont und sehr preiswert einen heutigen Wettbewerbsnachteil des Schienengüterverkehrs deutlich zu verringern. Trotzdem hält sich das Interesse an der AssBT und auch an der Güterwagen 4.0 Idee noch in Grenzen. Im Folgenden wird auf einige der häufig gehörten Kritikpunkte eingegangen:

Technisch

Die Wifi-Funkübertragung zwischen GW40-Controllern ist negativ konnotiert, u.A. weil sie sich im Versuchsbetrieb der Pilotzüge im Projekt „DAK-Demonstrator“ [2] als unbrauchbar erwiesen hat. Für die AssBT (und auch im Einstiegsszenario Güterwagen 4.0) muss das Funknetz aber nur am stehenden Zug funktionieren. Probleme mit statischen Funkstrecken auf Sichtlinien gelten generell als gut beherrschbar.

Für die AssBT geeignete Drucksensoren mit Speisung durch ein 24 V-Bordnetz sind am Markt weit verbreitet. Leider ist in der Industrieautomatisierung der Energieverbrauch ein untergeordnetes Kriterium, so dass eine Speisung von Steuerungen und Sensoren aus Dauerbatterien kaum praktikabel sein wird. Der Achsdeckelgenerator als nahe liegende Lösung ist aber in weiten Teilen des Sektors ein „No-Go“. Er gilt (möglicherweise zu Unrecht?) als unzuverlässig und passt nicht gut in das heutige System der betrieblichen

Güterwagenwartung[9] im Rahmen des Allgemeinen Verwendungsvertrags [14], bei der ein Austausch eines Radsatzes irgendwo in Europa eine Standardprozedur ist.

Für die Telematik-Architektur fehlen geeignete Sensoren. Zwar ist Druck als Profil Bestandteil der Spezifikation des ITSS Interface 2 [12]. Nur gibt es bis heute keinen Markt für kompatible Sensoren am Güterwagen und über Betriebserfahrungen ist wenig bekannt. Außerdem muss die Frage beantwortet werden, woher die Energie für den Betrieb kommen soll. Die Entwicklung autark durch Energy-Harvesting gespeister Drucksensoren, die situationsabhängig Botschaften versenden, könnte ein Lösungsansatz sein.

Demografisch

Der wesentliche Unterschied zwischen der „Assistierten" und der „Automatischen" Bremsprobe ist, dass bei ersterer unterstellt wird, dass weiterhin der Wagenprüfer mit seiner Expertise in den Prozess integriert wird. Das wirkt auf den ersten Blick vor dem Hintergrund des demografischen Wandels rückständig, setzt aber schon kurzfristig ein hohes Potential zur Personaleinsparung frei.

Wirtschaftlich

Auch im Schienenverkehr gibt es eine „Zeitenwende" sowohl im Großen, als auch heruntergebrochen auf den Schienengüterverkehr. Galt dort 150 Jahre lang die Devise „Der Güterwagen darf nichts kosten", hat sich das heute geändert in „Der Güterwagen darf was kosten, wir (der Sektor) können es aber nicht zahlen". Es gibt kein betriebswirtschaftliches Geschäftsmodell für den SGV, das soviel Geld abwirft, dass es die Migration zu einem modernen System übersteht. Das liegt vor allem daran, dass eine „Systeminnovation" in den SGV erst dann vollen Nutzen bringen kann, wenn ausreichend viele Wagen den neuen Ausrüstungsstand erreicht haben.

Je tiefer eine Innovation in bestehende Strukturen eingreift, um so dringender sind Fragen der Standardisierung. Bei der DAK, die den Wagen inkompatibel zum bestehenden System macht, ist jedem klar, dass erst die TSI geändert wird, bevor die Einführung beginnen kann. Aber auch die Automatische Bremsprobe greift recht tief in das bestehende System ein und wird dann richtig Nutzen bringen, wenn sie in einem ausreichend großen Teil der Güterwagenflotte in genormter Weise implementiert wird.

Eine Normierung der Assistierten Bremsprobe wird nicht kurzfristig gelingen, erscheint aber zunächst nicht notwendig, weil nicht in bestehende Strukturen eingegriffen wird. Ein

[9] dieselbe Frage stellt sich auch bei der Automatischen Bremsprobe

für AssBP ausgerüsteter Güterwagen fällt im Betrieb nicht auf und ist nicht wesentlich teurer. Wenn er bei einzelnen Verkehren (etwa im Chemiebereich oder im Kombinierten Verkehr) Nutzen bringt, kann sich die geringe Investition schnell amortisieren. Dabei steht die AssBP der weiteren Entwicklung (DAK und/ oder Automatische Bremsprobe) nicht im Weg. Auch nach Einführung der DAK könnte die Weiternutzung der AssBP aber eine wirtschaftlich interessante Option darstellen.

Fazit

Durch die geschickte Aufteilung der Sicherheitsanforderungsstufe auf technischen Teil (SAS=0) und Überwachung/ Bewertung durch den Menschen (SAS=1) kann schnell ein preiswertes, technisch unterstütztes Bremsprobenverfahren realisiert werden. Es handelt sich um eine rückwirkungsfreie Lösung, um zunächst in speziellen Anwendungen Zeit und Kosten zu sparen. Die Autoren des Beitrags stehen gerne für weitere Diskussionen und Beiträge zur Realisierung bereit.

Literatur

[1] *Technischer Innovationskreis Schienengüterverkehr (TIS)*. URL: https://tis.ag/.

[2] Bundesministerium für Digitales und Verkehr. *BMDV-Forschungsprojekt „DAK-Demonstrator“ - Abschluss der Projektphase II: Betriebserprobung in Deutschland und Europa*. URL: https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/E/dak-demonstrator-phase-2.html.

[3] Bundesamt für Verkehr. *Automation im Schienengüterverkehr: Projekt „Optimierung letzte Meile/Zugbildung“*. URL: https://www.bav.admin.ch/bav/de/home/verkehrsmittel/eisenbahn/gueterverkehr.html.

[4] Europe’s Rail. *Flagship Project 5: TRANS4M-R - Transforming Europe’s Rail Freight*. URL: https://projects.rail-research.europa.eu/eurail-fp5/.

[5] *PJM Waggontracker - Automatische Bremsprobe*. URL: https://pjm.co.at/waggontracker/automatische-bremsprobe/.

[6] *Siemens Controlguide CTmobile Brake Monitoring System*. URL: https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=NMIVh2YKrtw.

[7] UIRR. *DAC Sector Statement*. Juli 2023. URL: https://www.uirr.com/en/component/downloads/downloads/1781.html.

[8] Lenkungskreis Fahrzeuge/ APT. *Sicherheitsrichtlinie Fahrzeug*. URL: https://www.eba.bund.de/DE/Themen/Fahrzeuge/Fahrzeugtechnik/funktionale_Sicherheit/funktionale_sicherheit_node.html.

[9] Raphael Pfaff, Manfred Enning und Stefan Sutter. "A risk-based approach to automatic brake tests for rail freight service: incident analysis and realisation concept". In: *SN Applied Sciences, Open Access* (März 2022). URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s42452-022-05007-x.

[10] Bernd Schmidt, Manfred Enning und Raphael Pfaff. "Güterwagen 4.0 – Der Güterwagen für das Internet der Dinge. Teil 3: Einführungsszenarien für aktive, kommunikative Güterwagen". In: *ETR Eisenbahntechnische Rundschau* (2018).

[11] Daniela Wilbring und Manfred Enning. "Stromversorgung auf Güterwagen – Aktuelle Bemühungen zur Standardisierung". In: *ETR Eisenbahntechnische Rundschau* (2019).

[12] URL: https://vpihamburg.de/vers/die-vers/itss.

[13] EU Kommission. *VERORDNUNG (EU) Nr. 1169/2010 (CSM Verordnung)*. URL: https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:327:0013:0025:DE:PDF.

[14] *Allgemeiner Vertrag für die Verwendung von Güterwagen, AVV*. URL: https://gcubureau.org/?lang=de.

Autoren

Prof. Dr.-Ing. Manfred Enning
FH Aachen, Lehrgebiet Bahnsystemtechnik im Fachbereich Maschinenbau und Mechatronik. Mitglied im Fachbeirat Bahntechnik des VDI und im Wissenschaftlichen Beirat des TIS. Forschungsschwerpunkt: Aktive und vernetzte Güterwagen.
EMail: enning@fh-aachen.de

Dipl.-Ing. Rudolf Hilgers
ex. Siemens AG, Inbetriebsetzungsleiter Lokmotiven, Technischer Leiter Prüfcenter Wegberg-Wildenrath, Eisenbahnbetriebsleiter, Prüfer für Eisenbahnbetriebsleiter, Funktionaler Gutachter.
EMail: rudolf.hilgers@online.de

Session 2
Günter Petschnig, Christoph Lorenzutti

Digitales Monitoring und Automation im Schienengüterverkehr

Petschnig, Günter[1], Christoph Lorenzutti[1]

[1]PJ Monitoring GmbH

1 Zusammenfassung

Best Practice eines digitalen Intermodalzugs, der schon heute quasi die Vollausbaustufe an digitalen Funktionalitäten aufweist und von der Transport-Vorbereitung bis zur Überwachung während der Fahrt alle relevanten Funktionen umfasst, inklusive automatisierter Prozesse wie Bremsprobe. Der vorliegende Artikel beschreibt nicht nur die technischen Features, sondern auch die konkreten Vorteile, die während des Betriebs aufgezeigt wurden.

Keywords: Intermodal, Digitalisierung, Automation, Condition Based Maintenance, Schienengüterverkehr

2 Einleitung

Der europäische Schienengüterverkehr (SGV) steht vor (zwei) großen Herausforderungen: Um die definierten Klimaziele erreichen zu können, muss der Anteil des Gütertransports per Bahn erhöht werden. Aufgrund des demografischen Wandels wird sich der jetzt schon bestehende Engpass an Fachkräften weiter verstärken. Das bedeutet, dass künftig mehr Transportaufkommen mit weniger Humanressourcen bewältigt werden muss. Realisierbar ist dies durch eine digitale Transformation des europäischen SGV. Dass dies keine Vision ist, sondern bereits Einzug gehalten hat, zeigt ein intermodaler Pilotzug von Mercitalia Intermodal. Die oben angeführten Anforderungen waren übergeordnete Projektziele. Die Anforderungen im Detail, die technischen Anforderungen und die Vorteile für den Betreiber werden in nächsten Kapiteln dargestellt.

3 Anforderungen von Mercitalia Intermodal

Der größte Intermodal-Betreiber Italiens, Mercitalia Intermodal S.p.A, zählt zu den innovativsten und führenden Eisenbahnunternehmen Europas. Um die Transportqualität und -leistung des Intermodalverkehrs zu steigern, beschloss Mercitalia Intermodal 2021

in weitere technische Innovationen zu investieren. Konkret gefordert war im ersten Schritt die digitale Aufrüstung eines intermodalen Pilotzugs, der folgende Anforderungen erfüllen sollte:

- Schnellere Umschlagzeiten zur Erreichung von höheren Terminalkapazitäten
- Verkürzung der Lieferzeiten und Optimierung der Zugvorbereitung
- Minimierung der Stehzeiten von Güterzügen (verursacht z.B. durch Zug-Vorbereitungsprozesse, Ausreihung an Infrastrukturstellen wegen Überladung, fehlendes Personal für die Zugvorbereitung etc.)
- Permanente Ermittlung von sicherheitsrelevanten Daten über den gesamten Güterzug in Echtzeit, um den Lokführer wie auch die Betriebszentrale über kritische Situationen umgehend informieren zu können
- Reduktion der Wartungs- und Instandhaltungskosten bzw. Ermittlung von aussagekräftigen Informationen über den Güterzug, um Schäden oder Verschleiß rechtzeitig festzustellen, um Werkstättenprozesse vorausschauend planen zu können und in weiterer Folge kurzfristige und teure Reparaturen zu vermeiden (Condition Based Maintenance)
- Minimierung manueller Tätigkeiten in der Gleisumgebung durch Automation bzw. langfristige Realisierung eines 1-Personen-Betriebs in Kombination mit einer automatischen Kupplung

Weitere technische Grundvoraussetzungen für die Umsetzung all dieser Ziele war:

- Realisierung der dafür notwendigen Funktionalitäten in einem Gesamtsystem, um die gängige Problematik von Schnittstellen, Zusammenführung unterschiedlicher Systeme von unterschiedlichen Anbietern oder hohem zeitlicher Abstimmungsaufwand u.ä.m. zu vermeiden
- Eine offene, skalierbare Lösung, um auch zukünftige Anwendungen mit dem bestehenden System abdecken zu können
- Kompatibilität mit zukünftigen DAK-Lösungen
- Eine modulare Systemarchitektur, um jeden Wagen der existierenden Flotte (inkl. Bestandswagen) aufrüsten zu können

Eine wichtige Anforderung aus wirtschaftlicher Sicht an die Lösung war:

- Kosten und Nutzen müssen in gutem Verhältnis sein. Technische Vorteile sind wesentlich, können jedoch nicht immer mittels ROI gegengerechnet werden (z.B. erhöhte Sicherheit). Aber grundsätzlich muss die Investition in das technische

Upgrade – wie jede wirtschaftliche Entscheidung in einem Unternehmen – natürlich ab einer bestimmten Zeitspanne vorteilhaft sein.

4 Die Lösung

Ausgehend vom Anforderungsumfang des Kunden, wurden die Funktionalitäten des Güterzugs festgelegt. Für die Realisierung dieser zahlreichen Anforderungen, wurde das bewährte digitale Gesamtsystem WaggonTracker eingesetzt. Dieses erfüllt drei übergeordnete Aufgaben:

- Eine autonome und leistungsstarke Stromversorgung in Form eines Radnaben-Generators. Dies ist zurzeit die bewährteste, zuverlässigste und kosteneffizienteste Lösung, um die umfangreichen Wagenfunktionen autonom und ausreichend mit Strom zu versorgen. In Zukunft kann der Strombedarf auch über eine digitale automatische Kupplung abgedeckt werden.
- Monitoring-Funktion: Relevante Daten über den Güterwagen werden in Echtzeit erfasst, verarbeitet und an ein Webservice übertragen.
- Kommunikation im Zugverband mithilfe einer In-Train-Kommunikation, die auf einem Long-Range-Funksystem basiert. Das System ist auf höchste Verfügbarkeit ausgelegt und eine verschlüsselte, gesicherte Verbindung gewährleistet eine Direktkommunikation zum Triebfahrzeugführer (Tf).

Folgende Funktionalitäten wurden konkret realisiert:

- Bremsmonitoring: Echtzeit-Bremsanalyse und Bremssystem-Überwachung hinsichtlich der korrekten Funktionalität der Bremse, der Überwachung der korrekten Zylinderdrücke in Abhängigkeit des Wiegeventil-Zustandes im Stillstand und während der Fahrt, Bremsenergie-Berechnung pro Bremszylinder zur Ermittlung des Gesamtsystem-Verschleißes und zur Erkennung der Überlastung des Bremssystems. Geplant ist, diese relevanten Bremszustände auch per Funk auch an den Tf zu übertragen, um vor nicht korrekt gelösten Bremsen oder vor Überlastung des Bremssystems zu warnen und ein assistiertes Anfahren hinsichtlich korrekt gelöster Bremsen zu ermöglichen. Dieses System befindet sich derzeit im Prototypen-Feldtest.

- IDDS (Informative Derailment Diagnoses System) ist eine nicht in das Bremssystem eingreifende, beschleunigungsbasierte Entgleisungsdiagnose mit Echtzeitwarnung an den Tf: Der Lokführer erhält mittels In-Train-Kommunikation im Entgleisungsfall umgehend eine Entgleisungswarnung und führt dann die betrieblich vorgeschriebenen Schritte durch. Mithilfe der Freifall-Überwachung können beim Stillstand Entgleisungen durch Entladeprozesse sowie bei geringer Geschwindigkeit detektiert und gemeldet werden.

In weiterer Folge ist es geplant, mithilfe dieses Systems durch Kombination mit der dynamischen Fahrzeugzustandsüberwachung auch eine präventive Entgleisungsdiagnose umzusetzen.

- Echtzeit-Stützbock-Überwachung zur zuverlässigen und sicheren Erkennung der korrekten Einstellung bei Trailer-Transporten im Intermodal-Bereich inkl. Tf-Warnung, wenn sich während der Fahrt der Status des Stützbocks ändert

- Ermittlung von Fahrkomfort, Fahrstabilität und Fahrsicherheit

- Überwachung von Längs-, Quer- und Vertikalstößen und deren Koordinaten bei Überschreitung von Grenzwerten

- Ladegewichtsüberwachung, um sicherzustellen, ob das Fahrzeug korrekt und ordnungsgemäß beladen wurde

- Allgemeine Monitoring-Funktionen wie Fahrleistung, Fahrtrichtung, Positionsdaten, historische Daten, letzte Meldung, letzte Bewegung, Geofencing (Überwachung von Fahrzeugflotten innerhalb eines vordefinierten Bereichs)

- Automatisierte Bremsprobe: Im Rahmen der mit SBB Cargo und RCG entwickelten Bremsprobe wird die Überprüfung des Bremszustands mit dem Bremsprobesystem automatisiert durchgeführt. Über eine funktional sichere Messtechnik werden relevante Daten des Güterzugs gesammelt, die in Echtzeit übersichtlich und benutzerfreundlich auf dem mobilen Bediengerät des Zugführers oder Bremsproben-Verantwortlichen dargestellt werden. Somit kann die betriebliche Bremsprobe in kurzer Zeit von einer Person aus der Ferne durchgeführt werden. Der mehrfache Rundgang um den Zug entfällt. Die automatisierte Bremsprobe erfüllt in puncto Betrieb und Fahrzeug sämtliche sicherheitsrelevanten Vorgaben und bildet das Referenzsystem für automatisierte Bremsproben an Güterwagen in Europa.

- Durch die Konzeption des WaggonTracker-Systems und die leistungsstarke Stromversorgung können zukünftige, neue Funktionalitäten nach Kundenwunsch hinzugefügt werden. Das System ist skalierbar und kompatibel mit DAK-Lösungen.

5 Vorteile

5.1 Unmittelbare Kosteneinsparung

Kosten werden durch mehrere Faktoren eingespart. An dieser Stelle seien folgende exemplarisch genannt:

- Die Ladgewichtsüberwachung stellt sicher, dass der Güterzug bestmöglich beladen und die Ladekapazität maximal genutzt ist. Zugleich wird eine Überladung ausgeschlossen und in weiterer Folge eine Ausreihung an Infrastrukturmessstellen. Kosten werden dadurch unmittelbar mit der Einführung des Systems gespart.

- Durch die umfangreiche, zustandsbasierte Überwachung werden mögliche Schäden am Fahrzeug verhindert, dadurch werden kostenintensive Reparaturen eingespart. Anhand vorausschauender Messdatenanalysen können Wartung und Werkstattaufenthalte hinsichtlich des Zeitpunkts und Ortes besser geplant und akute Reparaturen verhindert werden.

- Typische kostenintensive Probleme wie Flachstellen, etwa durch angezogene Handbremsen, beim Anfahren nicht vollständig gelöste Bremsen sowie schleifende Bremsen während der Fahrt, können durch Integration des Systems in den Betrieb vermieden werden.

- Durch die Automatisierung bisheriger aufwändiger, manueller Prozesse (Bremsprobe) werden ebenfalls Kosten gespart. Ein wesentlicher Aspekt dabei ist, dass die Kosteneinsparungen sofort wirksam sind und einen unmittelbaren Effekt haben, aber auch in der mittel- und langfristigen Betrachtung Kostenvorteile gegeben sind.

- Aktuell werden knapp 10 % weniger Schäden der Bremssysteme und ihrer Komponenten registriert. Mit der In-Train-Kommunikation wird erwartet, dass der Wert auf 25 % steigt. Wären die Schäden nicht durch das Monitoring-System erkannt worden, hätten sie in weiterer Folge auch zu Schäden an den Radsätzen verursacht, was wiederum die Kosten für Instandhaltung von Radsätzen sowie Ersatzteile erhöht hätte.

- Effizienzsteigerung des Betriebs, bedingt durch das GPS-basierte Monitoring der einzelnen Wagen.

5.2 Erhöhung der Sicherheit

Die automatisierte Überprüfung der Bremsen oder des Ladegewichts sowie die Überwachungsfunktionalitäten erhöhen die Sicherheit des Güterzugs. Überladene oder asymmetrisch beladene Güterwaggons bedeuten ein höheres Risiko während der Fahrt, gehören jedoch mit der automatischen Ladegewichtsüberwachung der Vergangenheit an. Entgleisungsdiagnose, Stützbocküberwachung und Achslagertemperaturüberwachung sind ebenfalls sicherheitsrelevante Daten, die in Echtzeit erfasst werden und über die In-Train-Kommunikation den Triebfahrzeugführer im Falle kritischer Abweichungen während der Fahrt warnen (werden).

5.3 Präventive Vermeidung von Schäden und Reparaturen

Viele der Monitoring-Funktionalitäten verhindern präventiv mögliche Schäden oder Reparaturen durch falsche Handhabung oder Fehlbelastungen. Dabei ist zu bedenken, dass der Pilotzug mit sehr neuwertigem Wagenmaterial ausgestattet wurde und daher deutlich über einem durchschnittlichen Rollmaterial einzuordnen ist. Als Beispiele sind hier exemplarisch genannt:

- Seit Einführung des Stützbock-Monitorings hat Mercitalia Intermodal einen markanten Rückgang der Schäden verzeichnet. Falsche Handhabung seitens Dritter können nun objektiv ermittelt und nachgewiesen werden (bisher war ein datenbasierter Nachweis nicht möglich). Dennoch auftretende Schäden können dem Verursacher weiterverrechnet werden. Es gibt eine automatische E-Mail-Benachrichtigung des Kunden, wenn es zu Fehlbedienungen- und Anwendungen kommt. In weiterer Folge werden danach gezielte Personalschulungen durchgeführt, um künftig solche Schäden zu vermeiden.

- Durch die Ladegewichtsüberwachung wurde die Zahl der ungeplanten Ausreihungen, die durch Überladung verursacht wurden, deutlich reduziert. Ausreihungen an Infrastrukturstellen sind zeitaufwändig und kostenintensiv

- Die gesamte Performance des Pilotzugs hat sich deutlich erhöht, weil der Zug seltener außerplanmäßige Stillstände oder sogar Ausfälle verzeichnet, die durch das gezielte Monitoring rechtzeitig erkannt und verhindert werden können. Wenn nur eine Komponente nicht funktioniert (z.B. Stützbock oder Bremse), steht der

gesamte Zugverband. Operativ sei zu erwähnen, dass historisch gesehen, Schäden am Stützbock durch Fehlbedienung üblicherweise nicht gemeldet wurden. Das hatte zur Folge, dass bei der anschließenden Fahrt bereitstehende Wagen nicht beladen werden konnten. Dies war ein Kosten- und Qualitätsproblem.

- Durch die gezielte Überwachung der Bremskomponenten sowie der Bremsenergie, gibt es aussagekräftige Informationen über den Verschleiß. Das bedeutet in weiterer Folge eine zielgerichtete und optimierte Instandhaltung, da man Wagen auf Strecken mit weniger oder höher benötigter Bremsleistung zielgerichtet einsetzen kann (Condition Based Maintenance). Darüber hinaus kann durch Kenntnis des Verschleißes die Nutzung des Fahrzeugs besser gesteuert werden, um die Wartungsintervalle zu optimieren, z.B. durch leichtere oder schwerere Beladung des Fahrzeugs.

5.4 Zeitgewinn

Die automatisierte Bremsprobe und Ladegewichtsüberwachung verschaffen Eisenbahnverkehrsunternehmen effektiven und sofortigen Zeitgewinn. Die automatisierte Überprüfung der Bremsen eines 500 m langen Güterzugs dauert typischerweise 5 Minuten, anstatt bis zu 40 Minuten, bei geringerem Personalaufwand. Damit werden Umlaufzeiten reduziert und Kapazitäten von Terminals, Tf und Lokomotiven optimiert und erhöht. Durch die umfassenden Monitoring-Funktionalitäten können kurzfristige und damit zeitlich aufwändige Reparaturen vermieden werden. Die Zuverlässigkeit der Flotte erhöht sich und weniger Ersatzwagen werden gebraucht. Die Werkstattzeiten werden reduziert, so dass die Fahrzeuge tatsächlich „Fahrzeuge“ sind (und keine „Stehzeuge“). Die automatische Ladegewichtskontrolle verhindert zeitraubende Ausreihungen an Kontrollpunkten. Die entstehenden Zeitreserven wirken betrieblichen Verzögerungen oder Ausfall von Infrastruktur entgegen und helfen trotzdem pünktlich anzukommen. Dadurch können auch zeitkritische Güter mit der Bahn transportiert und das Ziel der Erhöhung des Modal Split realisiert werden.

5.5 Realisierung des Ein-Personen-Betriebs

Die digitale „Rund-um-Ausstattung“ ermöglicht in Kombination mit einer automatischen Kupplung den sogenannten Ein-Personen-Betrieb. Das bedeutet, dass die Güterzugfahrt

vom Lokführer alleine durchgeführt und organisiert werden kann, ohne bisher üblichem Rangierpersonal (Technische Wageninspektion, Ladegutsicherungsüberwachung und Bremsprobe können somit zu unterschiedlichen Zeitpunkten stattfinden). Durch den zunehmenden Fachkräftemangel ist die Automatisierung von manuellen, anstrengenden und völlig unattraktiven Arbeitsschritten entscheidend, um einen effizienten Betrieb gewährleisten zu können.

6 Fazit

Die digitale Vollausstattung des intermodalen Pilotzugs von Mercitalia Intermodal umfasst eine umfangreiche Überwachung von Bremsen / Bremssystem, Stützbock, Fahrverhalten, Fahrzustand und Ladegewicht inklusive Meldung in Echtzeit an die Betriebszentrale und den Tf sowie die automatisierte Durchführung der Bremsprobe. Der rund 18-monatige Betrieb des Pilotzugs – wie auch bereits andere Projekte in anderen Ländern – hat einmal mehr gezeigt, dass die Technologie eines digitalen Güterzugs realisiert wurde und sich bewährt hat.

Eine digitale Aufrüstung von Güterzügen bringt Vorteile auf qualitativer wie auch quantitativer Ebene. Mehr Sicherheit wird erreicht durch korrekte Beladung, Erkennung von schadhaften Komponenten und Echtzeit-Überwachung während der Fahrt. Wertvolle Zeit- und Humanressourcen werden gespart durch die Automatisierung von bislang manuellen Prozessen. Die Zuverlässigkeit und Qualität des Bahntransports haben zugenommen. Auf Kostenebene gibt es ebenfalls deutliche Einsparungen, selbst bei neuem Wagenmaterial. Bereits nach kurzer Einsatzdauer des digitalisierten Zugverbands hat sich gezeigt, dass die Instandhaltungs- und Wartungskosten sinken, da der Zustand der Wagen deutlich verbessert wurde und in der Folge weniger (kostenintensive) Schäden entstehen bzw. der Schaden bekannt ist.

Mercitalia Intermodal ist seit vielen Jahren in dieser Thematik visionär und sehr aktiv. Durch langjähriges Commitment von innovativen Partnern wie Mercitalia Intermodal oder SBB Cargo steht heute im europäischen Intermodalverkehr ein leistungsfähiges und zuverlässiges Gesamtsystem zur Verfügung.

Session 2
Günter Petschnig, Christoph Lorenzutti

Abb. 1. Durch die digitale „Vollausstattung“ des Pilotzugs von Mercitalia Intermodal ist künftig der 1-Personen-Betrieb möglich. Das ist besonders relevant in Hinblick auf den zunehmenden Fachkräftemangel.

Abb. 2: Der Pilotzug wurde mit einer Echtzeit-Stützbock-Überwachung ausgestattet, zur zuverlässigen und sicheren Erkennung der korrekten Einstellung bei Trailer-Transporten im Intermodal-Bereich. Seitdem verzeichnet das italienische Intermodal-Unternehmen einen deutlichen Rückgang an Stützbock-Schäden.

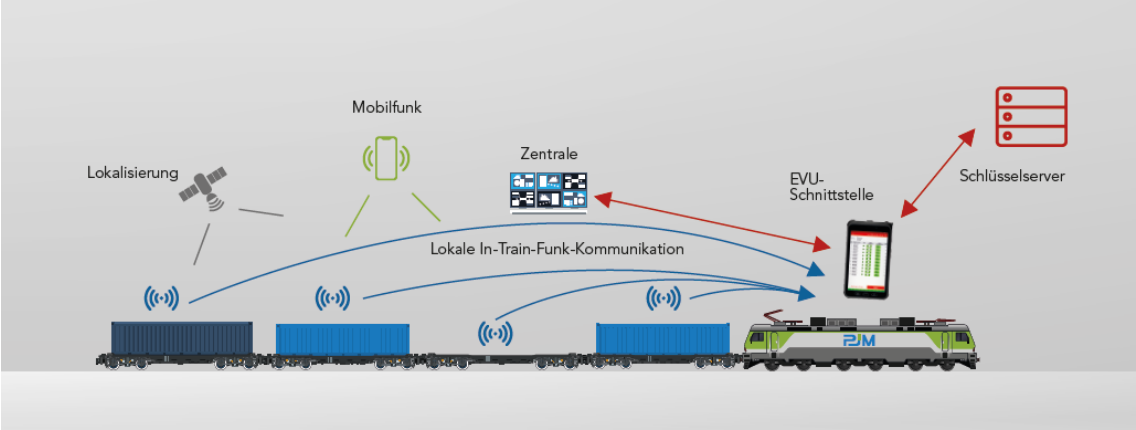


Abb. 3: Kommunikation im Zugverband und mit der Betriebszentrale über ein Long-Range-Funksystem, das auf höchste Verfügbarkeit ausgelegt ist und eine verschlüsselte, gesicherte Verbindung gewährleistet sowie eine Direktkommunikation zum Triebfahrzeugführer.

Session 2
Günter Petschnig, Christoph Lorenzutti

Autoren

Petschnig, Günter

Geschäftsführer PJ Monitoring GmbH

Als Gründer der PJ Messtechnik GmbH und PJ Monitoring GmbH (PJM) ist er insbesondere für die Konzeption und Entwicklung des digitalen Güterwagen-Monitoring- und Automatisierungssystems WaggonTracker verantwortlich. Nach dem Studium Maschinenbau an der TU Graz spezialisierte sich Günter Petschnig auf Messtechnik. Am Institut für Maschinenelemente war er maßgeblich am Aufbau des Bereichs Messtechnik beteiligt. Außerdem war er seit 1999 federführend in der Abwicklung internationaler Messprojekte. 2006 gründete er PJM mit Dr. Martin Joch.

Lorenzutti, Christoph

COO PJ Monitoring GmbH

Aus der technischen Industrie hat er langjährige Erfahrung in den Bereichen Software-Entwicklung, Hardware-Design, System-Integration und Projektmanagement, seit 2014 ist er bei PJ Monitoring GmbH maßgeblich an der Entwicklung und Realisierung der digitalen Technologien sowie automatischen Bremsprobe beteiligt.

Session 2
Frederic Raths, Christopher Wink, René Zweigel

Betriebliche Auswirkungen durch ETCS und ATO am Beispiel einer NE-Strecke

Raths, Frederic[1], Wink, Christopher[2], Dr.-Ing. Zweigel, René[1]

[1]Rurtalbahn GmbH, Düren
[2]Verkehrswissenschaftliches Institut (VIA) – RWTH Aachen

Zusammenfassung

Auch auf nichtbundeseigenen Eisenbahninfrastrukturen wird zukünftig ETCS (European Train Control System) als Zugbeeinflussung genutzt werden. Viele dieser Strecken bieten zudem das Potential, durch einen automatisierten Betrieb die Attraktivität des Schienenpersonenverkehrs zu erhöhen. Demgegenüber stehen potentielle positive wie negative Auswirkungen auf Schnittstellen und den Betrieb, insbesondere an Infrastrukturgrenzen. Dieses müssen vertieft betrachtet werden.

Keywords: ETCS; ATO; NE-Infrastruktur; Transition

1 Einleitung

Nach aktuellem Stand (Juli 2023) ist bei den deutschen NE-Bahnen bisher keine Ausrüstung mit ETCS erfolgt. Als Zugbeeinflussungssystem kommt daher ausschließlich PZB 90 zum Einsatz. Mit der fortschreitenden Ausrüstung mit ETCS bei den bundeseigenen Eisenbahnen wird zukünftig auch bei den NE-Bahnen ETCS an Bedeutung gewinnen. Nur damit kann langfristig die Interoperabilität gewährleistet werden.

Hinzu kommt, dass gerade auf den weniger belasteten, meist ländlicher geprägten Strecken der NE-Bahnen im SPNV die Automatisierung Vorteile hinsichtlich des Verkehrsangebots erwarten lassen kann. ETCS ist für diesen Anwendungsfall

prädestiniert. Vorab müssen jedoch die betrieblichen Auswirkungen dieser Systeme analysiert werden.

Dieses Paper stellt einen Beitrag für Verkehrsunternehmen, Infrastrukturbetreiber und Auftraggebern im Schienenpersonennahverkehr (SPNV) über die Machbarkeit und potentielle betriebliche Vorteile durch einen automatisierten Betrieb mit ETCS als Zugbeeinflussungssystem auf einer eingleisigen NE-Infrastruktur dar. Konkret wird dies am Beispiel der Strecke Düren – Jülich – Linnich betrachtet. Außerdem wird ein Überblick über entstehende technische Schnittstellen zwischen Infrastruktur und Fahrzeug sowie über Ausführungsmöglichkeiten beim Übergang zwischen nichtbundeseigener (NE) und bundeseigener Infrastruktur der DB Netz AG (DB) in einem Bahnhof gegeben.

2 Stand der Technik

Für eine automatisierte Betriebsführung im Bahnbetrieb bilden u.a. ein Automatic Train Protection (ATP) System und ein Automatic Train Operation (ATO) System ein technisches Gesamtsystem. Das ATO-System übernimmt, je nach Grade of Automation (GoA), Aufgaben der Zugsteuerung des Triebfahrzeugführers (Tf) [1]. Als ATP-System kann dafür das europäische Zugbeeinflussungssystem ETCS eingesetzt werden, welches im Gegensatz zu vielen nationalen Systemen (wie z.B. der deutschen punktförmigen Zugbeeinflussung PZB) eine kontinuierliche Überwachung der Fahrzeugbewegung durch individuelle, sichere Bremskurven gewährleistet. Das ATO-System kann aufgrund der Sicherheitsverantwortung von ETCS als nicht-sicheres System implementiert werden [2], welches innerhalb der überwachten Grenzen agiert.

Der derzeitige Fokus liegt an der Implementierung von ATO over ETCS mit ETCS Level 2 als Basis. Bei diesem Level erfolgt eine kontinuierliche Übertragung von Informationen sowie die kontinuierliche Überwachung der Fahrzeuge auf der Strecke. Beispielhaft genannt sei die „Digitale S-Bahn Hamburg“, welche sich mit der Ausrüstung für einen halbautomatisierten S-Bahn-Betrieb nach GoA 2 und vollautomatisierten Wenden nach GoA 4 auf Basis von ETCS Level 2 befasst. Unter GoA 2 erfolgt die Anfahr- und Bremssteuerung automatisiert, wobei sich ein Fahrer weiterhin im Führerstand befindet. Bei GoA 4 wird auf den Tf im Fahrzeug verzichtet. Ein Übergang zu Schieneninfrastruktur anderer Betreiber bei dem genannten Projekt besteht dort jedoch nicht [2].

Die dieser Untersuchung zugrundeliegende Projektierung orientiert sich an dem im Jahr 2022 in Betrieb genommenem System auf der Luxemburger Nordstrecke der CFL. Dort

wurde ETCS Level 1 Full Supervision mit vereinfachter Außensignalisierung der Firma Scheidt & Bachmann GmbH installiert. Bei dieser Ausführung erfolgt die Übertragung diskontinuierlich und das Fahrverhalten wird kontinuierlich überwacht [4]. Auf eine Übertragung über GSM-R wie bei Level 2 wird verzichtet.

3 Eigenschaften der Infrastrukturen von NE-Bahnen

NE-Infrastrukturen, wie auch die betrachtete Strecke zwischen Düren und Linnich, sind zum überwiegenden Anteil als Nebenbahn eingestuft, auf denen vergleichsweise niedrige Geschwindigkeiten zulässig sind. Aus diesen gehen geringere regulatorische und betriebliche Anforderungen hervor. Bei den häufig eingleisigen Strecken sind durch die physisch festgelegten Kreuzungspunkte bei Auftreten einer Verspätung eines einzelnen Zuges die Auswirkungen auf das Fahrplangefüge höher anzunehmen als bei zweigleisigen Strecken.

Die betrachtete Beispielstrecke Düren-Nord – Jülich – Linnich ist eingleisig mit Kreuzungsbahnhöfen in Huchem-Stammeln, Krauthausen und Jülich und mit ESTW-Technik ausgestattet [3]. Die Fahrzeugdiversität ist aufgrund des einfachen Linienbetriebs gering. Der nördliche Bahnhofsteil des Bahnhof Düren, in dem die betrachtete Strecke endet, ist ebenso Teil der NE-Infrastruktur und bietet Anschluss an den Bahnhof Düren mit der Hauptbahn 2600 Aachen – Köln als bundeseigene Infrastruktur [3].

4 Betriebliche Auswirkungen und Schnittstellen

Durch die Projektierung der Strecke mit ETCS ergeben sich drei betrieblich-infrastrukturelle Unterschiede gegenüber der Ausrüstung mit PZB und ortsfester Signalisierung:

- Die einzuhaltende Geschwindigkeit ist nicht an ortsfeste Signale gebunden,
- Berechnung der individuellen Bremskurve durch das Fahrzeuggerät,
- Wegfall spezifischer PZB-Restriktionen.

Die oben genannten Punkte werden für die Ermittlung der betrieblichen Auswirkungen durch die beschriebene Projektierung aufgegriffen und zunächst unter Anwendung zweier Methoden untersucht.

Zum einen werden in einer theoretischen Betrachtung Fahrzeitunterschiede mehrere Streckenausschnitte anhand der Bremskurven eines Bemessungsfahrzeugs unter drei verschiedenen Betriebsarten miteinander verglichen. Dabei wird das Bremskurventool

der ERA zu ETCS-Bremskurven für die Betrachtung herangezogen [5]. Zum anderen wird die Auswirkung auf die Fahrzeit anhand durch ETCS wegfallender Restriktionen bei der Beschleunigung nach Halt mithilfe des Fahrplanbearbeitungssystems FBS aufgezeigt [6].

4.1 Vergleich der Fahrzeit mithilfe des Bremskurventools

In Bezug auf die vorweg beschriebenen Unterschiede werden in der Betrachtung unter Zuhilfenahme des Tools zwei Arten von Teilabschnitten untersucht. Zum einen ist eine längere Beharrungsphase vor der Fahrt über das abzweigende Gleis einer Weiche möglich, da unter ETCS Level 1 FS die Geschwindigkeit nicht per Außensignalisierung übermittelt wird. Zum anderen kann die Einfahrt in einen Bahnhof durch die Berechnung der individuellen, sicheren Bremskurven des Fahrzeugs mit einer höheren Geschwindigkeit erfolgen. Letzteres ist dann der Fall, wenn unter konventioneller Streckenausrüstung beispielsweise die Einfahrgeschwindigkeit durch den verfügbaren Durchrutschweg herabgesetzt ist.

Tabelle 1 zeigt diesbezüglich vier identifizierte Teilabschnitte der betrachteten Strecke. Für die Fahrtrichtung Linnich wird dabei aufgrund der vorliegenden Fahrordnung auf der Strecke unterschieden, ob eine Zugkreuzung im jeweiligen betrachteten Bahnhof stattfindet.

Tabelle 1: Betrachtete Teilstücke der Untersuchung.

Teilstück	Bahnhof	Fahrtrichtung	Kreuzung
Geschwindigkeitswechsel vor Weiche 203	Krauthausen	Düren	-
Geschwindigkeitswechsel vor Weiche 310	Huchem-Stammeln	Linnich	Mit
Einfahrt Gleis 1	Krauthausen	Linnich	Mit
Geschwindigkeitswechsel vor Weiche 204	Krauthausen	Linnich	Ohne

Der Einsatz des Tools sowie das gesamte Vorgehen der Untersuchung wird dabei anhand des Geschwindigkeitswechsels an der Weiche 204 im Bahnhof Krauthausen detailliert dargestellt. Im Anschluss werden die Ergebnisse ebenso für die in Tabelle 1 verbleibenden Teilstücke aufgezeigt.

Die Limit of Authority (LOA) fußt am Weichenanfang der Weiche 204, vor dem ein Bereich (Distance Origin / Target) über 1.033 m gewählt wird, der das Teilstück sinnvoll abbildet. Am Ende der LOA, also für die Fahrt über das abzweigende Gleis, ist die Geschwindigkeit von 50 km/h (Target Speed) einzuhalten. Die Eingangsgeschwindigkeit (Initial Speed) des Teilstücks beträgt 80 km/h.

Die aus den vorliegenden Angaben durch das Tool erzeugte Bremskurvenschar in Form eines Geschwindigkeit-Weg-Diagramms wird für das weitere Vorgehen verwendet. Dabei werden nur die EBD-, EBI- und Permitted-Kurve sowie der Iindication Point (IP) genutzt. Für eine Zugfahrt unter ATO und ETCS wird die Permitted Curve als Fahrlinie angenommen. Für den Vergleich mit einer PZB-überwachten Fahrt wird eine weitere Fahrlinie bzw. Bremskurve ergänzt.

Bei dieser Bremskurve der PZB-überwachten Zugfahrt wird in einer theoretischen Betrachtung eine konstante Bremsverzögerung von 0,68 m/s^2 angenommen. Außerdem erfolgt die Annahme, dass der Tf die Beharrungsfahrt mit der Streckenhöchstgeschwindigkeit vollständig ausnutzt. Das bedeutet, dass die Bremskurve des PZB-überwachten Fahrzeugs am geschwindigkeitssignalisierenden Außensignal fußt und die einzuhaltende Geschwindigkeit erst an diesem erreicht wird.

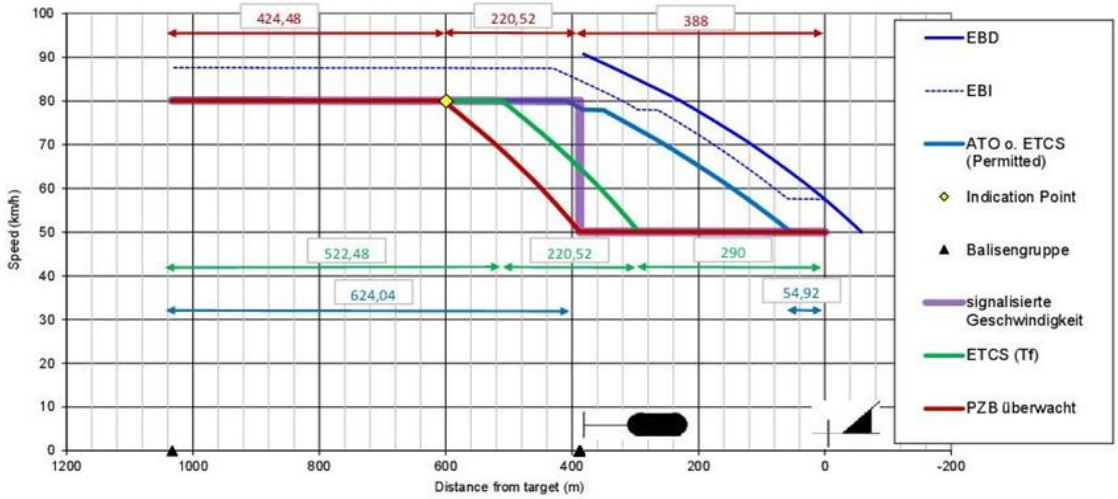


Abbildung 1: Darstellung der Bremskurven der drei Betriebsformen für den Geschwindigkeitswechsel an der Weiche 204 in Krauthausen.

Gemäß dem beschriebenen Vorgehen treten für die beiden Betriebsformen folglich Abschnitte einer Fahrt mit 80 km/h und 50 km/h sowie für den Bremsvorgang zwischen den beiden Geschwindigkeiten auf. Die Längen dieser Abschnitte sowie der Standort des Einfahrsignals sind in Abbildung 1 zu erkennen. Damit werden unter Verwendung der allgemeinen Bewegungsgleichungen die Fahrzeiten für diese Abschnitte ermittelt.

Tabelle 2: Fahrzeitanteile der Betriebsformen für den Geschwindigkeitswechsel an der Weiche 204 in Krauthausen in Sekunden.

	ATO-Führung	**PZB-Überwachung**
t_{80}	28,1	19,1
$t_{Bremsung}$	19,3	12,2
t_{50}	4,0	27,9
t_{ges}	51,4	59,2
$\Delta t_{ATO-PZB}$	**- 7,8**	

Das Ergebnis dieser Berechnungen zeigt Tabelle 2. Unter den getroffenen Annahmen legt der Zug unter PZB-Überwachung eine Distanz von 424 m mit der Streckenhöchstgeschwindigkeit 80 km/h zurück, bis die Bremsung eingeleitet wird, vgl. Abbildung 1. Für diesen Abschnitt wird gem. Tabelle 2 eine Fahrzeit von 19,1 Sekunden benötigt. Im Vergleich dazu kann das Triebfahrzeug unter ATO-Führung 200 m länger bei dieser Geschwindigkeit beharren, vgl. Abbildung 1. Dadurch fällt der Fahrzeitanteil mit 28,1 Sekunden höher aus. Insgesamt benötigt das ATO-geführte Fahrzeug für diesen Teilabschnitt vor der Weiche 7,8 Sekunden weniger Fahrzeit.

Für die gleiche Fahrtrichtung tritt ein weiterer Geschwindigkeitswechsel in Huchem-Stammeln auf. Der Fahrzeitgewinn durch eine längere Beharrungsfahrt vor Weiche 310 fällt mit 1,5 Sekunden sehr gering aus. Beide vorweg beschriebenen Fahrzeitunterschiede treten bei einer Zugfahrt in Fahrtrichtung Linnich auf, wenn die Kreuzung in Huchem-Stammeln erfolgt und somit kein Kreuzungsfall in Krauthausen auftritt.

Hinsichtlich Geschwindigkeitswechsel vor einer Weiche besteht in Krauthausen in Fahrtrichtung Düren ein weiterer Abschnitt. Dieser tritt bei jeder Zugfahrt auf, da der Zug im Regelbetrieb unabhängig von einer Zugkreuzung im Bahnhof immer über das abzweigende Gleis geführt wird. Bei dieser abzweigenden Fahrt über Weiche 203 ist für den definierten Teilabschnitt ein Fahrzeitunterschied von 10,2 Sekunden möglich. Dieser stellt den größten Fahrzeitgewinn einer ATO-geführten Zugfahrt innerhalb des Betrachtungsraumes dar.

Zuletzt ist gemäß Tabelle 1 der Streckenabschnitt zur Einfahrt in Gleis 1 des Bahnhof Krauthausen zu nennen. Bei einer Kreuzung im Bahnhof erfolgt die Einfahrt in Richtung Linnich aufgrund des kurzen Durchrutschwegs mit 60 km/h. Anders als bei den Teilabschnitten vor den Weichen wird hierbei eine Fahrlinie für einen Halt am Bahnsteig erzeugt, wobei der Abschnitt ca. 300 m vor dem Einfahrtsignal beginnt.

Dadurch erfolgt beim Zug mit PZB-Überwachung ein Bremsvorgang auf 60 km/h und im Anschluss ein weiterer bis zum Stillstand. Unter Maßgabe des theoretischen Ansatzes wird optimistisch angenommen, dass das Fahrzeug die Beharrungsfahrt voll ausnutzt. Die anschließende Bremsung erfolgt dahingehend, dass die 500-Hz-Restriktionskurve der mittleren Zugart nicht überschritten wird. Die ATO-geführte Zugfahrt bremst unverändert gemäß der durch das Bremskurventool erzeugten Permitted Curve.

Für die betrachtete Situation zeigt sich eine kürzere Fahrtdauer bei der ATO-geführten gegenüber der PZB-überwachten Zugfahrt. Unter ATO verringert sich die Fahrzeit des betrachteten Teilstücks um 3,6 Sekunden.

4.2 Vergleich der Fahrzeiten mittels FBS

Die Untersuchung des eingangs beschriebenen dritten Unterschieds bei einer Projektierung mit ETCS Level 1 FS, dem Wegfall der PZB-Restriktionen, erfolgt mithilfe von FBS. Bei der betrachteten Strecke liegen konkret zwei Teilstücke vor, auf welchen der Zug nach einem Halt am Bahnsteig zunächst nicht über die Überwachungsgeschwindigkeit der PZB hinaus beschleunigen kann. Die beiden Abschnitte betreffen die Fahrtrichtung Düren und dabei konkret die Ausfahrt aus den Bahnhöfen Jülich und Huchem-Stammeln.

Bei der Untersuchung wird für beide Abschnitte eine Zugfahrt bis zum folgenden Haltepunkt sowohl mit als auch ohne Restriktion erzeugt. Die PZB-Restriktion wird in einem Geschwindigkeitsprofil abgebildet und für den ‚ATO und ETCS'-Fall entsprechend entfernt. Anschließend wird die Zeit der beiden Fahrten miteinander verglichen.

Abbildung 2 zeigt links das dynamische Fahrschaubild der Zugfahrt ohne PZB-Restriktion und rechts für die Fahrt unter ETCS und ATO, beide mit Angabe der Fahrzeit zwischen den beiden Betriebsstellen. Beim Vergleich der Fahrzeit ist festzustellen, dass im Abschnitt zwischen Huchem-Stammeln (KHUS) und dem folgenden Haltepunkt (KDNG) eine Fahrzeiteinsparung von 0,3 Minuten möglich ist, wenn die PZB-Restriktion nicht mehr vorliegt. Für die Ausfahrt Jülich fällt der Fahrzeitunterschied bei einer Betriebsfahrt zum nächsten Haltepunkt mit 0,1 Minuten geringer aus.

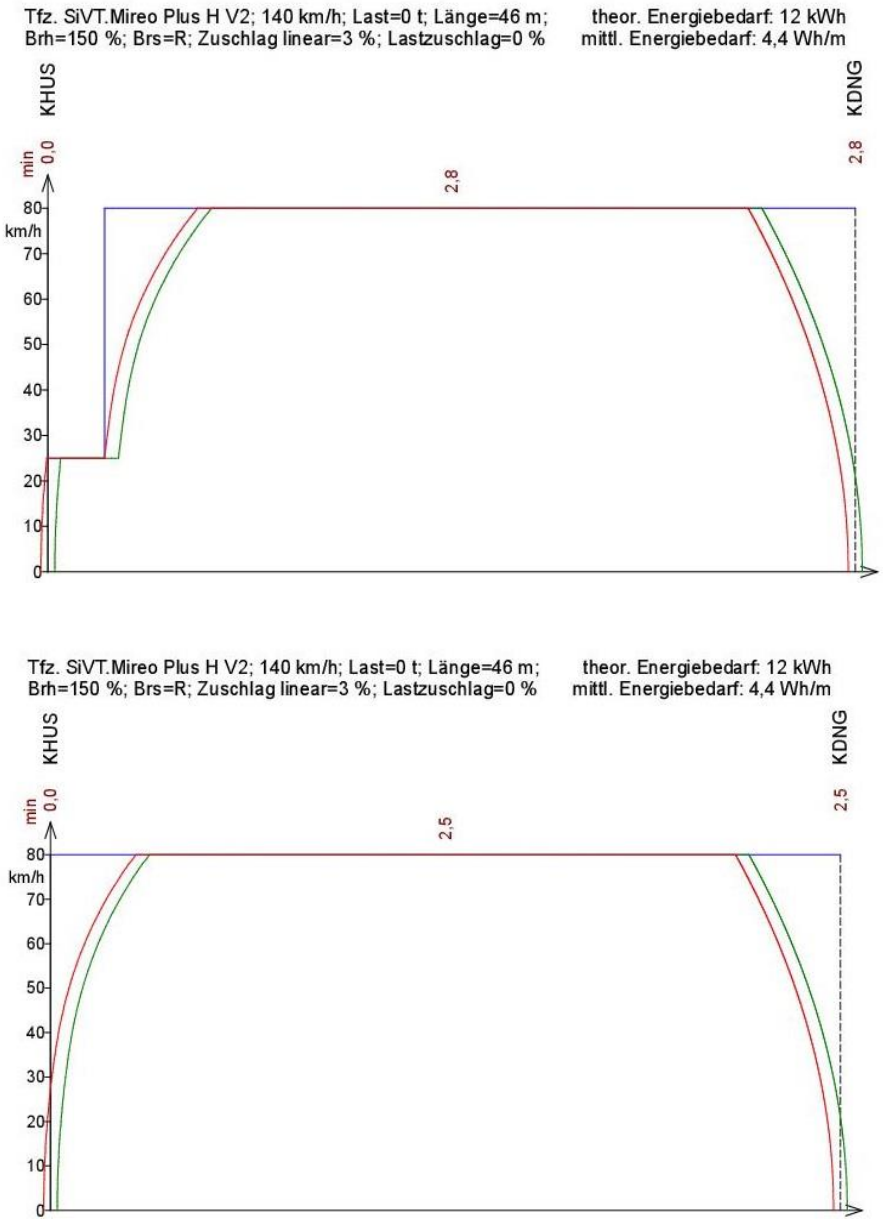


Abbildung 2: Vergleich des Fahrschaubilds einer Zugfahrt mit Ausfahrt aus dem Bahnhof Huchem-Stammeln (KHUS) mit (oben) und ohne PZB-Restriktion (unten).

4.3 Zusammenfassung der bisherigen Ergebnisse

Die Zusammenfassung der einzelnen Ergebnisse für die jeweilige Fahrtrichtung und Zugkreuzung ist in Tabelle 3 einmal übersichtlich dargestellt. Für die Zugfahrt in Richtung Düren ist aufgrund des Wegfalls der PZB-Restriktionen sowie des

Geschwindigkeitswechsels vor der Weiche in Krauthausen summiert ein Fahrzeitgewinn von 34,2 Sekunden möglich.

Tabelle 3: Übersicht der Ergebnisse beider Methoden der Betrachtung.

Teilstück	Bahnhof	Fahrtrichtung	Fahrzeitdifferenz in Sekunden
Geschwindigkeitswechsel vor Weiche 203	Krauthausen	**Düren**	- 10,2 s
1.000-Hz-Restriktion bei Bahnhofsausfahrt	Jülich		- 6
500-Hz-Restriktion bei Bahnhofsausfahrt	Huchem-Stammeln		- 18
			- 34,2
Geschwindigkeitswechsel vor Weiche 203	Huchem-Stammeln	**Linnich mit Kreuzung in Huchem-Stammeln**	- 1,5 s
Geschwindigkeitswechsel vor Weiche 203	Krauthausen		- 7,8 s
			- 9,3 s
Einfahrt Gleis 1	Krauthausen	**Linnich mit Kreuzung in Krauthausen**	**- 3,6 s**

Für die andere Fahrtrichtung fällt der Fahrzeitunterschied zwischen PZB-überwachter und ATO-geführte Zugfahrt deutlich geringer aus. Erfolgt die Kreuzung eines Zugpaars in Huchem-Stammeln und nicht in Krauthausen, ist eine Differenz von 9,3 Sekunden erreichbar. Im Falle einer Zugkreuzung in Krauthausen liegt der Fahrzeitunterschied durch die höhere Einfahrgeschwindigkeit in Gleis 1 bei 3,6 Sekunden.

Vor allem in den Ergebnissen für die Zugfahrten in Richtung Linnich zeigt sich eindeutig, dass durch die Projektierung von ATO und ETCS im betrachteten Fall kein Fahrzeitverlust zu erwarten ist. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass der Triebfahrzeugführer unter PZB-Überwachung defensiver bremst als in der Modellierung der PZB-überwachten Zugfahrt angenommen wurde. Daher ist zu erwarten, dass der Fahrzeitunterschied in der Praxis höher ausfällt.

Die ermittelten Fahrzeitdifferenzen sind demnach in einer gesamtheitlichen Untersuchung genauer zu betrachten und zu validieren. Dies erfolgt anhand einer Umlaufanalyse in Kapitel 5.

4.4 Beschreibung der Schnittstellen im Bahnhof Düren-Nord

Die Strecke beginnt im nördlichen Teil des Bahnhofs Düren und weist aktuell betrieblich keine Schnittstelle zur benachbarten Infrastruktur der DB auf. Für die Situation im Bahnhof Düren werden mehrere Varianten untersucht, bei der eine Überholungsmöglichkeit der Strecke 2600 über ein Bahnsteiggleis (Gleis 23) auf der Infrastruktur der Rurtalbahn ermöglicht werden soll. Die untersuchten Varianten unterschieden sich u.a. durch die Betriebsführung und die ETCS-Ausrüstung.

In der ersten Variante bleibt die infrastrukturelle Trennung der beiden Bahnhofsteile und damit die Betriebsführung beider Seiten bestehen. Die Strecke der Rurtalbahn ist für einen Betrieb unter ETCS Level 1 FS und die der DB mit ETCS Level 2 ohne Signale ausgestattet. Folglich ist die Entwicklung einer technisch sinnvollen Lösung für die Transition zwischen Level 2 und 1 auf der Hauptbahn für die Einfahrt sowie umgekehrt für die Ausfahrt aus dem Bahnhof Düren-Nord notwendig. Bei letzterem ist bei Umsetzung der Transition während der Fahrt von einem Fahrzeitverlust für Züge der Hauptbahn auszugehen. Dies ist im langen Einwahlprozess für Level 2 begründet, da der Levelwechsel aufgrund nicht ausreichender Gleislänge bei geringer Geschwindigkeit erfolgen muss.

Variante 2 sieht eine Betriebsführungsübernahme der DB für Gleis 23 vor. Durch die Stellwerkseinbindung des Gleises der DB ist ebenso die RBC-Zuständigkeit festgelegt. Das ATO-geführte Fahrzeug der Rurtalbahn muss dann bei Einfahrt in den Bahnhof Düren-Nord in Level 2 wechseln. Alternativ ist zu prüfen, ob die Fahrt auch unter Level 1 beginnen und enden kann. Hinsichtlich des ATO-Betriebs entsteht die Schnittstelle, dass das ATO-geführte Fahrzeug die Zugfahrt unter Betriebsführung der DB beginnt und beendet. Daraus entsteht ein notwendiger Informations- und Datenaustausch zwischen den Infrastrukturen. Hierbei ist eine tiefergehende Untersuchung sinnvoll, um festzustellen, ob durch die beschriebene Schnittstelle betriebliche Auswirkungen entstehen.

Zuletzt wird eine Variante betrachtet, bei der der nördliche Bahnhofsteil mit ETCS Level 2 unter bestehender Betriebsführung der Rurtalbahn ausgerüstet ist. Dabei ist hinsichtlich Entwicklung von Lastenheften oder dem Aufbau einer GSM-R und RBC-

Infrastruktur für eine NE-Bahn von einem erhöhten Aufwand zur technischen Umsetzung von Level 2 auszugehen. In Bezug auf den ATO-Betrieb ist durch die infrastrukturelle Trennung keine Schnittstelle zu erwarten. Für die Züge der Hauptbahn erfolgt eine Transition zwischen den RBC der beiden Betreiber.

Eine Untersuchung, wie der technische Übergang ausgestaltet werden kann und ob betriebliche Auswirkungen für die Hauptbahn-Züge entstehen, ist anzustreben.

5 Gesamtheitliche Analyse eines Umlaufs

Die Erkenntnisse aus dem vorigen Kapitel resultieren aus einer Betrachtung einzelner Teilstücke. Nachfolgend wird eine gesamtheitliche Analyse eines Umlaufs auf der Strecke durchgeführt, um die Fahrzeitunterschiede der Teilstücke zu validieren. Für die Analyse wird erneut die Software FBS genutzt. Demnach wird ein Vergleich des Ist-Zustands des Betriebs unter PZB-Überwachung mit einem Umlauf mit ATO-Betrieb und ETCS-Überwachung vorgenommen.

Dafür werden im Vorhinein die Geschwindigkeitsprofile für beide Betriebsformen angepasst. Für den aktuellen Betrieb wird mit dieser Anpassung ein realitätsnaher Zustand hergestellt und der Schulfahrplan der RB 21 genutzt. Im Hinblick auf mögliche Fahrzeitänderungen durch die Anpassungen werden folgende Parameter festgesetzt. Die Abfahrtszeiten an Start- und Kreuzungsbahnhöfen bleiben unverändert. Außerdem wird an der Mindestkreuzungszeit von 0,5 Minuten sowie einer Mindestbeharrungszeit zwischen zwei Haltepunkten von 30 Sekunden festgehalten.

Die Möglichkeit zur Einbindung von ETCS-Bremskurven bei der verwendeten Version von FBS iPLAN 1.8.1 ist nicht vorhanden. Für eine daraus folgende Annäherung der Bremskurve wird die Permitted Curve der einzelnen Teilstücke aus der vorigen Betrachtung genutzt. Demnach wird für jedes Teilstück der Punkt, an dem die Kurve die Zielgeschwindigkeit erreicht, den Geschwindigkeitsprofilen hinzugefügt.

Abbildung 3 zeigt den Vergleich der beiden Umläufe anhand eines Zugpaars mit Kreuzung im Bahnhof Huchem-Stammeln (KHUS) für den ATO-Betrieb. Dabei ist der Ist-Zustand in grau hinterlegt.

Für die Fahrtrichtung Düren (KDN) ist festzustellen, dass der Zug den Bahnhof Huchem-Stammeln (KHUS) 0,4 Minuten früher erreicht. Die Fahrzeitdifferenz fällt damit höher aus als bei der Betrachtung der einzelnen Teilabschnitte, bei der summiert -0,27 Minuten (16,2 Sekunden) erreicht werden. In Relation zur Fahrzeit von 11,6 Minuten im Ist-

Zustand zwischen Jülich (KJ) und Huchem-Stammeln (KHUS) erhöht sich die Fahrzeitreserve bei ATO-Betrieb um 2,3 %.

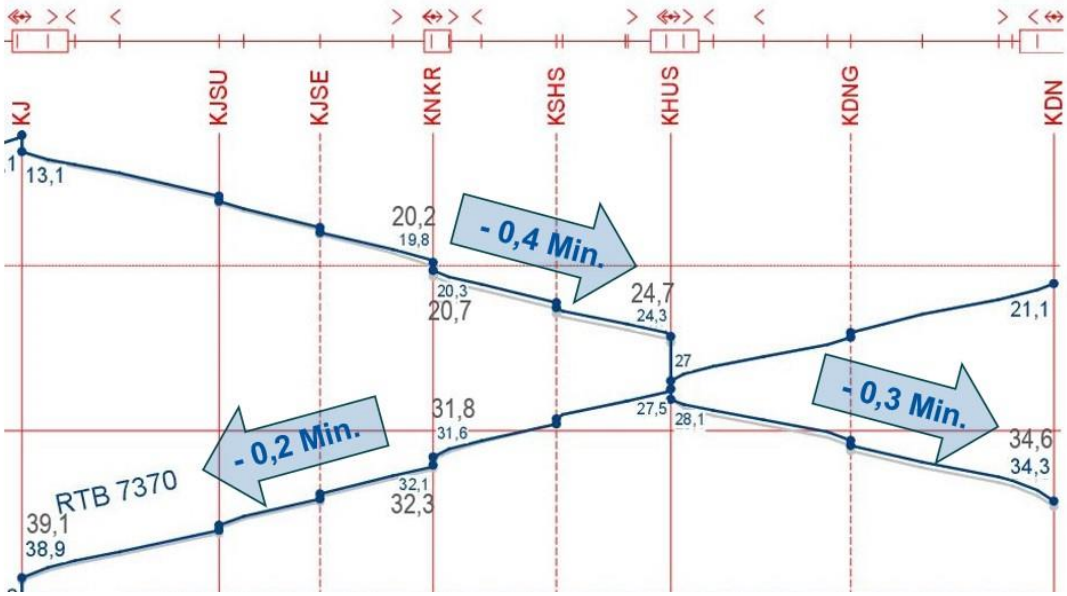


Abbildung 3: Auszug aus dem Bildfahrplan mit Kreuzung in Huchem-Stammeln auf dem Streckenabschnitt Jülich (KJ) – Düren (KDN).

Bei der entgegengesetzten Fahrtrichtung wächst die Fahrzeitdifferenz im Vergleich zur Einzelbetrachtung auf -0,2 Minuten. Eine Begründung für den Unterschied zwischen Ist-Zustand und ATO-Betrieb stellt der Geschwindigkeitswechsel vor der Weiche 204 dar. Durch diesen wird unter FBS, anders als im Ist-Betrieb, bei der ATO-Fahrt mit der angesetzten Mindestbeharrungszeit die maximale Streckengeschwindigkeit 80 km/h vor dem Bahnhof Krauthausen (KNKR) erreicht. Mit der Fahrzeitverbesserung besteht die Möglichkeit die Kreuzungszeit von 0,5 auf 0,7 Minuten zu erhöhen.

Erfolgt die Kreuzung des Zugpaars in Krauthausen (KNKR) bleibt das Ergebnis für die Fahrtrichtung Düren (KDN) unverändert, wobei der Kreuzungsbahnhof 0,4 Minuten früher erreicht wird. Bei den Zügen in Richtung Jülich (KJ) bringt der ATO-Betrieb eine um 0,1 Minuten frühere Ankunft in Krauthausen, welches dem Ergebnis durch die höhere Einfahrgeschwindigkeit in Gleis 1 gleichkommt.

Letztlich können die Erkenntnisse aus der Betrachtung der einzelnen Teilstücke durch die gesamtheitliche Umlaufanalyse bestätigt werden. Dabei fallen die Fahrzeitdifferenzen der Analyse allgemein höher aus als bei Einzelbetrachtung. Dadurch wird die Schlussfolgerung, dass durch ATO und ETCS kein Fahrzeitverlust zu erwarten ist, bestätigt.

6 Ergebnisdiskussion und Ausblick

Hinsichtlich der entstehenden Schnittstellen im Bahnhof Düren erscheint aktuell eine deckungsgleiche Trennung zwischen den beiden beteiligten Infrastrukturen als zielführend. Eine tiefergehende Untersuchung der betrieblichen Auswirkungen bei einer Überholung wird derzeit durchgeführt.

Beim Vergleich der Umläufe zeigt sich mit ATO für die Fahrtrichtung Düren ein Fahrzeitgewinn zwischen Jülich und Huchem-Stammeln von 0,4 Minuten. Insgesamt ist dem Ergebnis der Analyse zufolge für die Relation Jülich – Düren eine zusätzliche Fahrzeitreserve von 0,7 Minuten möglich.

Auch für die in der Einzelbetrachtung sehr gering ausgefallenen Fahrzeitunterschiede für die Fahrtrichtung Linnich zeigt die Umlaufanalyse, dass ein Fahrzeitgewinn durch ATO möglich ist. Beispielsweise zeigt die Untersuchung, dass eine Erhöhung der Kreuzungszeit in Huchem-Stammeln von 0,5 auf 0,7 Minuten erreichbar ist.

Insgesamt ist daher anzunehmen, dass ETCS und ATO einen robusteren Betrieb unter Ausnutzung vorhandener Reserven bieten. Vor allem lassen die Ergebnisse die Schlussfolgerung zu, dass durch die Projektierung von ETCS und ATO, auch bei einem wie hier vorliegenden eng getakteten Fahrplan, kein Fahrzeitverlust zu erwarten ist. Eine weitergehende Analyse mit Nutzung von Fahrzeitdaten des aktuellen Betriebs und Einbezug des Bremskurvenverhaltens unter ETCS wird angestrebt.

Literatur

[1] L. Schnieder, "Communications-Based Train Control (CBTC)", 2. Auflage, Berlin: Springer Vieweg, 2021.

[2] J. Schröder, C. Gonçalves Alpoim, B. Dickgießer und V. Knollmann, „Digitale S-Bahn Hamburg - Erstmalige Realisierung von "ATO over ETCS" in Deutschland," Signal + Draht (113) 7+8, 2021.

[3] Anlagenbeschreibung der Rurtalbahn GmbH, 2023. Online verfügbar: rurtalbahn.de/wp-content/uploads/sites/4/2023/07/Anlagenbeschreibung-ab-17.12.2022.pdf [Zugriff am 29.06.23].

[4] A. Morast, C. Wink, L. Pott und N. Nießen, „ETCS-Ausrüstung auf der CFL-Nordstrecke in Luxemburg," ETR, September 2022.

[5] EUROPEAN RAILWAY AGENCY, Braking curves simulation tool v4.2, 2023.

[6] Institut für Regional- und Fernverkehrsplanung iRFP, Fahrplanbearbeitungssystem FBS 2022 11.25, 2022.

[7] L. Schnieder, "European Train Control System (ETCS)", 2. Auflage, Berlin: Springer Vieweg, 2021.

Session 2
Frederic Raths, Christopher Wink, René Zweigel

Autoren

Raths, Frederic

Frederic Raths absolvierte 2023 das Masterstudium Verkehrsingenieurwesen & Mobilität an der RWTH Aachen. Nach vormaliger Werkstudententätigkeit arbeitet er seit 2020 als Planungsingenieur in der Abteilung Infrastruktur & Planung der Rurtalbahn GmbH und ist seit 2023 als Teamleiter Planung aktiv.

Wink, Christopher

Christopher Wink studierte bis 2019 Mobilität und Verkehr an der RWTH Aachen und arbeitet seitdem als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Verkehrswissenschaftlichen Institut der RWTH Aachen im Bereich Eisenbahnbetriebswissenschaft, welchen er seit 2021 als Gruppenleiter vertritt.

Zweigel, René

René Zweigel studierte Maschinenbau an der RWTH Aachen University mit der Vertiefungsrichtung Fahrzeugtechnik und promovierte zum Thema Motorenregelung. Er war Oberingenieur am Institut für Regelungstechnik der RWTH Aachen sowie Abteilungsleiter für die Abteilung „Autonome Systeme“, in der bspw. im Förderprojekt „Galileo Online: GO!“ zu automatisierten Bahnanwendungen praxisnah geforscht wurde. Seit 06/2022 ist er „Geschäftsbereichsleiter Planung & Projektsteuerung“ bei der Rurtalbahn GmbH und verantwortlich für Netzausbau und Netzentwicklung sowie firmenübergreifende Projekte.

IRSA 2023

SESSION 3

INFRASTRUKTUR + BETRIEB

INFRASTRUCTURE + OPERATION

Session 3
John Armstrong, John Preston

ACHILLES: handling uncertainty in railway earthworks maintenance and renewals

Railway Infrastructure Management: Asset Management

Armstrong, John[1], Preston, John[1]

[1]Transportation Research Group (TRG), University of Southampton, Burgess Rd., Southampton SO16 7QF, UK

Abstract

Earthworks around the world, many of which date from the 19th century, are subject to the combined impacts of ageing and increasingly extreme weather conditions, increasing the need for condition monitoring, maintenance and enhancement within limited budgets. The ACHILLES research programme is addressing these challenges, developing improved understanding of earthworks behaviour, methods of monitoring, simulation and modelling, and design and decision support tools. Decisions about how and when best to intervene to extend the life of an earthworks asset are complicated by uncertainty about their likely lifespans and times to failure. This uncertainty has been addressed through the development of a probabilistic approach to the assessment of the varying expected costs over time of asset failures and interventions, and their comparison to identify the most economically advantageous timing of interventions.

Keywords: Railways; Earthworks; Remediation; Economic Assessment; Uncertainty

1 Introduction

Contemporary society in Great Britain, as elsewhere, depends upon extensive networks of earthworks providing vital infrastructure. These earthworks, especially those of the railway networks, originally built mainly in the 19th century, are ageing and increasingly subject to the natural processes of deterioration, a situation that is exacerbated by climate change and the increased variability in rainfall. To provide operational resilience now and

into the future, an improved understanding of deterioration mechanisms and the impacts of remedial measures is needed, together with complementary methods for assessing alternative interventions and identifying the most cost-effective approaches.

The ACHILLES (Assessment, Costing and enHancement of long lIfe, Long Linear assEtS) research programme [1] is a collaboration, led by Newcastle University, between six UK universities and the British Geological Survey, with guidance from industry. ACHILLES aims to develop improved understanding of earthworks performance and deterioration, and to enable the forecasting of asset behaviour and the identification of improved intervention strategies to reduce and ideally minimise whole-life asset and network costs, while taking account of the uncertainty inherent to the situation and maintaining acceptable levels of system safety and serviceability.

Following this introduction, ACHILLES' background and context are set out. Its objectives, research themes and workstreams are then described, focussing on simulation, modelling and design and decision support. The economic assessment of earthworks whole-life costs is then considered, including data sources, methodology and the emerging results of deterministic and probabilistic approaches to cost-benefit analysis. Some conclusions are drawn, followed by acknowledgements and a list of references.

2 Background and context

2.1 Background

250 years of transport and other development since the start of the first Industrial Revolution have produced a substantial legacy of canals, railways, roads, flood defences and other infrastructure assets (with associated maintenance liabilities), many of which include extensive earthworks (it is estimated [2] that approximately "two-thirds of the UK transport infrastructure network is supported by or adjacent to engineered slopes"). As they age, these long-lived linear assets (LLAs) naturally deteriorate and are now additionally vulnerable to the effects of climate change, as illustrated by a tragic slope failure in Scotland in 2020 [3, 4], by the extensive and long-lasting impacts of flooding in Germany in 2021 [5] and by a recent embankment failure in Sweden [6].

These vulnerabilities are a particular challenge for 'classic' railway networks, given their typical age and extensive earthworks, which were initially built to relatively primitive engineering standards [7]. The challenge is heightened by the levels of uncertainty relating to earthworks performance, rates of deterioration and likelihood of failure.

2.2 Context

Uncertainty is a recurring theme in the Earthworks Technical Strategy (ETS) [8] developed by Network Rail, the infrastructure manager (IM) of most of Britain's heavy rail network. This uncertainty relates to the general "performance of infrastructure slopes" and the "forecasting of deterioration." It includes uncertainties about the accuracy of slope stability models and recorded soil parameters, the expertise and possible biases of subject matter experts, and "unacknowledged uncertainties", similar to 'unknown unknowns'. In its geotechnical risk management, Network Rail "aims to reduce uncertainty enabling [it] to make informed decisions and best utilise resources."

Notwithstanding these levels of uncertainty in relation to the more than 190,000 earthworks assets for which it is responsible, extending over approximately 19,000km, the ETS sets out Network Rail's commitment "to continuous improvement in earthwork management." It identifies three overall categories of earthworks asset intervention:

- *Planned Renewal,* where an asset is strengthened, "providing increased resilience and improving reliability";
- *Actively Failing Asset*, where, based on an inspection or monitoring outputs, asset renewal via "accelerated intervention" is undertaken to prevent catastrophic failure; and
- *Catastrophic failure*, where failure occurs and the asset is then renewed (with increased costs, levels of disruption and safety risk).

Understandably, Network Rail aims to shift towards planned renewals for all assets. The ETS refers to the findings of a Transport Resilience Review [9] conducted by the UK Department for Transport (DfT), which recommended the progressive strengthening of network resilience, and that:

> *Network Rail should maintain a strong focus on trialling newly available condition monitoring and slope stabilisation technologies, working with academic and other researchers and with other railway administrations, to improve its ability to identify and anticipate slopes that will fail and target remedial work as efficiently as possible. Network Rail should continue to commission academic research into possible slope stabilisation techniques.*

Dijkstra et al. [2] also note that, especially with respect to climate change, it is "cost effective to develop tools that enable asset managers to prioritise … investments to maintain [network] resilience." ACHILLES' objectives mirror these recommendations.

The ETS briefly describes the Earthworks Safety Risk Matrix (ESRM) that Network Rail uses to assess and manage safety risk. The ESRM categorises individual earthworks assets based on their condition (hazard category) and criticality (consequence of failure), and is central to Network Rail's Earthworks Policy, some of whose key objectives are to:

- *Prioritise sites with highest safety risk (informed by the ESRM);*
- *Optimise the number of assets improved in condition for a given level of funding;*
- *Adopt a lowest whole life cost approach balancing operational and capital investment; and*
- *Adopt a proactive approach to intervene prior to reduction in level of service.*

By meeting these and other objectives, Network Rail aims to "maintain and incrementally improve the earthwork asset resistance to the threat from adverse and extreme weather."

3 Objectives

3.1 Wider objectives of ACHILLES

The ACHILLES research programme, funded by the UK's Engineering and Physical Sciences Research Council (EPSRC), addresses some of the challenges facing IMs responsible for earthworks. The programme's vision [1] is "for the UK's infrastructure to deliver consistent, affordable and safe services, underpinned by intelligent design, management and maintenance", and it addresses three main research challenges:

1. *Deterioration Processes*, by which materials and assets degrade over time;
2. *Asset Performance*, with and without engineering interventions; and
3. *Forecasting and Decision Support*, to forecast asset (and network) behaviour with and without interventions, and to identify improved intervention strategies.

These challenges are addressed through four complementary themes and workstreams:

1. Performance and Deterioration (PaD);
2. Monitoring and Measurement (MaM);
3. Simulation and Modelling (SaM); and
4. Design and Decisions (DaD).

3.2 Specific objectives of Research Challenge 3 (SaM and DaD)

The University of Southampton is working on all four workstreams, and the Transportation Research Group's (TRG's) involvement is focussed on Research Challenge 3 (Forecasting and Decision Support – with an emphasis on engineering economics) and the SaM and DaD workstreams 3 and 4. The work uses the results of emulated simulations of earthworks behaviour with and without intervention as inputs to economic cost-benefit analysis (CBA) of alternative 'Do-Something' interventions vs. 'Business as Usual' (BAU) 'Do Nothing'/'Do-Minimum' scenarios for individual assets and the routes and networks that they collectively form. This enables the improved assessment and forecasting of whole-life costs under alternative intervention strategies.

As the owner of 190,000 earthworks assets, Network Rail cannot realistically maintain continuously up-to-date condition records, performance forecasts and optimised intervention plans for all assets, and must prioritise those assets that present the greatest safety risk, as noted above. Improved modelling of asset performance and whole life costs under alternative intervention strategies would help Network Rail to meet the other three listed key objectives of its Earthworks Strategy, i.e. to take a proactive approach to asset intervention, balancing capital and operational costs to minimise whole life costs, and thus maximising improvement in asset condition for a given level of funding.

TRG's main contributions to the SaM and DaD workstreams are summarised in the flowchart shown in Figure 1, running from SaM 4.2 through to DaD 5. The work is based primarily on the outputs from the SaM 3 and SaM 4.1 condition modelling activities (undertaken by Newcastle University and shown in Figure 1 in the two data and process boxes with dashed outlines), combined with cost data as inputs to the CBA. Doing nothing, or making the minimum required intervention, will reduce costs in the short term, but may result in larger lifecycle costs (and potential failures) in the longer term. To meet Network Rail's key objectives (see above), it is important to identify the intervention options which maintain the serviceability and safety of the infrastructure, while reducing and ideally minimising lifecycle costs, and thus to provide decision support for the optimal design and intervention outcomes.

The CBA results for individual assets are aggregated at the route and network levels, and financial CBA is being extended to include end-user and environmental impacts to provide a wider social CBA. The results are based on Whole Life Costs (WLCs) covering asset lives of up to 180 years.

Session 3
John Armstrong, John Preston

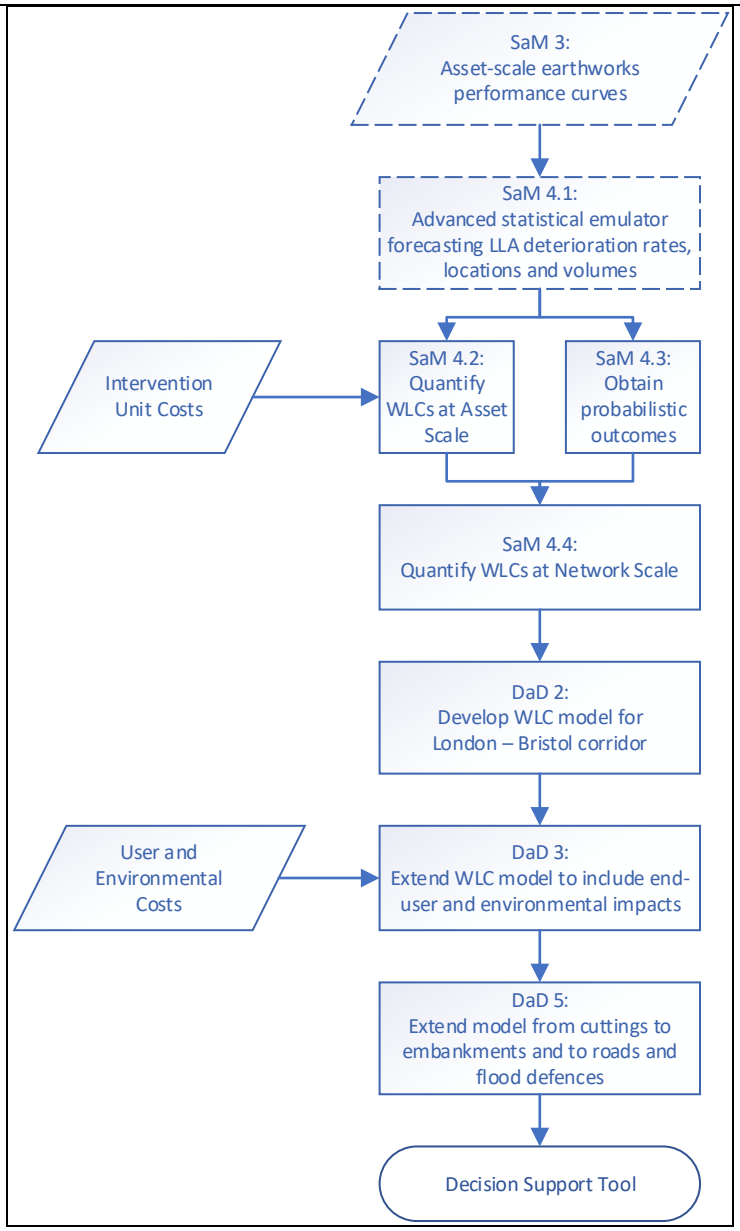


Figure 1: Outline process flowchart

The work being undertaken for SaM and DaD thus addresses the four key objectives of Network Rail's Earthworks Policy, listed above. The Great Western Main Line (GWML) railway alignment between London Paddington and Bristol Temple Meads, approximately 190km west of London, is being used as an initial case study.

Initial geotechnical modelling of railway cuttings is being extended to embankments and to other asset categories (primarily earthworks for highways and flood defences), and to include the anticipated impacts of climate change. The CBA process is being extended spatially and temporally to enable the provision of decision support for interventions in

individual infrastructure assets and categories and, collectively, for an integrated approach to wider, mutually-dependent infrastructure systems under different climate change scenarios.

4 Data sources, methodology and initial results

4.1 Data sources

As indicated in Figure 1, the following data sources are being used:

- Predicted times to earthworks failure, with and without interventions, and predicted failure volumes (source: advanced statistical emulator [10])
- Geotechnical cross-sectional data along the London – Bristol route (source: Network Rail)
- Unit cost data for earthworks interventions and repairs – (sources: standard civil engineering data sources [11, 12] and specific industry advice as required)
- Timetable data as the basis for traffic volumes and the associated socio-economic costs of delays and diversions (source: Network Rail Open Data feeds [13])
- Other data and appraisal guidance are also being used as and when required: these include the values of time specified in the Passenger Demand Forecasting Handbook (PDFH) [14] for Britain's railways, and the online transport analysis guidance (TAG) provided by DfT [15].

The earthworks condition and failure modelling being done by Newcastle University [16] is based upon a combination of SHETRAN (Système Hydrologique Européen TRANsport), a finite difference hydrological model [17], and FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) with Two Phase Flow [18]. While this advanced geotechnical modelling is a very useful complement to, and potential partial replacement for, manual inspection and condition recording of earthworks, it is still computationally intensive and time-consuming, and unsuitable for application individually to each of Network Rail's 190,000 earthworks assets. Variations in the model outputs in response to changes in the input parameters have therefore been investigated by means of Latin hyper cube methods, which enable the design space to be covered efficiently. These detailed modelling outputs then provide the inputs to a Gaussian process emulator, enabling the rapid interpolation of modelled behaviour across the full range of realistic model parameters, increasing the speed and coverage of the overall modelling process [10], and providing the required geotechnical inputs to the CBA of alternative options.

For each of the combinations of intervention strategy and climate change and rail traffic scenarios, the outputs from the analysis indicate the likely timings, locations and, based upon soil type, slope heights and angles, volumes of expected earthworks failures. These results provide the geotechnical inputs to the CBA in SaM 4.2 through to DaD 5.

The geotechnical cross-sectional data for the GWML between London Paddington and Bristol Temple Meads comprises 8,672 unique slope IDs, belonging to 1,907 distinct earthworks, many earthworks having been surveyed at multiple cross-sectional locations. Preliminary emulator outputs have been generated for 1,432 of these unique slope IDs, comprising cutting slopes classified as having high failure potential.

As indicated above, initial unit cost data for remedial and repair work to earthworks has been obtained from standard industry sources. Data is not readily available for some more specialist approaches, such as soil nails, and the costs of interventions can be highly situation- and location-specific, necessitating advice from Network Rail.

Timetable data for passenger and freight train services is obtained from Network Rail's Open Data feeds, and is used to assess traffic flows along the route between London and Bristol (the route has been sub-divided into nine 'Constant Traffic Sections' between termini/junctions for analytical purposes), and thus the socio-economic impacts of slope failures and/or interventions.

4.2 Methodology and initial results

The CBA of new transport infrastructure typically involves the calculation and comparison of the discounted costs and benefits of alternative options, with benefits being obtained in the form of reduced journey times, increased levels of safety, etc. The like-for-like renewal of an existing earthworks asset generally does not provide 'conventional' additional benefits of these types, but rather prolongs asset life and thus avoids/defers the costs of failure. However, if the total lifespans (times to failure (TTFs)) or, more usefully, the serviceable lifespans of earthworks assets were known, with and without interventions at varying times in the lifecycles of individual assets, minimising the discounted cost of interventions in an asset (and thus its whole-life costs within a given timescale) is reasonably straightforward in principle.

Deterministic analysis

This type of 'deterministic' approach, applied to a hypothetical earthworks asset, is illustrated in Figure 2. The asset has an assumed life (without intervention) of 150 years,

with its condition deteriorating increasingly rapidly over the last 50 years of its life. An early intervention, made when the asset is beginning to deteriorate, incurs a relatively high discounted cost, but is assumed to deliver a significant life extension (100 years in the example shown). Later (equivalent) interventions, after a further 20 and 40 years respectively, when the asset has deteriorated considerably, incur smaller discounted costs, but also (in this example) deliver smaller life extensions, meaning that additional works will soon be required to avoid subsequent failure, and/or major remedial activities will be needed to restore high levels of serviceability and residual life.

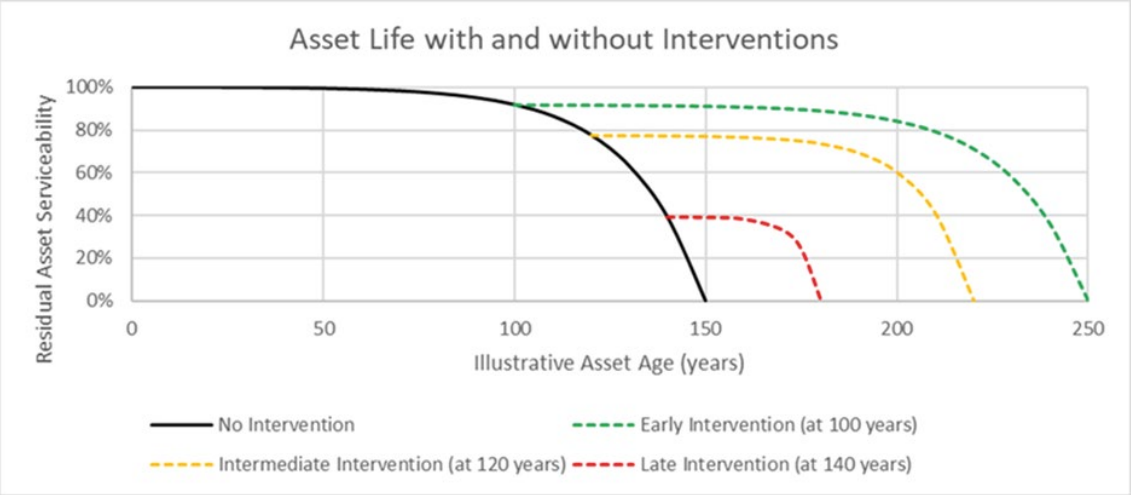


Figure 2: Alternative Intervention Timings and Lifecycle Extensions

The assumptions used in the development of this example are as follows:

- Current year = 2023 (the base year for discounting purposes)
- Current asset age = 100 years
- Cost of intervention = £1,000,000 (assumed to be constant in undiscounted terms, irrespective of year of intervention, i.e., at 100, 120 and 140 years)
- Cost of failure and emergency repairs = £10,000,000 (assumed to be 10 times the costs of planned, preventive intervention [1], and again assumed to be constant in undiscounted terms)
- Discount rate = 3%

An example calculation, based on Figure 2 and these assumptions, is shown in Table 1.

Table 1: Economic Results of Alternative Intervention Timings and Lifecycle Extensions

Scenario		Do Minimum	Intervene Now	Intervene in 20 Years	Intervene in 40 Years
Intervention	Year	2023	2023	2043	2063
	Asset Life Extension (years)	0	100	70	30
	Cost	£0	£1,000,000	£1,000,000	£1,000,000
	Discounted Cost	£0	£1,000,000	£553,676	£306,557
Expected Failure	Year	2073	2173	2143	2103
	Cost	£10,000,000	£10,000,000	£10,000,000	£10,000,000
	Discounted Cost	£2,281,071	£118,691	£288,093	£939,771
Present Value of Costs (PVC)		£2,281,071	£1,118,691	**£841,769**	£1,246,328
Capital Recovery Factor (CRF)		0.038865	0.030360	0.030890	0.033112
Annualised PVC (= PVC x CRF)		£88,655	£33,964	**£26,002**	£41,268

The results show that intervention in 20 years' time, in 2043, results in predicted asset failure in 2143, and a total discounted Present Value of Costs (PVC) of £841,769, the minimum for the options evaluated (this corresponds to the yellow dashed line in Figure 2). Because the evaluations are undertaken and the PVC values are calculated over varying time periods, the results are standardised by calculating Capital Recovery Factors (CRFs):

$$\mathrm{CRF} = d(1 + d)^n/((1 + d)^n - 1)$$

where d = the discount rate and n = the lifetime of the investment in years.

The relatively long timescales for investment and failure scenarios result in the CRF values tending to converge to the value of the discount rate (i.e. if n = infinity, CRF = d), and so the ranking of the APVC values is the same as that for the PVCs. The trade-off between the higher discounted costs of earlier interventions and the higher discounted costs of earlier failures associated with later interventions (or none) can also be seen. Figure 3 shows the results of fitting a curve to the points corresponding to the intervention timings and associated APVC values, and suggests that the minimum APVC (£25,715) would be delivered by an intervention 16.86 years from the current year, i.e. in late 2039.

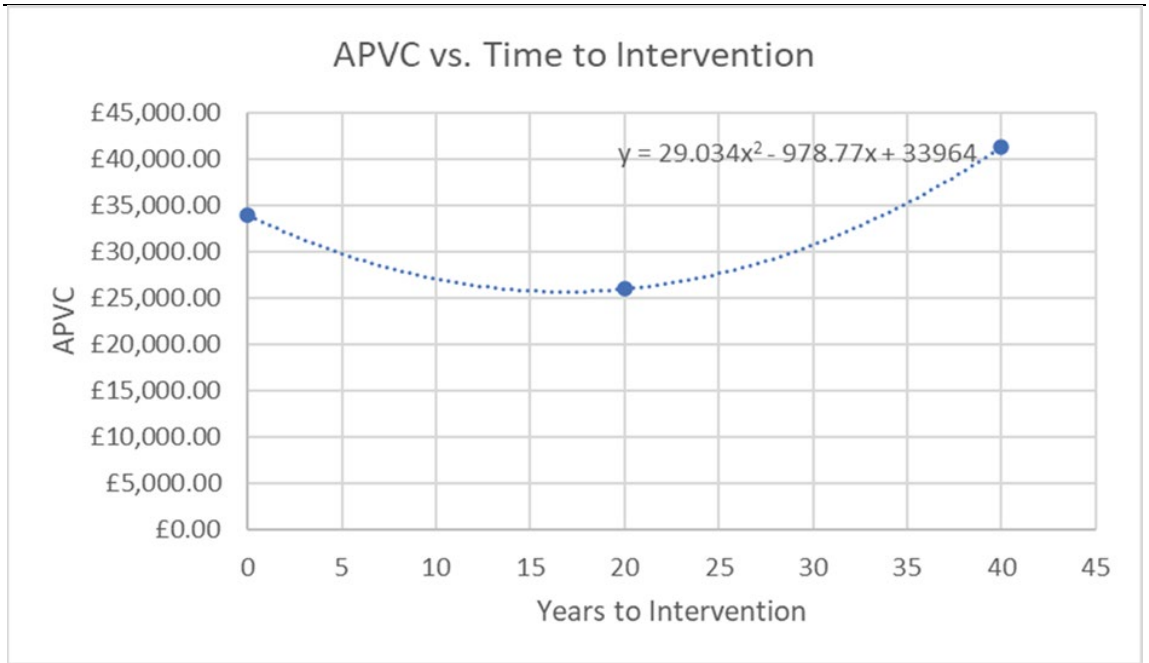


Figure 3: Annualised PVC vs. Time to Intervention

This result is 'spuriously precise', and further work, including additional data and 'real-world' validation, is required in this area. However, it provides a potentially useful approach for Network Rail and other IMs, enabling the planning of least-whole-life-cost interventions for earthworks (and possibly other) assets that are not yet visibly failing or in need of immediate attention. Network Rail operates in five-year financial 'Control Periods' (CPs), and improved knowledge of the CPs in which the most cost-effective asset interventions can be made would help with the asset management and funding processes. It would also reduce asset whole-life costs and thus increase the total asset condition improvement that can be achieved for a given level of funding, helping to meet the objectives of Network Rail's Earthworks Policy, set out above.

Probabilistic analysis

In practice, and as noted above, there is considerable uncertainty about the TTFs and serviceable lives of individual earthworks assets. These vary considerably with geometry and geology, as well as reflecting the inherently unpredictable lifespans of earthworks, in contrast to steel and concrete structures, for example. The age of many railway earthworks, dating back to the nineteenth century, again means that their standards of design and construction were quite primitive compared with modern standards [7], introducing further uncertainty. For these reasons, a probabilistic approach to economic assessment is required, based upon the range of TTFs predicted by the simulation and statistical emulation work undertaken in ACHILLES' SaM workstream. The probability

density function (PDF) of 10,000 Monte Carlo-derived year of failure (YOF) outputs for a cutting slope on the GWML near Swindon is shown in Figure 4 (the YOF is obtained by adding the predicted TTF to the assumed initial construction year of 1836). In the case of this slope, failure appears most likely to occur in the late 20th/early 21st century.

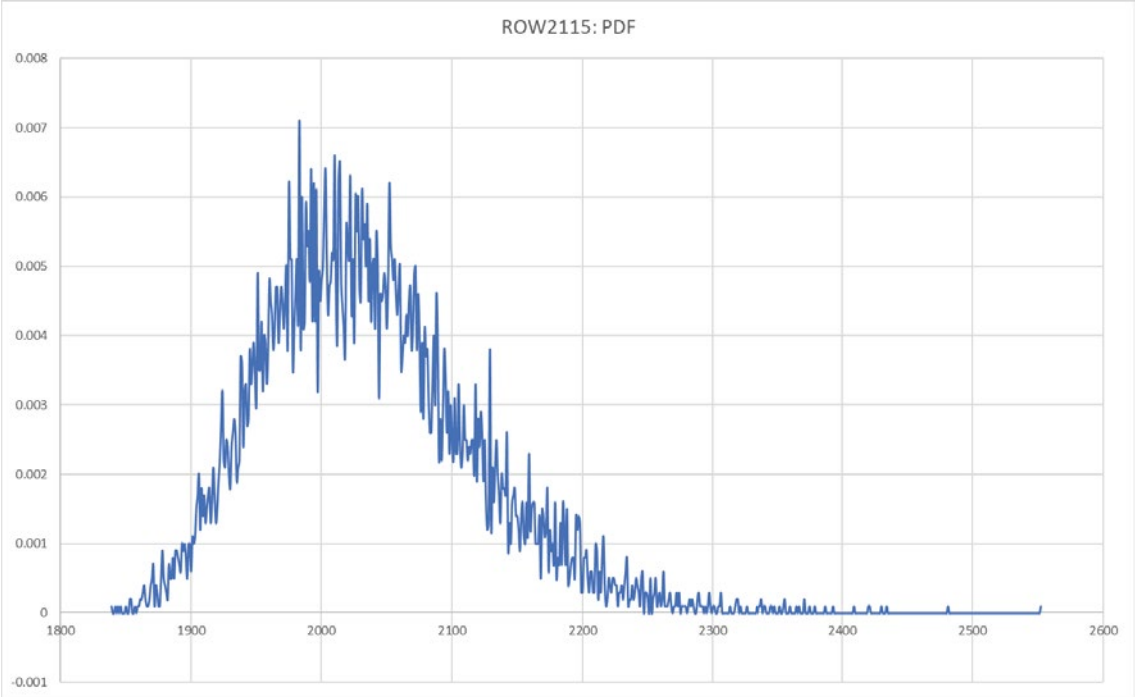


Figure 4: PDF of Predicted Years of Failure for a Cutting Slope

The cumulative distribution function (CDF) of the predicted YOF values for the same cutting slope is shown in Figure 5. This shows the increasing cumulative probability of failure over time, from a value of zero in the initial year of construction in 1836, to one in 2552 (the cutting slope in question is relatively low and shallow (height = 3.5m; slope angle = 16.3°), increasing its predicted TTF values). On the assumption that the asset has not yet failed or undergone a significant intervention, the YOF values between 2023 and 2552 were randomly re-sampled 10,000 times, and the re-sampled CDF of YOF values is shown with the initial CDF in Figure 6.

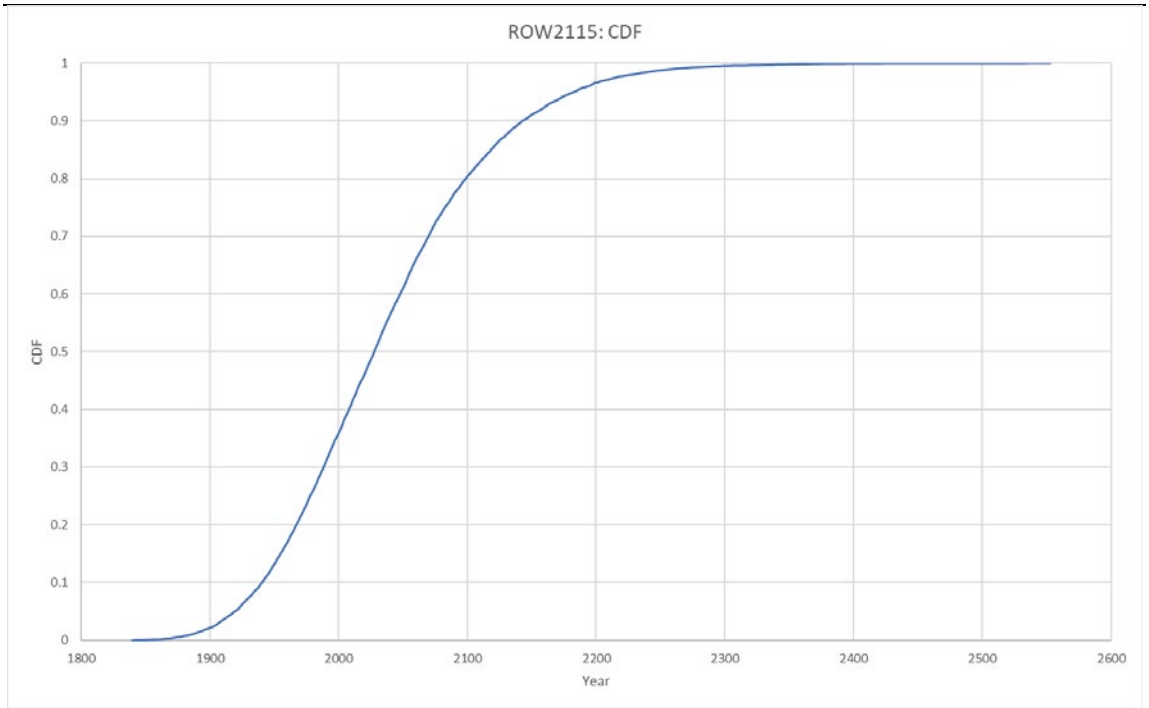


Figure 5: CDF of Predicted Years of Failure

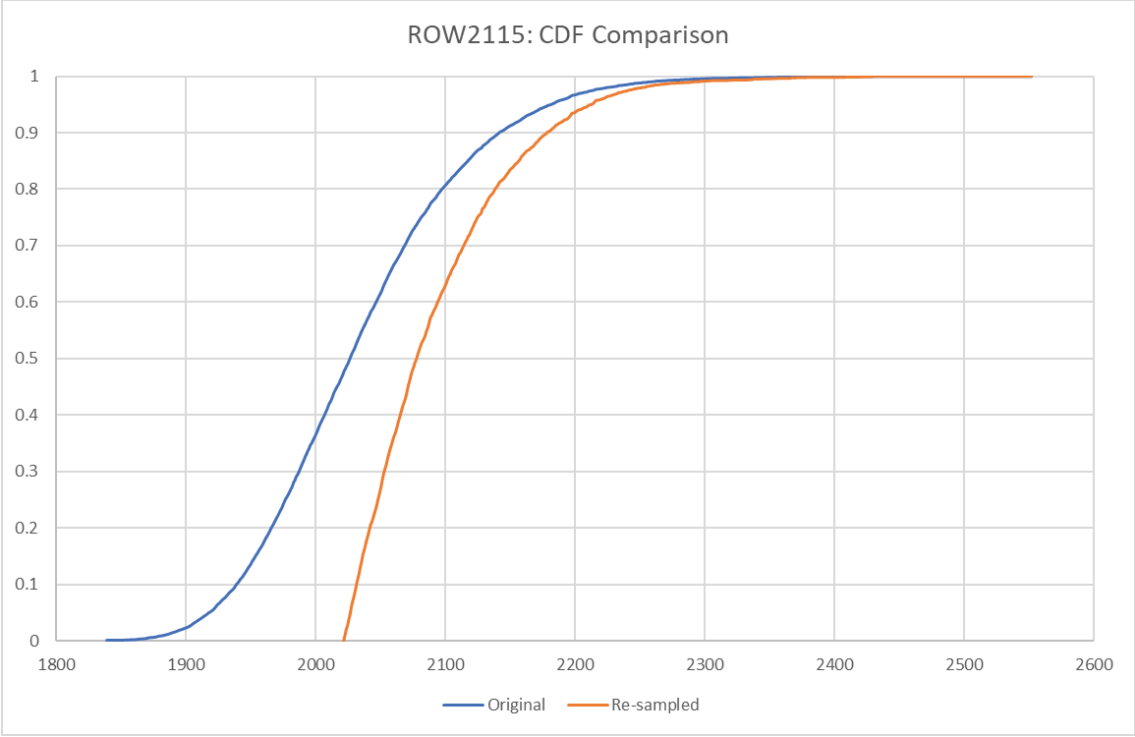


Figure 6: CDFs of Original and Re-sampled Predicted Years of Failure

The YOF CDF can be combined with the cost of an asset failure to calculate an (increasing) expected cost of failure over time. The probability of an asset not failing in

a given year (and thus of an intervention in that year being premature) is obtained by subtracting the cumulative probability of failure in that year from one, and multiplying this probability by the cost of intervention produces an expected intervention cost. The two sets of expected costs can be compared to identify the time at which the expected failure cost equals and exceeds the expected cost of intervention, indicating the economically optimal intervention time. The results of these calculations, based on the same discount rate and assumed costs of failure and intervention as used in Table 1, are shown in Table 2. It can be seen that the expected cost of failure first exceeds the expected cost of intervention in 2032, during Network Rail's Control Period 8 (CP8: 2029-34).

Table 2: Expected Costs of Failure and Intervention over Time

Intervention Year	Control Period	Cumulative P(Failure)	P(Premature Intervention)	Exp. Cost of Failure	Exp. Cost of Intervention
2023	CP6	0.0102	0.9898	£102,000	£989,800
2024	CP6/7	0.0204	0.9796	£204,000	£979,600
…					
2031	CP8	0.0898	0.9102	£898,000	£910,200
2032	CP8	0.1012	0.8988	**£1,012,000**	**£898,800**
2033	CP8	0.1111	0.8889	£1,111,000	£888,900
…					
2040	CP10	0.1809	0.8191	£1,809,000	£819,100
2041	CP10	0.1893	0.8107	£1,893,000	£810,700

These results are plotted in Figure 7, and Table 3 shows the additional results of the application of discounting to the expected failure and interventions costs, although this does not change the indicated timing of economically-optimal intervention.

The difference between the expected costs of intervention and failure to the left of the intersection point in Figure 7 represents the 'opportunity cost' of intervening too early, when the investment funds could perhaps be more beneficially deployed elsewhere. To the right of the intersection point, the difference represents the rapidly-increasing expected costs of failure that could be avoided by intervention, with the necessary funding again more productively spent on preventive rather than reactive works, consistent with the aims of Network Rail's Earthworks Technical Strategy [8].

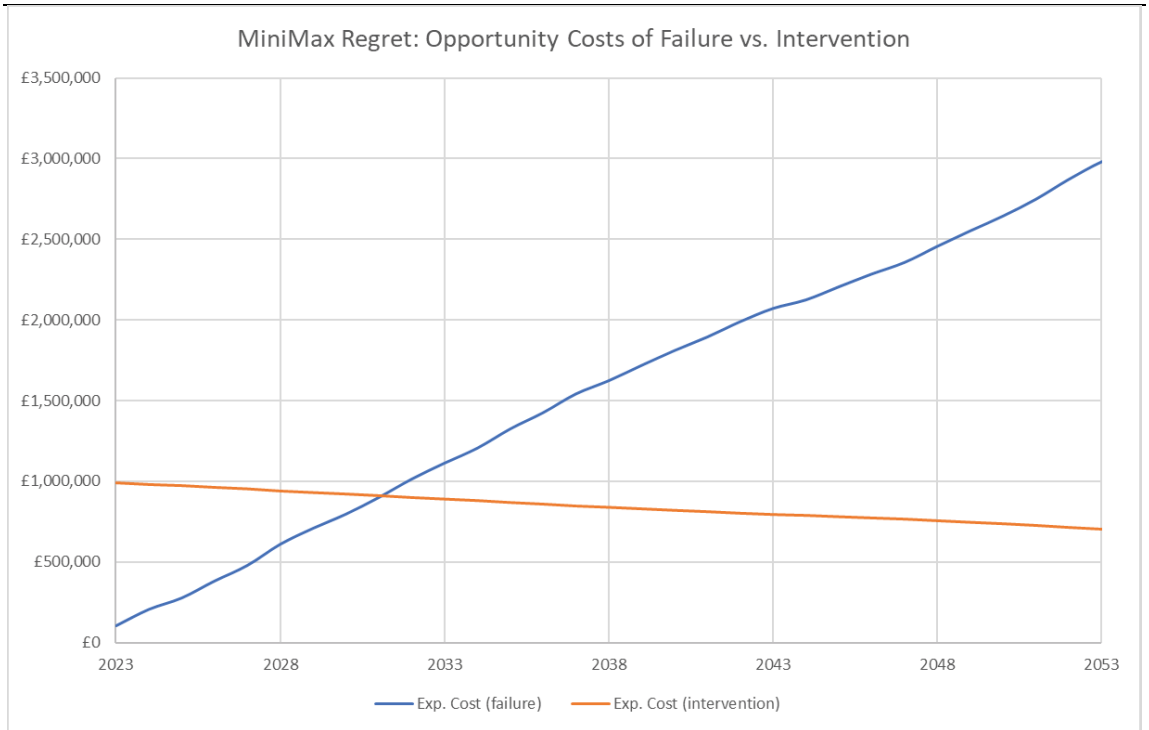


Figure 7: Expected Failure and Intervention Costs over Time

Table 3: Expected Undiscounted and Discounted Costs of Failure and Intervention

Intervention Year (CP)	Exp. Cost of Failure	Exp. Cost of Intervention	Exp. Disc. Cost of Failure	Exp. Disc. Cost of Intervention
2023 (6)	£102,000	£989,800	£102,000	£989,800
2024 (6/7)	£204,000	£979,600	£198,058	£951,068
…				
2031 (8)	£898,000	£910,200	£708,889	£718,520
2032 (8)	**£1,012,000**	**£898,800**	**£775,614**	**£688,855**
2033 (8)	£1,111,000	£888,900	£826,688	£661,425
…				
2040 (10)	£1,809,000	£819,100	£1,094,475	£495,569
2041 (10)	£1,893,000	£810,700	£1,111,938	£476,201

This approach, aiming to intervene when (or shortly before) the declining expected costs of intervention equal the increasing expected costs of failure, is similar to the 'minimisation of maximum (or minimax) regret' approach to decision making under conditions of uncertainty [19]. Interestingly, the optimal intervention time appears to occur when the value of the CDF equals the ratio of intervention costs to failure costs. It can be seen from Figure 7 that higher expected costs of failure (for example, on busier

routes) and/or lower expected costs of intervention justify earlier intervention, while lower expected failure costs and/or higher expected intervention costs justify the deferment of intervention.

As noted above, the cutting slope used in this example is quite small and has a relatively shallow slope and so also has quite long predicted TTFs – as a whole, and assuming none of the slopes have already failed, the equivalent analysis of all the modelled cutting slopes along the route indicates that most require imminent intervention to minimise their expected WLCs. Further work is needed (in the absence of detailed data on previous failures and interventions) to categorise the assets by their expected TTFs and develop the methodology further.

5 Conclusions

Transport and other vital infrastructure in Britain and around the world depends on extensive systems of earthworks. These are of varying age and quality of original construction, are subject to processes of natural deterioration, and are increasingly vulnerable to the effects of climate change. Railway cuttings and embankments, having mostly been built in the 19th century and to relatively primitive engineering standards, are particularly prone to the effects of deterioration and climate change.

The ACHILLES research programme addresses many of the challenges faced by the owners and maintainers of earthworks assets. It provides improved understanding of earthworks deterioration processes and asset performance, with and without interventions, and is developing geotechnical and economic forecasting and decision support capabilities needed to maintain earthworks in a safe and serviceable state in a cost-effective manner. The programme is consistent with Network Rail's increasingly proactive approach to infrastructure maintenance and renewals, and its workstreams meet several of the objectives set out in Network Rail's Earthworks Technical Strategy [8].

A methodology has been developed, based on assumed intervention and failure costs, to identify the timings of earthworks interventions that minimise asset whole-life costs (WLCs). A deterministic approach was initially used, based on assumed known times to failure (TTFs) under different scenarios, and this was subsequently extended to include a probabilistic approach, based upon a large number and range of simulated TTF values, to identify the intervention timing that optimises the trade-off between the expected costs of intervention and the expected costs of failure as these change over time. Work is ongoing to extend the approach to include equivalent data for embankments and to identify a preferred whole-route intervention strategy.

Acknowledgments

ACHILLES is funded by the UK Engineering and Physical Sciences Research Council (EPSRC). The authors are also grateful to their colleagues on the ACHILLES research programme for their input and support.

Literature

[1] ACHILLES (2023): *Welcome to ACHILLES* [online]. Available from https://www.achilles-grant.org.uk/ [Accessed 5 September 2023]

[2] Dijkstra, T., Dixon, N., Crosby, C., Frost, M., Gunn, D., Fleming, P. and Wilks, J. (2014): *Forecasting infrastructure resilience to climate change*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport 167:5, pp269-280

[3] Network Rail (2021): *Resilience of rail infrastructure* [online]. Available from Stonehaven - Network Rail [Accessed 7 September 2023]

[4] Rail Accident Investigation Branch (2022): *Derailment of a passenger train at Carmont, Aberdeenshire 12 August 2020* [online]. Available from R022022_220310_Carmont.pdf (publishing.service.gov.uk) [Accessed 7 September 2023]

[5] RailTech.com (2023): Deutsche Bahn reopens railway section damaged in 2021 flooding [online]. Available from Deutsche Bahn reopens railway section damaged in 2021 flooding | RailTech.com [Accessed 7 September 2023]

[6] Geoengineer (2023): *Train derailed in Sweden after embankment gets washed away by rain* [online]. Available from Train derailed in Sweden after embankment gets washed away by rain | Geoengineer.org [Accessed 7 September 2023]

[7] Briggs, K.M., Loveridge, F.A. and Glendinning, S. (2017): *Failures in transport infrastructure embankments*. Engineering Geology, vol. 219, pp.107–117 https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.07.016

[8] Network Rail (2018): *Earthworks Technical Strategy* [online]. Available from https://www.networkrail.co.uk/wp-content/uploads/2018/07/Earthworks-Technical-Strategy.pdf [Accessed 5 July 2021]

[9] DfT (2014): Transport Resilience Review: *A review of the resilience of the transport network to extreme weather events* [online]. Available from Transport Resilience Review (publishing.service.gov.uk) [Accessed 7 September 2023]

[10] Svalova, A., Helm, P., Prangle, D., Rouainia, M., Glendinning, S. and Wilkinson, D.J. (2021): *Emulating computer experiments of transport infrastructure slope stability using Gaussian processes and Bayesian inference*. Data-Centric Engineering. vol. 2(12) https://doi.org/10.1017/dce.2021.14

[11] AECOM (eds.) (2021): Spon's Architects' and Builders' Price Book 2021. Boca Raton: CRC Press.

[12] Building Cost Information Service (2023): BCIS Schedule of Rates [online]. Available from https://bcis.co.uk/product/schedule-of-rates-bcis/ [Accessed 12 September 2023]

[13] Network Rail (2023): Open data feeds [online]. Available from Open data feeds - Network Rail [Accessed 12 September 2023]

[14] Rail Delivery Group (2020): About the Passenger Demand Forecasting Handbook [online]. Available from https://www.raildeliverygroup.com/pdfc/about-the-pdfh.html [Accessed 12 September 2023]

[15] DfT (2021). Transport analysis guidance [online]. Available from Transport analysis guidance - GOV.UK (www.gov.uk) [Accessed 12 September 2023]

[16] Rouainia, M., Helm, P., Davies, O. and Glendinning, S. (2020): *Deterioration of an infrastructure cutting subjected to climate change*, *Acta Geotechnica*, vol. 15(10), pp. 2997–3016 https://doi.org/10.1007/s11440-020-00965-1

[17] Ewen, J., Parkin, G. and O'Connell, P.E. (2000): *SHETRAN: Distributed River Basin Flow and Transport Modeling System*, Journal of Hydrologic Engineering, vol. 5(3), pp. 250–258 https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2000)5:3(250)

[18] Itasca (2016): *Fast Lagrangian Analysis of Continua v. 8.0 - User's Guide*, 6th edition. Minneapolis: Itasca Consulting Group Inc.

[19] Winston, W.L. (2004). *Operations Research: Applications and Algorithms* (4th ed.), Belmont: Brooks/Cole – Thomson Learning

Authors

Armstrong, John

John Armstrong is a Senior Research Fellow at the University of Southampton's Transportation Research Group. He works primarily in railway operations planning and analysis, and in engineering economics.

Preston, John

John Preston is Professor of Rail Transport at the University of Southampton. His work in rail is focussed on demand forecasting, cost estimation and operations planning.

Preferred language of presentation: English

Presenter: John Armstrong

Session 3
Joanna Maria Kiepiela, Thomas Benjamin Frogner

Bane NOR's utilisation of condition evaluation for data-driven renewal planning

Kiepiela, Joanna Maria; Frogner, Thomas Benjamin

Bane NOR

Summary

Bane NOR is employing data-driven asset management to evaluate the condition of its network at the Asset level for quantitative Renewal Planning. The Asset condition is defined as a *Total condition grade*, which aggregates Key Performance Indicators (KPIs) according to Asset type specific logic for the *Substance, Availability* and *Safety* of individual Assets.

The evaluated portfolio data is used as foundation for quantitative renewal planning. The portfolio is filtered to renewal-relevant items and where necessary aggregated to compound renewal items. Criteria are defined for which assets should be considered for renewal and then an algorithmic prioritisation considering e.g., condition and traffic, is executed. Available funding is allocated based on priority until exhausted, producing a fully algorithmically generated renewal plan. Manual refinement with experts is then applied to consider special conditions and localised strategies. At the end of this, a renewal plan is created that is then submitted for approval and operationalisation.

Keywords: IRSA, Infrastructure management, Infrastructure quality, Infrastructure condition, Renewal planning, Network condition evaluation, Data-driven asset management, Funding requirements, Life cycle management

Session 3
Joanna Maria Kiepiela, Thomas Benjamin Frogner

1 Data-driven renewal planning

Bane NOR, the national railway of Norway, manages a network of € 47 billion[1] assets. Bane NOR is experiencing an increasing demand to renew and maintain their existing infrastructure assets. Contributing to this demand is aging infrastructure, increasing backlog, increasing construction prices, and the overarching motivation to support a sustainable modal shift to public transport, resulting in heavier utilisation of railway infrastructure.

Therefore, the total demand for expenditure in reinvestment of railway infrastructure is rising. To justify the need for scarce financial resources from funding bodies, Bane NOR has developed a data-based process for quantifying these renewal needs based on the condition of its network. The assets chosen for renewal are then reviewed by experts with local knowledge on how to bundle and execute renewal, e.g., depending on accessibility of track. The link between the data based KPIs that measure the current condition of the infrastructure and the identification and prioritisation of assets for renewal financing provides Bane NOR with a consistent and strategic renewal plan.

1.1 The InfraStatus Report

The outcome of the Network condition evaluation process is documented in Bane NOR's annual network condition report, the *InfraStatus Report* [1]. The report achieves transparency of network condition, as well as renewal and maintenance values and execution levels across the network. Executed across consecutive years, the value of the report lies in the generic methodology applied to asset data and ongoing data quality improvement projects. The report is available to the public and Directorate, by which strategy and utilisation of the *Total condition grade* is aligned with the Directorate requirements and Bane NOR's strategic goals, ensuring transparency of operational outcomes of the *National Transport Plan* (NTP). The alignment of the reporting basis and Renewal plan for the NTP is crucial to ensure that renewal strategies can be executed, and budget requirements explained.

1.2 Network condition and trends

Renewal planning is the initial viability modelling of *condition-based* Network requirements and current operations considering demonstrated production.

Investment horizons are aligned with the *National Transport Plan* (NTP) at 4 and 12 years, while methodologies to forecast renewal and maintenance are based on the current portfolios'

[1] Exchange rate as of July 31, 2023: 1 NOK = 0.09 EUR

requirements up to 40-years. In planning, the *condition-based* forecast is primarily constrained according to renewal capacity limitations and allocated NTP budget. Assets are renewed until resources are depleted and renewal peaks are dispersed within the horizon for effective management.

The network *Total condition grade* for 2022 was 2.0, meaning *Good* overall condition across a network worth € 47 billion [1]. This is an aggregated *Total condition grade* and is therefore the replacement-cost weighted aggregation of all assets' condition grades. To gain an understanding of the upcoming renewal requirements and funding needs, a more precise picture of the condition of assets is needed. Assets with a *Total condition grade* of 3 or worse are considered as having *Adequate* or worse condition today (totalling a replacement cost of € 10 billion) and should therefore be prioritized for renewal over the next 12 years. If condition-based renewal is not executed, the renewal need volumes will accumulate due to overaged assets, and the probability of breakages and failures across the network will also rise.

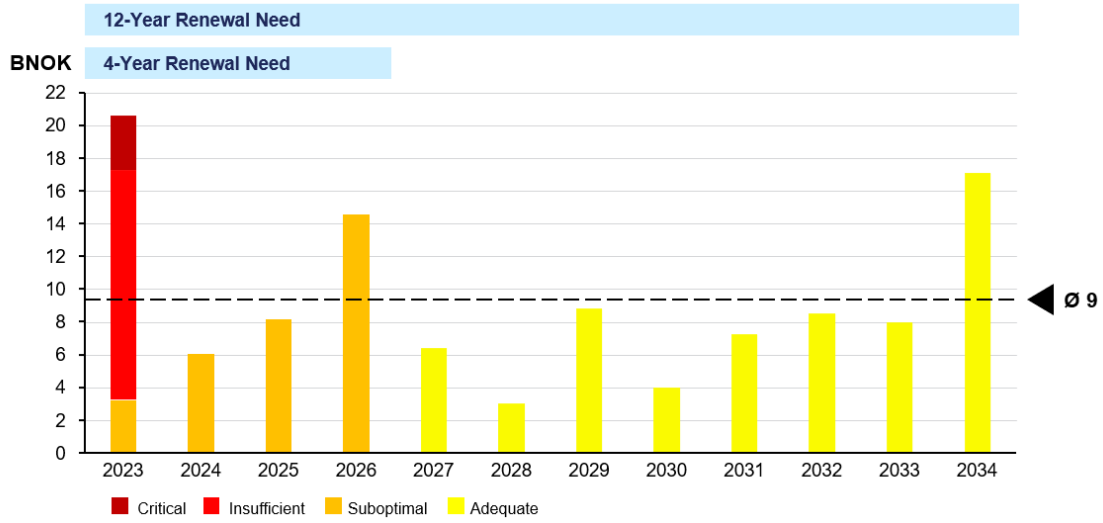


Figure 1: Expected Renewal Need (in Billion NOK) according to 2022 condition

2 Renewal planning overview

The Network condition evaluation defined as "*InfraStatus*" is an annual assessment of the operative infrastructure assets of the national railway. The definition of asset condition primarily depends on its ability to serve its function in accordance with specified Asset type requirements. The evaluation represents the interpretation of this at a strategic level and

therefore considers elements of performance, asset technical requirements, asset lifecycle, Network utilisation, inspection results, functionality updates and maintenance levels of all existing infrastructure. All are considered as part of the *condition-based* definition.

For these elements, Key Performance Indicators (KPIs) are selected and interpreted for each individual asset according to the *Substance, Availability*, and *Safety* and aggregated to a *Total condition grade*. Therefore, KPIs are understood in relation to each individual asset, its lifecycle and properties, and not as universal Network KPIs[2]. The evaluation is dependent on the accuracy of condition data, asset information and the connection of Network utilisation data to assets that usually disparate data sources containing relevant information for overall condition trends are evaluated in a systematic and comparable way across all assets within the portfolio.

The *Total condition grade* further forecasts future requirements and management challenges based on asset condition and asset categorisation of lifecycle impacting criteria, e.g., build type, load, and train frequency. To enable this, estimations of asset inventory in terms of Total replacement cost, quantities, and Technical/ Life-Cycle-Cost Optimal lifetimes are undertaken beside an evaluation of Network utilisation.

2.1 Total condition grade

InfraStatus models condition based on KPIs evaluated for each individual asset and graded according to an index of 1-6 with an Asset type specific metric logic, but universal *Total condition grade* meaning. Each grade directly relates to a condition class of *Very good – Critical*, which also indicates required condition interventions e.g., Preventative maintenance or Imminent renewal. Asset condition and deterioration is therefore classified at a very high level of abstraction among a finite set of possible classes, making it suitable for a strategic analysis comparable across assets with varying technical functions and lifecycles. The *Total condition grade* translates into an intervention year for renewal allowed by the condition evaluation method.

[2] A Network KPI is a value that can indicate overall performance but not in relation to the causal asset. If a location generated 10 hours of delay this would be the Network KPI. If the causal assets were a Bridge (1 hour delay) and an Interlocking (9 hours delay), it could still be concluded that the Bridge is in a more *Critical* condition than the Interlocking, due to the Asset type properties which interpret delay as a condition KPI.

CONDITION		DESCRIPTION	GRADE SPECIFICATION	MEASURE	HORIZON
CLASS	GRADE				
Very Good	*1,0 ≤ G < 2,0*	Assets that are new or as good as new and **have no or only insignificant impairment** in all *Quality Aspects.*	*Very Good* condition: a combination of a) very few hours of delay *and/or* b) Planned preventative maintenance activities *and/or* c) long probable remaining lifetime	Strategic planning of preventative maintenance measures	Long-term
Good	2,0 ≤ *G* < 3,0	Assets that are new or as good as new and have **minor impairments** in Quality Aspects.	*Good* condition: a combination of a) few to moderate number of hours of delay *and/or* b) Planned preventative maintenance activities *and/or* c) relatively long probable remaining lifetime	Strategic planning of preventative maintenance measures	Mid-term
Adequate	3,0 ≤ *G* < 4,0	Assets that have **moderate impairments** in one or more Quality Aspect**.** The **asset should be considered within strategic renewal decision making** as the asset will be exhausted within 12 years based on its current condition/non-fulfilment of requirements/lifetime.	*Adequate* condition: a combination of a) moderate number of hours of delay *and/or* b) Planned preventative maintenance moderate amounts of corrective maintenance activities *and/or* c) relatively short probable remaining lifetime	Strategic planning for renewal work, cause of condition state should be identified.	12 years
Sub-optimal	4,0 ≤ *G* < 5,0	The asset **has severe impairments in one or more** *Quality Aspects* and needs to be renewed within 4 years. There is an **increased probability of high follow up cost, operational impacts, non-fulfilment of defined requirements** and/ or the asset is near the end of lifecycle and renewal should be planned.	*Suboptimal* condition: a combination of a) moderate to high number of hours of delay *and/or* b) significant amounts of invasive and/or urgent maintenance activities *and/or* c) relatively short probable remaining lifetime	Planning and budgeting for scheduled renewal work. Assessment planned for condition cause	4 years
In-sufficient	5,0 ≤ *G* < 6,0	The asset is rated insufficient in one or more quality aspect. It can **impair operations, cause high subsequent expenditure, does not fulfil its defined requirements** and/or may have exceeded its lifetime.	*Insufficient* condition: a combination of a) a very high number of hours of delay or persistent Slow zones *and/or* b) significant amounts of invasive and/or urgent maintenance activities *and/or* c) probably no remaining nominal lifetime	Conducting renewal work	0 years
Critical	*G = 6*	The asset had a Critical impairment with a potentially severe impact on operation and Safety. Remedial measures were undertaken. All critical incidents are managed within the report year.	*Critical* condition: Assets involved in incidents linked to safety-critical failures	Scheduled immediate interventions of required maintenance	0 years

Table 1: Condition grade class definitions

2.2 Condition methodology

All data processed for the condition evaluation is analysed at the asset type level. Therefore, a generic and consistent asset hierarchy which reflects the underlying components and master objects of an asset type is considered during analysis and KPI assignment. Assets are then grouped into 58 Asset types, 7 Asset clusters, that can be aggregated to the complete Network [1].

Each total grade of an individual asset is weighted by its replacement cost. The weighting of each asset's *Total condition grade* by its replacement cost ensures reporting and requirements for renewal are aligned, always referring to the replacement cost of the assets. This weighting also allows more expensive assets (such as a bridge) to have more value at the network level when it comes to planning for and funding interventions.

The total grade of the network (2.0 in 2022, meaning *Good* [1]), is a replacement cost-weighted aggregation of each asset's *Total condition grade* included in the network. How an asset's *Total condition grade* is calculated depends on the suitability of data sources available at Bane NOR to be utilised for condition KPIs.

All assets have a *Total condition grade*, which is calculated from a unique translation of KPIs through Grade metrics into individual grades suitable to the type of asset and the data. These individual grades are grouped into categories, namely *Substance*, *Availability*, and *Safety,* which are all weighted together into the Total grade. This generic approach along with the replacement cost weighting is used across the network to enable comparability between a wide variety of asset types.

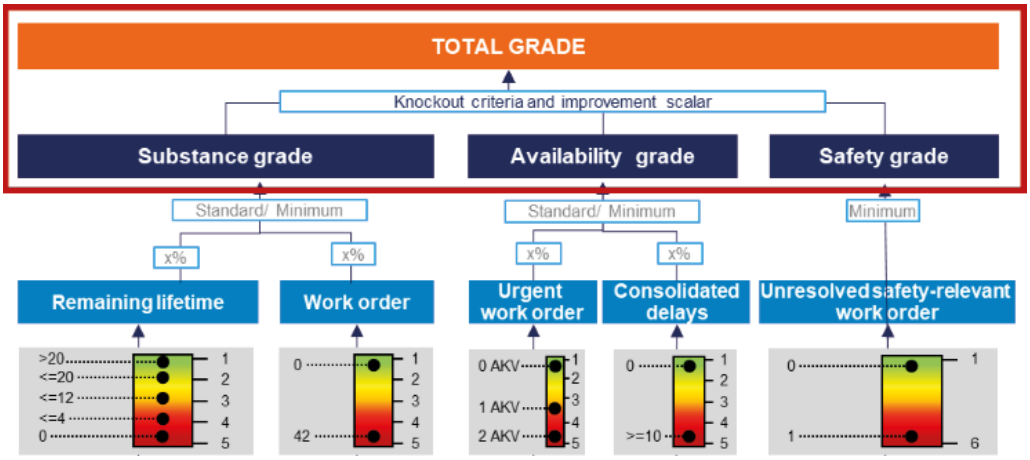


Figure 2: Example calculation from KPIs to Total condition grade for an individual asset

2.3 Renewal planning

Renewal planning is the utilisation of the *Total condition grade* into an investment horizon aligned with the *National Transport Plan*. This is accomplished through the translation of the grade into a renewal year, which allows the renewal plan to be aligned with asset condition, the *InfraStatus* report, and each Asset type comparable in terms of Network condition-based renewal need.

For example, all assets with a grade 3 or worse are considered to have *Adequate* or worse condition today and should be considered for renewal within the upcoming 12-year period.

Within Renewal planning, the condition-based requirements are allocated for renewal according to highest priority until resources are depleted and renewal peaks are dispersed within the horizon for effective management. Renewal planning begins to consider further renewal elements as part of strategic asset management.

Optimisations triggered by Lifecyle Management (LCM): Economic reasons (efficiency improvement and rationalisation), changes to traffic needs or to minimise implementation effort.

Proportion of renewal on expansions financed by special funding: Asset must be modified or replaced early due to an expansion measure financed by special funding.

Expansion work: Asset must be modified or replaced early due to an expansion measure.

Structural deficiencies: Structural deficiencies are widespread defects in installation structure or functionality. They arise if the installations have been built to faulty designs over a period of several years or if there is a change to an important requirement applicable to the installations.

Localisation: Early renewal of assets within a given location due to benefits of effort or economies of scale

Functionality: Functionality requires a comprehensive requirements management to be further incorporated into the lifecycle management of the Bane NOR portfolio. While preliminary results are part of the condition analysis, further model requirements such as future load implications on the Renewal Plan are not able to be incorporated due to limited data. Understanding the *Functionality* as well as the *Total condition grade* is important for Renewal planning.

3 Data requirements

All data is required at the individual Asset object level, as the assessment is required for each individual asset before aggregation to allow for Network evaluation.

The risk of poor condition, or the rate of deterioration, varies throughout the lifecycle as assets respond to other assets, the environment, and depreciate over time. Lifecycle management considers an asset's complete lifecycle, from installation and maintenance, monitoring of condition to renewal. Risks of poor condition should be best mitigated and deterioration rates should be managed in an economically optimal manner. The data requirements for the analysis consider Master data, including Strategic maintenance plans, and Unit costs, Condition data and further required parameters to evaluate economic lifetime assessments and asset *condition* as a basis for the renewal plan.

Asset description: Asset data is static and required for parameters relating to an asset's lifecycle, such as install date, location, and type. The combination of criteria such as Sleeper type and build type are inputs for Lifetimes and determine strategic maintenance plans. In addition, asset data is required for *Functionality* analysis e.g., ERTMS compatibility.

Asset utilisation: This is dynamic data and can change over time. Load, train speed and frequency are all dynamic parameters that affect an asset's lifecycle. Elements of this information are used for planning prioritisation and *Functionality* capacity changes.

Intervention scope: Details all viable interventions for a given Asset type in the form of maintenance and renewal/ refurbishment activities. Intervention scope should also incorporate an understanding of unit cost, effort, and planning requirements of activities.

Asset criticality: This information is a factor which moves the *condition-based* requirements into strategic management for implementation at the operative level. The criticality of an asset in terms of prioritisation as well as criticality of intervention scopes e.g., when the alternative to renewal has an equivalent Life-extending-maintenance measure or a mitigation measure, is considered.

Funding scenarios: Planned or theoretical budgets on a per-year basis will be reviewed, including scenarios of budget allocation to different assets. As part of lifecycle management development, the output in terms of corresponding maintenance requirements for funding scenarios will be generated as part of future reports.

3.1 Master data

The *InfraStatus* database is generated using data sourced internally at Bane NOR. This includes Inventory data, Age, Size and Technical lifetime for each individual asset.

3.2 Condition KPI's

Infrastructure *condition* is a data-based analysis that relies on the quality of the data sources. Changes in the evaluation logic or input data structure can impact the comparability of results across years. All logic and data updates improve the *condition* overview and are not intended to disregard previous best-knowledge.

Maintenance data: Includes maintenance activities performed on the assets, reflecting the implemented maintenance plan. Failures or action limits generally form the basis for maintenance activities being triggered e.g., work orders.

Performance data: Maintenance measures on an asset reflect part of the performance at a specific time. At Bane NOR, performance failures often depend on the operation of the track. A technical failure, for example, will result in delays only when it affects train operations.

Condition data: Condition is a continuous event. Two comparable assets – one that is well-used and one that is new – may have the same performance. However, the condition of the assets may be different.

The process of defining KPIs for the assessment of asset condition began 5 years ago as a collaborative process with Bane NOR's asset type experts. The KPIs used must be quantifiable, data-driven, and relating to the asset's condition. Some examples of KPIs include the number of slow zone days caused by an asset within the year, the number of workorders, or the years remaining in an asset's lifetime. The parametrisation of the metric and the utilisation of relevant data sources are reviewed annually to ensure they are up-to-date and methodologically correct. Once per year, the data for the most recent reporting year is frozen in a centralized database, and the asset type experts are invited to inspect the data inputs as well as validate the results after grades have been calculated and allocated into the asset hierarchy.

The grade scheme provides a uniform analysis to express the KPIs and their values in terms of absolute and standardised values from condition classes 1 to 6. For its *Total condition grade* calculation, each individual asset has individual grades calculated according to the grade scheme for each relevant KPI. The grade scheme aggregates all KPI values of individual asset into one *Total condition grade*. The method of aggregation, first to quality aspects (*Substance*,

Availability, *Safety*), allows for further condition-indicating grades at more detailed analysis levels.

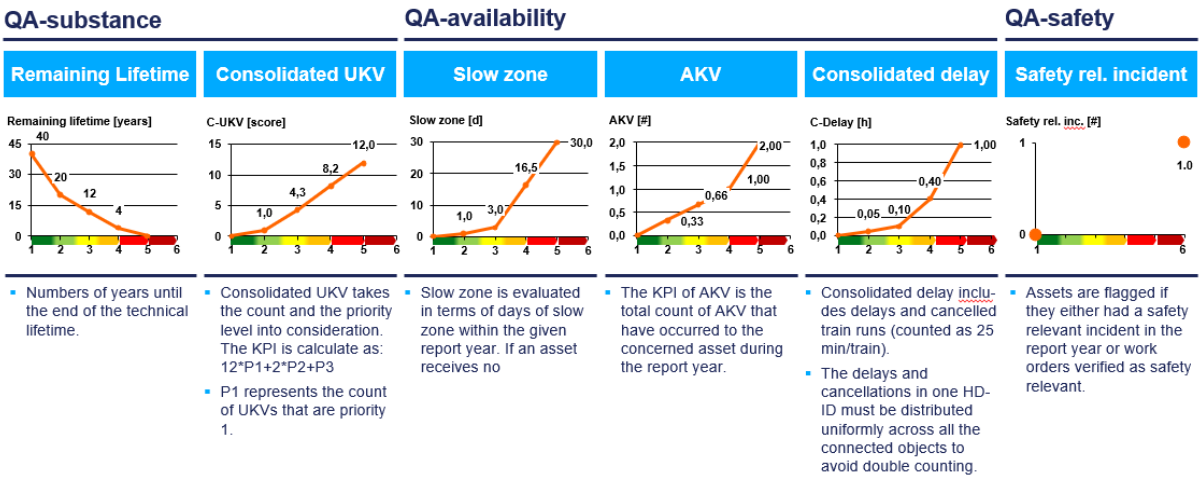


Figure 3: Example grade metrics used for Substance, Availability and Safety KPIs

3.3 Further required parameters

In addition to the Master data, individual assets have calculated parameters for the evaluation according to Asset characteristics or Economic data. Each individual asset according to Asset type has Strategic maintenance plans, which require allocation criteria e.g., “Average daily load”. Unit costs for renewal and maintenance actions are allocated according to Renewal objects e.g., the “Build type” of an asset or the required maintenance activity. This data is assigned to individual assets and further calculated according to asset size. From this information the Life-Cycle-Cost optimal lifetime and asset renewal cost is calculated.

The renewal planning process also allows other non-condition data to be considered for the allocation of renewal funding. These parameters can be based not only on asset management expertise, but also come from strategic goals directed by management.

One example of a parameter chosen by Bane NOR in its consideration of assets for renewal include the line priority allocated to that asset, which indicates how high of a priority that line is to the network. Those assets with a higher line priority are given a higher prioritisation score in the algorithm that assigns renewal funding. Traffic metrics are also used to contribute to an asset’s total prioritisation score. These include both the daily train count and the load of an

asset's location, as these metrics contribute to how quickly an asset degrades and how critical it is to the network.

As long as the data exists, such parameters defined as relevant for renewal beyond condition can be included in the prioritisation scoring and therefore the allocation of renewal funding to an asset.

3.4 Data quality and data capturing

The data processing of condition data from all assets in the portfolio is reviewed through a data quality framework that includes blacklisting and error handling for various types of data quality issues. There are also ongoing data quality improvement projects at Bane NOR, which are expected to improve the model's input data over time. In addition to improving the asset data quality, other data capture projects are being pursued at Bane NOR, such as the collection of maintenance and renewal project data to improve understanding of maintenance and renewal unit costs across interventions and asset types. Investing in data capture and data quality both contribute to Bane NOR's long-term strategy of data-driven asset management.

4 Renewal planning process

Bane NOR has defined a renewal planning process that is based on the condition-considered renewal horizons of its assets. This approach provides the benefits of:

- Centralised and integrated approach to renewal planning process and consolidated renewal funding structure
- A data-based foundation for consistent and comprehensive budgeting
- Increasingly objective and complete maintenance and renewal planning
- Algorithmic basis for renewal planning based on prioritising assets with worst condition

In short, the process uses condition-based remaining lifetime assessment to determine renewal need, apply funding to these needs, and prioritise renewable assets according to a quantitative method before doing fine tuning with local experts. The combination of condition evaluation, unit costs, maintenance plans and a prioritisation algorithm allow renewal experts to forecast renewal funding need, undertake life cycle management based on actual asset condition, and plan renewal and forecast corresponding maintenance quantities. The iterative process of reaching a renewal plan proposal involves working with regional asset managers and operationalises the strategic condition-based result of assets suggested for renewal. This final step ensures that modelled results are refined according to local level and project specific requirements.

4.1 Renewal plan definition and base parametrisation

Each renewal planning cycle works with several baseline parameters that define basic characteristics.

As each planning cycle works ahead from a base year, the first step in defining a renewal plan is to therefore choose the year that the *InfraStatus* data comes from. This determines the pool of assets selected for evaluation, specifications such as location hierarchy, and asset condition grade.

Next, a "from year" and a renewal horizon is defined for the plan. These parameters define from which year the renewal budget will be distributed as well as for how many years.

A so-called relevance grade defines the condition grade threshold for budget allocation. For example, if a relevance grade of 4 is chosen, then all assets with a condition grade 4 or worse will be considered for renewal budget allocation; assets whose grade is better than 4 will not be allocated renewal funding by the algorithm. This is used to scale the renewal need and test different strategies, e.g., "renew only failing assets" or "renew assets pre-emptively if budget allows".

4.2 Generating renewal items

The next step is to generate the pool of assets that are considered during the renewal planning process, which are referred to as "renewal items". Renewal items can be either single objects as stored in the asset database, e.g., a single switch, or compound objects, e.g., all track objects within a given location.

Then, the asset hierarchy is finalised. This step includes both selecting which asset types are included in the plan, as well as allows for location-based aggregation of assets into compound renewal items. In alignment with the management's method of renewal planning, asset types can be aggregated to their locations to better reflect the reality of planning renewal for linear assets. For example, all track sections within a given location may be combined into a single compound renewal item to account for track renewal being planned for entire locations and not individual sections of a few metres each. Attributes such as condition grades or replacement cost of the individual items are then aggregated from the single object to the compound renewal item. At the end of this step, the renewal item portfolio for a planning cycle has been produced.

4.3 Renewal prioritisation

After the renewal plan is defined and the assets in the renewal portfolio are selected and aggregated, the prioritisation algorithm must be parametrised. The prioritisation algorithm ensures that assets are prioritised following a quantitative procedure and therefore chosen to receive renewal funding based on a predefined strategy including the condition of the assets and further criteria.

Each renewal item is assigned a prioritisation score based on several criteria. For Bane NOR's renewal planning process, the criteria included in the prioritisation algorithm include renewal item condition, line priority and the traffic KPIs daily tonnage and train count per location. It would also be possible to prioritise certain asset types or asset families dependent on the renewal strategy as the method and tool are built flexibly in this regard. The prioritisation process then starts with the highest scoring renewal item, assigning funding to it and reducing the available funding pool accordingly and then moves through all renewal items with descending priority score until the funding has been exhausted. The available funding levels are varied in different scenarios to evaluate the impact of budget cuts or increases on the plannable renewal projects.

The priority score is calculated in multiple steps. First, individual scores are determined within a priority group. These are e.g., indexed total tonnage and train count as individual scores within the priority group "traffic". These are combined into group scores and then into the total priority score as shown in Figure 4.

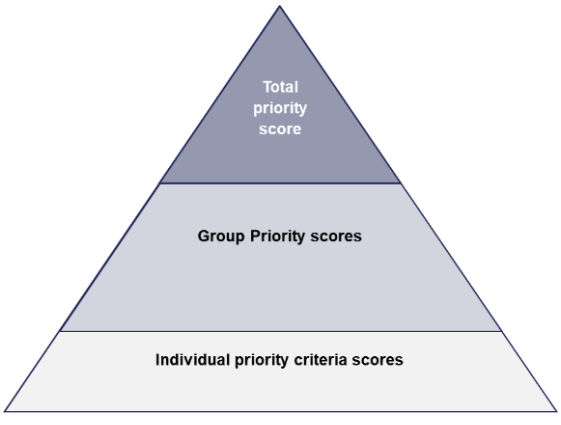


Figure 4: Priority score hierarchy

The calculation algorithm of the *Total condition grade* was first aligned with the *National Transport Plan* investment horizons. The renewal forecast interprets the grade of an asset in

relation to the *National Transport Plan* investment horizons at Bane NOR and calculates a per year renewal demand based on the asset condition. The investment horizons are described within the *Remaining lifetime* metric. This calculation can be interpreted in terms of quantity and renewal cost. It is defined that the forecast should be evaluated in relation to current production volumes which are determined according to a historical analysis of the asset type commissioning year information. Based on the condition grade evaluation, assets can be placed along a renewal horizon timeline so that assets with a worse condition are suggested first for renewal. Condition grades in alignment with remaining lifetime are calculated for each individual asset, meaning that the complete network result can be reported for transparency, while any subset of renewal horizon timeline and relevant asset types or locations have a plan defined.

4.4 Example

The process is illustrated using a hypothetical example in Figure 5. After the *InfraStatus* evaluation is completed, the results are loaded into the renewal planning system:

- The portfolio may contain the 12 assets consisting of bridges, switches, track sections and fire extinguishers.
- The first step would be to define the asset hierarchy and aggregation. Fire extinguishers may be removed because their cost is insignificant in the overall process, and they are managed operationally only. Track sections are aggregated by location to reflect the granularity of track renewal projects. This results in the 6 individual track sections being aggregated into two compound renewal items.
- Next, renewal thresholds are applied, whereby only renewal items with a condition grade of 4.0 or worse are considered for renewal. This further reduces the portfolio to only three renewal items. Also, priority scores are calculated for each renewal item.
- Finally, funding can be allocated. Assuming a total available budget of 90’000’000 NOK, 8’500’000 NOK are assigned to track 04 (having the highest priority score), followed by 80’000’000 NOK to bridge 992 (having the second highest priority score). At this point, there are only 1’500’000 NOK left in the budget and the next renewal item would be switch 345 with a replacement cost of 4’000’000 NOK. Because there is not enough budget remaining, the algorithm stops and switch 345 will remain unfunded.
- At the final stage, expert review may show that track in location 04 is planned for decommission in the near future and thus no more CAPEX should be invested. Track

04 is manually removed from the funding list and in its place, renewal of switch 345 can now be funded.

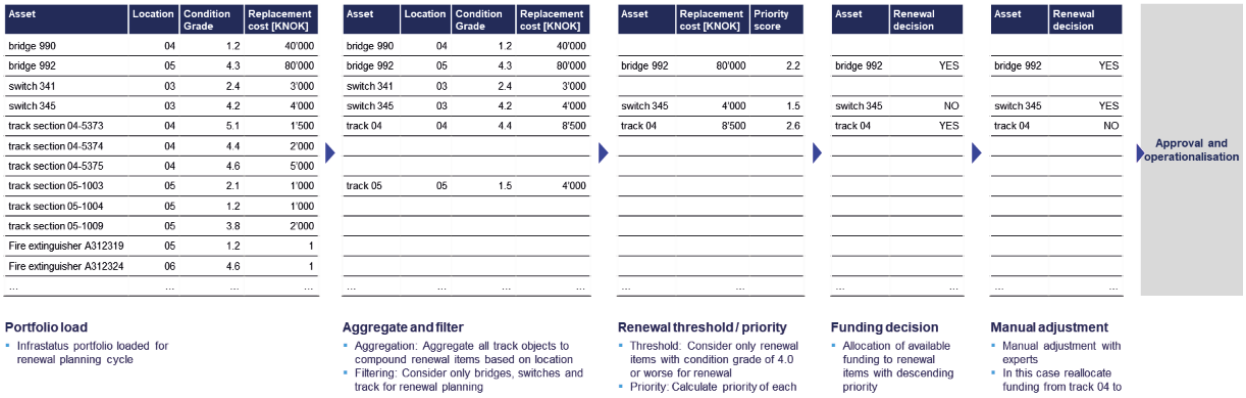


Figure 5: Example process for hypothetical portfolio

4.5 Targeted re-dimensioning

The final strategic element of the process is the targeted re-dimensioning. The renewal planning process up until now is based on filtering and a prioritisation algorithm, but in order to create a renewal plan that can be operationalised, manual adjustments based on already planned funding and investment projects must be considered. Two types of adjustments are carried out in this step: Cost changes and decision overrides.

Cost changes occur where the renewal need requirement of assets is changed from their standard replacement cost value used by the algorithm. This may occur because of upgrading of assets during renewal (e.g., renewing a bridge to a higher load class) or special conditions of an asset so that standard cost rates are not applicable (e.g., particularly difficult access to a construction site).

Decision overrides occur when the algorithm-generated decision is replaced by a manual one. For example, funding that is pre-determined in the short term (e.g., 2-year) period can be allocated directly to the chosen assets. This process will disqualify assets from also receiving funding from the algorithm. A further utilised method is to override the algorithmic prioritisation and ensure these assets do not receive any funding. Finally, renewal items may also be manually added to the pool, e.g., if a renewal item with a condition grade below the relevance grade should be considered.

The operationalisation of the output involves various experts and stakeholders from within the Bane NOR organisation. The method ensures that the initial foundation of decision making is aligned with the strategic and reported condition evaluation and replacement cost. Local expertise is utilised to verify the renewal plans, and manual changes are stored in the same database as the initial algorithm-produced result. The indispensable local knowledge of condition and needs is considered as well as the viable ability to execute recommended renewal based on factors such as access to tracks. Changes along with the reasons for changing the renewal decision can be monitored and integrated into the model in the future, to continuously improve the model-driven output.

5 Utilisation

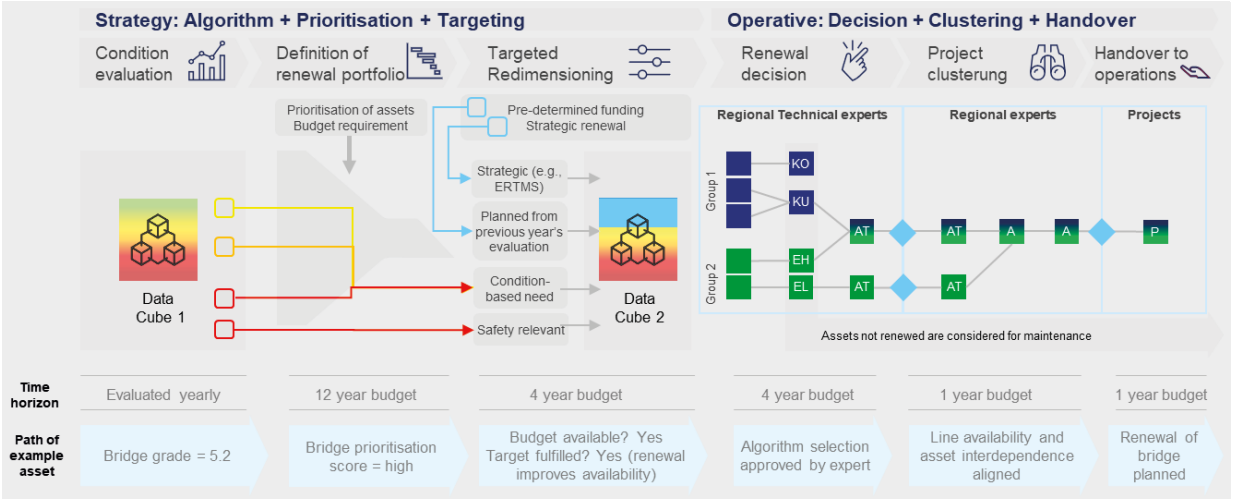


Figure 6: Renewal planning process

The algorithmic renewal planning process is set into the annual planning and reporting cycle at Bane NOR. On a high level, this process is illustrated in Figure 6. During the *InfraStatus* condition evaluation process, all assets are evaluated with respect to their expected remaining lifetime. The resulting data cube is the foundation for the renewal planning process. Then, the renewal planning cycle begins with the algorithmic prioritisation process, followed by the targeted re-dimensioning with the experts. After this step, the initial renewal is completed and then put the through decision, clustering, and operationalisation process.

Bane NOR also works with a methodology which forecasts renewal under budgetary and/ or technical constraints. The effect of limitations on renewal can then be observed on the

maintenance cost and quantity requirements of all assets with strategic maintenance plans and associated unit costs. This data-driven method supports the funding negotiation process that Bane NOR undertakes with its governing body and allows for various scenarios to be ran to showcase the effect of different budgets on the intervention requirements across the network over time.

6 Conclusion

Bane NOR is one among several infrastructure managers throughout Europe who employs a condition grade evaluation methodology and reporting. The condition grade method was defined so that usually disparate data sources containing relevant information for overall condition trends can be evaluated in a systematic and comparable way across all assets within the portfolio in an understandable and interpretable format. The resulting grade indicated the renewal need and timing of assets in Bane NOR's portfolio. Bane NOR's further utilisation of the results as a base for renewal needs aligns its strategic goals and operational actions. The condition grade and associated renewal need is used for an algorithmic renewal decision support process. In this process, evaluated portfolio data is put through an algorithm that considers condition, scope, traffic and available budget, while performing asset aggregation to compound items reflecting panning granularity to automatically distribute available funding. The result of this process is a renewal project candidate list that is then refined using the expert input to account for special and local situations, ultimately producing a renewal plan that is used in planning of the next year's renewal projects.

The method introduces a quantitative and more objective approach than the previous methodology that suffered from subjective, ad-hoc decision making.

Figures

Figure 1: Expected Renewal Need (in Billion NOK) according to 2022 condition 3
Figure 2: Example calculation from KPIs to Total condition grade for an individual asset 6
Figure 3: Example grade metrics used for Substance, Availability and Safety KPIs 10
Figure 4: Priority score hierarchy.....13
Figure 5: Example process for hypothetical portfolio 15
Figure 6: Renewal planning process.....16

Tables

Table 1: Condition grade class definitions 5

Literature

[1] Bane NOR, “InfraStatus 2022,” 2022.

Authors

Kiepiela, Joanna Maria
Leader of Maintenance Planning, Bane NOR

Frogner, Thomas Benjamin
Senior Analyst, Bane NOR

IRSA 2023

SESSION 4

FAHRPLANGESTALTUNG
TIMETABLE DESIGN

Session 4
Alexander Kuckelberg, Ingolf Leithoff

Ergänzung von Trassen-Planungsprozessen um EBW-Ansätze

Dr. Kuckelberg, Alexander[1], Leithoff, Ingolf[2]

[1]VIA Consulting & Development GmbH, a.kuckelberg@via-con.de
[2]QLX GmbH, i.leithoff@qlx-gmbh.de

Zusammenfassung

In diesem Artikel wird die Kombination und Integration von verschiedenen, bisher getrennt betrachteten Prozessen und Planungsschritten beschrieben und bewertet: Die Trassierung und Planung derselben in sehr frühen Projektphasen und die aus der mikroskopischen Welt bekannte Fahrzeit- und Belegungsrechnung und darauf aufbauende Funktionen eisenbahnbetrieblicher Ansätze.

In der Kombination ergänzen sich beide etablierte Verfahren und Prozesse und bereichern somit die Phase der Trassierung von Bahnstrecken bereits in einer sehr frühen Phase mit operativen, eisenbahnbetrieblichen Aspekten und ermöglicht damit eine frühzeitige Bewertung und Priorisierung von Neu- und Ausbauvariantem auch unter operativen Aspekten wie Fahrzeit, Zugfolgezeiten und weiteren Indikatoren.

Der Artikel beschreibt die Kopplung mikroskopischer Berechnungs- und Betrachtungsfunktionalitäten und makroskopischen Trassenplanungen anhand der beiden Produkte *LaaS* (*LUKS as a Service*) und *smarttrass* der Firmen VIA-Con und QLX, die zunehmend praxiserprobt und im Rahmen realer Planungsprojekte zusammen mit den jeweiligen Projektpartnern weiterentwickelt und erweitert wird.

Keywords: Trassenplanung, Fahrzeitrechnung, Bau- und Variantenplanung

Session 4
Alexander Kuckelberg, Ingolf Leithoff

1. Einleitung und Grundlagen

Neue Bahnstrecken, Lückenschlüsse und Neubaustrecken sind langfristige Planungs- und Bauprojekte, die oftmals viele Jahre (bzw. Jahrzehnte) Vorlauf haben und mit Studien zur Trassierung, Bewertung von Varianten und zunehmend umfänglichen BIM-Betrachtungen inkl. Berechnung verschiedenster Kennwerte einher gehen.

Beispiele aktueller Vorhaben in Deutschland sind die Projekte „Fulda-Gerstungen“, „Hannover-Bielefeld“ oder auch „Mannheim-Karlsruhe“ der DB Netz AG, die Projekte „Wendlingen-Ulm“ oder „VDE 8“ sind seit einiger Zeit in Betrieb.

In der frühen Phase dieser Projekte steht vor allem die Suche nach geeigneten und nach Zielfunktionen optimierten Trassierungsvarianten im Vordergrund, die verschiedene Kriterien wie Kosten und Mengen, Umweltverträglichkeit, Lärmschutz, Anteil von Bauwerken wie Tunnel, Brücken oder Einschnitten und Emissionsbewertungen einschließt, aber zunehmend auch eine frühzeitige, (grob-) betriebliche Bewertung erfordert und in einigen Fällen sogar als ein wesentliches Kriterium über die weitere Variantenauswahl entscheidet (Stichwort Deutschlandtakt).

Auf der anderen Seite existieren sehr detaillierte, leistungsstarke Tools, Verfahren und Algorithmen der Eisenbahnbetriebswissenschaften (EBW), die mit entsprechenden Datengrundlagen sehr aussagekräftige, präzise Berechnungen und Analysen erlauben, Diese Ansätze setzen typischerweise eine detaillierte, mikroskopische Datengrundlage voraus, die zum Zeitpunkt der zuvor beschriebenen Planung in der Form noch nicht vorliegt.

Daher besteht die besondere Herausforderung bei einer Kombination der beiden Welten in der geeigneten Bereitstellung von Daten aus den Planungswerkzeugen heraus und eine passende Aufbereitung und Behandlung durch EBW-Tools. Diese Kombination ist exemplarisch durch die beiden Tools *smarttrass* (QLX) und *LaaS* (VIA-Con) entwickelt, in praktischen Projekten erprobt und in diesem Artikel dargestellt.

2. Tools, Schnittstellen und Komponentenintegration

Grundlagen und Ausgangspunkt der Toolkopplung ist die Trassenplanung und Untersuchung von Trassierungsvarianten, wie sie in Studien und bauplanerischen Voruntersuchungen vorgenommen werden (exemplarisch Tool *smarttrass*).

Session 4
Alexander Kuckelberg, Ingolf Leithoff

2.1. Planungstool smarttrass

Das Programm-System *smarttrass* verfolgt im Vergleich zu konventionellen Entwurfssystemen den Ansatz, agile Methoden in der Planung in frühen Leistungsphasen zu implementieren. Hierzu gehört, dass bereits sehr frühzeitig möglichst alle wesentlichen Größen gestaltet werden können, die Einfluss auf den späteren Trassenverlauf, Mengen, Kosten, Logistik und die Terminplanung haben, um die grundsätzliche Machbarkeit zu prüfen, aber auch die jeweiligen Risiken frühzeitig zu erkennen und möglichst zu verringern.

Mit *smarttrass* können deshalb Daten aus verschiedenen Datenquellen und Fachgewerken gelesen, interpretiert, ausgewertet und informationsangereichert zusammengeführt oder separat in weiteren Formaten wieder ausgegeben werden. Dazu werden die Daten je nach Datenquelle entweder in Rohdaten belassen oder umgeformt und für die Zusammenführung abhängig von der jeweiligen Datenquelle mit einer gemeinsamen Bezugsgröße verknüpft. *Smarttrass* verfolgt hier eine Kombination von Linked-Data- und Datenbank-Ansätzen, um größtmögliche Flexibilität mit höchstmöglicher Leistungsfähigkeit auch auf Standard-Hardware zu erreichen.

Weiterhin ist es möglich, externe Datenquellen und internetbasierte Plattformen auf Bauteilebene zu verknüpfen, ohne die jeweiligen Datenquellen lokal vorhalten und synchronisieren zu müssen. In Kombination mit einem User-Management, Dokumenten-Management und Issue-Tracking auf Plattformebene sind mächtige und automatisierbare BIM-konforme Workflows möglich.

Insgesamt ist das System *smarttrass* so ausgelegt, dass die Performance auch auf Standard-Hardware durch optimale Ausnutzung von CPU (multicore und multithreading), GPU (hochparallelisierbare Berechnungen) und vorhandenem Arbeitsspeicher möglichst performant arbeitet. Dabei spielt die 3D-Grafik-Engine eine wichtige Rolle bei der hardwarebeschleunigten Berechnung verschiedener zeitkritischer Aufgaben. Gleichzeitig ist durch die Anbindung verschiedener Module (GIS, Fahrzeit, Schall etc.) und Hinterlegung relevanter Normen und Richtlinien für die Planungsprüfung und Kostenermittlung eine flexible Auswertung planungsrelevanter Informationen gewährleistet. Darüber hinaus bietet die Auswahl an Schnittstellen und Plattformen die Möglichkeit, Fachgewerke übergreifend Teilmodelle zusammenzuführen, numerisch und visuell auszuwerten und auch informationsangereichert an weitere Systeme, z. B. für die Weiterbearbeitung in späteren Leistungsphasen auszugeben.

2.2. EBW-Tool LUKS/LaaS

LUKS (Leistungsfähigkeitsuntersuchung von Knoten und Strecken) ist eine integrierte Software-Suite für verschiedene Arten von eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Untersuchungen (EBWU). Die Basisfunktionalität umfasst die Bereitstellung von Editoren zur Erfassung und Bearbeitung von Stammdaten, der Infrastruktur und Fahrplandaten sowie die darauf aufbauende detaillierte mikroskopischen Fahr- und Belegungszeitrechnung. Die Basismodule werden ergänzt durch Module zur graphischen Fahrplankonstruktion, warteschlangentheoretischen Kapazitätsberechnung von Knoten und Strecken, Fahrplan- und Betriebssimulation sowie der Berechnung nach UIC Code 406.

LaaS (*LUKS as a Service*) vereint bekannte und erprobte Funktionalitäten von *LUKS* mit einem serviceorientierten Ansatz und stellt als eigenständiges Tool gekapselte und zentrale Schnittstellen zur Verfügung, womit Dienste wie Routing in verschiedenen Granularitätsstufen, mikroskopische Fahrzeitrechnung, darauf aufbauende Belegungsrechnung und Konflikterkennung zur einfachen und bedarfsorientierten Nutzung für Dritte realisiert werden können.

LaaS nutzt unter anderem *LUKS*-Datenbanken als Quelle grundlegender Daten, womit mittels *LUKS* ein leistungsstarkes Tool zur Pflege und Verwaltung von mikroskopischen Daten inklusive verschiedenster Importschnittstellen unterschiedlicher Formate unmittelbar gegeben ist und auch für die Datenbereitstellung für *LaaS* verwendet werden kann. *LaaS* nutzt sämtliche Informationen für Berechnungen, die auch im interaktiven Tool *LUKS* zur Anwendung kommen und ist weitgehend per Aufrufparameter konfigurierbar.

2.3. Aktuelle Ansätze zu Variantenstudien und Trassenplanung

In diesem Planungsstatus liegen mit Hilfe von Tools wie *smarttrass* neuerdings und vermehrt verschiedene, infrastrukturspezifische Daten und aus der Planung abgeleitete makroskopische Informationen vor, die zur weiteren Bewertung genutzt werden können, z. B. die Trassenführung in Form von Achsen im Lageplan sowie Gradienten im Höhenplan, aus denen über Querprofile direkt dreidimensionale Linienbauwerke ableitbar sind. Im Ergebnis können unmittelbar topologische Streckendaten bestimmt werden, die Profilinformationen nach Kilometrierung enthalten. Diese Angaben können in diesem Planungsstatus als bereits verlässlich und detailliert betrachtet werden, eine Sub-Meter-Genauigkeit ist grundsätzlich leistbar, um z. B. Streckenwiderstände nach EBW-Ansätzen berechnen zu können.

Zunehmend fließen in Variantenstudien der letzten Jahre weitere, auch betriebliche Anforderungen wie die Einhaltung von Fahrzeiten aus dem integralen Taktfahrplan (Deutschland-Takt), die zwingende Voraussetzung für den Bau der jeweiligen NBS ist, ein. Hierzu sollte folglich bereits vor der Trassenauswahl – also schon während der Trassierungsstudie – eine Auswertung hinsichtlich der erweiterten Anforderungen – hier die prognostizierte Fahrzeit – möglich sein.

Bei Neubautrassen kommt in der Regel ein abgestuftes Verfahren zum Einsatz: Zunächst wird der Suchraum definiert (A), in der die zu verbindenden Betriebsstellen enthalten sind und der hinreichend groß gestaltet sein muss, damit alle sinnvollen Varianten in der Studie untersucht werden können. Danach werden in der Regel von der Umweltplanung die Raumwiderstände (B) kartiert und danach in den raumwiderstandsärmeren Bereichen mögliche Grobkorridore (C) bestimmt. In diese werden dann über Gelenkpunkte Trassenkorridore definiert (D). Die Bereiche zwischen den Gelenkpunkten können in unterschiedlicher Ausprägung als Untervarianten, sogenannten Segmenten, entworfen werden. In Neubauprojekten entstanden so z.B. in *smarttrass* teilweise bis zu 600 Segmente, die wiederum zu einer nicht mehr praktikablen Anzahl an durchgehenden Varianten kombiniert werden können. Hierzu wird dann in der Regel in einem Segmentvergleich die jeweils optimale Untervariante eines Abschnitts ausgewählt und somit die Anzahl der weiter zu betrachtenden Varianten auf ein praktikables Maß abgeschichtet.

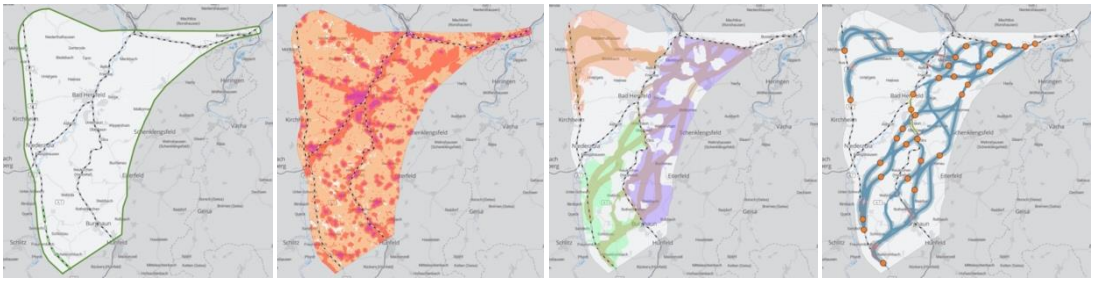


Abbildung 1: Stufen in der Variantenfindung, Quelle: Zusammenstellung aus interaktiver Karte von www.fulda-gerstungen.de

Als Grundlage für die Bestandsmodellierung und Neubauplanung dient in der Regel das Raster-DGM der jeweiligen Landesvermessung. Auf das Geländemodell werden im System *smarttrass* automatisiert lagerichtig georeferenzierte Luftbilder (DOP), digitale topografische Karten (DTK) und weitere georeferenzierte Rasterbilder gemappt, soweit erforderlich. Schutzgebiete und weitere Flächen, z. B. ALKIS Flurstückdaten oder Vegetationsflächen, Gebiets- und Artenkartierungen sowie das klassifizierte Bestandsnetz (Bahn und Straße) werden vorzugsweise als Vektorgeometrie in *smarttrass* importiert. Darüber hinaus werden weitere planungs- und entscheidungsrelevante

Informationen wie 3D-Gebäudemodelle, 3D-Objekte, Bestandsvermessungen usw. über gängige Schnittstellenformate importiert und automatisch in das Projektkoordinatensystem transformiert (bei der DB vorzugsweise DB_REF), sofern diese korrekt georeferenziert sind.

Auf der Grundlage dieser Daten wird weitgehend automatisiert ein Projektmodell generiert, in dem die eigentliche Trassierung für die Variantenbetrachtung durchgeführt wird. Im großräumigen Entwurf wird mit Hilfe des Tangentenverfahrens automatisiert über Abfrage des Geländemodells mit wenigen Klicks ein dreidimensionales Linienbauwerk basierend auf Entwurfselementen von Achse, Gradiente und Querschnitt erzeugt und auf dieser Basis zur Laufzeit Mengen, Richtlinienkonformität und Kosten entsprechend der jeweiligen Normen berechnet. Die Echtzeitberechnung erlaubt dabei sehr schnelle Entwurfsergebnisse aber auch entsprechende Änderungen und Optimierungen. Während die Automatik bereits sehr effizient grundlegende Vorschläge zur Trassenlage, Höhenverlauf und Kunst- und Erdbauwerken bietet, ist es im weiteren Schritt möglich, alle Parameter im Detail anzupassen. Die Prüfung auf Richtlinienkonformität, die Ermittlung von Kosten, Mengen, Flächen, Einhaltung der Lichtraumprofile etc. werden in Echtzeit während des Entwurfsvorgangs weiter geprüft, sodass eine Optimierung hinsichtlich ausgewählter Kriterien schnell vonstattengeht.

Abbildung 2: 3D-Projekmodell mit Trassenmodell, Echtzeitgenerierung der Trasse sowie der Erd- und Kunstbauwerke

Das schnelle und effiziente Verfahren ermöglicht optimierte Entwürfe in einer sehr frühen Phase, deren Ergebnisse und Genauigkeiten weit über die bisher gewohnten hinaus gehen, für die weitere Planungssicherheit und auch Einschätzung der Projektrisiken

notwendig ist. Der Anwendungsfall der Fahrzeitberechnung dient hier der Bewertung von fundamentalen Anforderungen an die Trassierung, da beispielsweise bestimmte Fahrzeiten aus EBW-Betrachtungen zum D-Takt zwingend einzuhalten sind. Auch wenn in dieser Phase die bestehende Datengrundlage in ihrer Genauigkeit begrenzt erscheint, erhält man trotzdem schon grundsätzlich verwertbare Ergebnisse, die allein über das Bewertungskriterium „Fahrzeit“ über die weitere Betrachtung im Abschichtungsprozess entscheiden können.

2.4. EBW-Betrachtung

Weitere Aspekte mikroskopischer EBW-Betrachtungen wie Zugcharakteristika, (grobe) Angaben zu Sicherungssystemen und Haltepolitiken (referenziert mittels Streckenkilometrierung) sind in diesem Status der Projektierung bisher unüblich und nicht originär aus Trassierungsinformationen ableitbar, jedoch können beim Aufruf einer Streckenbewertung diese zusätzlich bestimmt und als (generische) Stammdaten und vordefinierte, angenommenen repräsentative Zugkompositionen angeboten und zur Untersuchung und Bewertung ausgewählt werden. Die Bereitstellung solcher Daten kann und sollte direkt durch entsprechende EBW-Tools erfolgen, um die unmittelbare Kopplung und Synchronisation zu gewährleisten.

Mit dieser Zusammenstellung relevanter Daten und Informationen ist es im ersten Schritt möglich, mikroskopische Fahrzeitrechnungen in einer akzeptablen Granularität durchzuführen und damit Trassierungsvarianten um solche Indikatorwerte zu bereichern, was die Aussagegüte der Untersuchungen stark verbessert und steigert. Wird zudem ein grobes Raster sicherungstechnischer Informationen, z. B. vordefinierte Schablonen einer generischen Blockteilung zur Auswahl angeboten und einem EBW-Tool mit übergeben, ist eine erste Belegungsrechnung und bezogen auf verschiedene Zugkompositionen eine Abschätzung von z. B. Mindestzugfolgezeiten möglich.

Ergebnisse werden der diese Funktionalitäten anfragenden Planungskomponente zur Darstellung und Visualisierung zur weiteren Rückmeldung bereitgestellt, die Interaktion mit Nutzern erfolgt direkt über das Planungstool und reduziert damit ggf. bislang notwendige und geforderte Iterationsschritte z.B. nachgelagerter Fahrzeitunter-suchungen.

Eine detaillierte Optimierung und Planung im Sinn einer mikroskopischen eisenbahnbetrieblichen Untersuchung ist an dieser Stelle offenkundig (noch) nicht sinnvoll möglich bzw. fachlich fraglich, weshalb die hier vorgestellten Ansätze in dieser Planungsphase vor allem die Beurteilung von Tendenzen und Potentiale deterministisch ermöglichen soll, weniger eine absolute betriebliche Bewertung.

3. Potentiale und Evaluierung

Die Kopplung zwischen den Tools erfolgt über vereinbarte Schnittstellen, EBW-Tools stellen relevante Detailinformationen bereit, die im Planungstool zur Auswahl angeboten werden. Über vereinbarte Request- und Response-Dialekte wird eine Trassenvariante zur Berechnung übergeben und EBW-Berechnungen in entsprechender Granularität zurückgeliefert.

Dieser Ansatz erlaubt es, in frühen Planungsphasen bereits EBW-Funktionalitäten einzubeziehen, Untersuchungen in ihrer Güte zu bereichern und die funktionale Kompatibilität zu späteren Planungsphasen, z. B. einer folgenden PT1-Planung, zu erhöhen.

Die EBW-Funktionalitäten werden als gekapselte Bibliothek bereitgestellt, sind im konkreten Fall direkt mit der Lizenzierung des Planungstools verknüpft, können ihr Potential in der gewählten Konzeption aber auch für viele weitere Anwendungsfälle ausspielen, die originär mit makroskopischen Trassendaten arbeiten.

3.1. Schnittstelle Fahrzeugbibliothek

Die Schnittstelle zur Fahrzeugbibliothek wird durch das EBW-Tool gestellt und übernimmt verschiedene, konkret aufgrund des vorhandenen Kontexts sich stellende Anforderungen:

- Mikroskopische EBW-Tools benötigen Stammdaten einer bestimmten Güte zur Berechnung, beispielsweise physikalische Angaben zu Traktions- und Bremsverhalten. Diese werden daher sinnvollerweise durch die Komponente gestellt, die die Daten später auch nutzt;
- Die Daten sind konzeptuell auch nicht im Fokus von Tools zur Entwurfsplanung, weshalb eine Erweiterung bei diesen eine unnötige Vermischung von Datendomänen darstellen würde;
- Mit einer Fahrzeugbibliothek lassen sich Szenarien und Anwendungsfälle einfach neuen und veränderten Erfordernissen anpassen, eine originäre Anpassung der Entwurfstools wird umgangen.

In der Kopplung erfolgt dies über eine spezifizierte Schnittstelle, die die verfügbaren Zugkompositionen abfragt und im Entwurfstools bei Fahrzeitrechnungen zur Auswahl anbietet. Ein Beispielergebnis diese Anfrage ist nachfolgendend gezeigt, als Grundbestand in aktuellen Projekten werden Zugkompositionen verwendet, die auch bei Projekten zum Deutschlandtakt verwendet wurden und hier damit eine fachliche Entsprechung finden.

```
<Kompositionsdaten>
  <Kompositionen>
    <Komposition id="ICE 3" baureihe="403-2.1" gattung="FRz" Brh="187" VMax="300"
                 Laenge="200" Bremsstellung="R+WB" PZB="true" LZB="true"
                 TCS1LS="true" ETCS1="true" ETCS2="false" ETCS3="false">
      <comment>ICE 3 mit Regelleistung von 900A (Baureihe 403)</comment>
    </Komposition>
    <Komposition>
    ...
    </Komposition>
  </Kompositionen>
</Kompositionsdaten>
```

Zur Abfrage dieser Art der Stammdaten wurde die Schnittstelle *getVehicles* mit zusätzlichen Parametern entwickelt, die eine gezielte, ggf. gefilterte Abfrage von Stammdaten in unterschiedlicher, adressierbarer Granularität erlaubt. Mit diesen Daten ist es den Entwurfstools dann möglich, gezielt Fahrzeitrechnungen durchzuführen.

3.2. Schnittstelle Fahrzeitrechnung

Die Kernidee bei der Kopplung von Planungs- und EBW-Tools ist die frühzeitige Durchführung von operativen, speziell fahrzeitlichen Berechnungen. Mit der Verfügbarkeit der Fahrzeugdaten kann über eine entsprechende Schnittstelle die Fahrzeitanfrage formuliert werden und dabei die aus Planungstools ableitbaren Daten verwendet werden. Der grundsätzliche Aufbau einer Anfrage ist wie folgt möglich:

```
<?xml version="1.0" standalone="yes"?>
<trajectory meterFrom="0" meterUntil="31000" vBreakIn="0" vBreakOut="200">
    <train predefinedComposition="ICE 3"/>
    <gradients>
        <gradient position="1020" value="10"/>
        ...
    </gradients>
    <speeds>
        <speed position="0" value="160"/>
        <speed position="2000" value="120"/>
        ...
    </speeds>
    <signals>
        <signal position="22333" value="230"/>
        ...
    </signals>
    <tunnels>
        <tunnel position="25000" value="92"/>
        <tunnel position="27500" value="0"/>
    </tunnels>
    <stops>
        <stop position="17340" value="5"/>
    </ stops>
</trajectory>
```

Darin wird zum einen das zur Berechnung zu verwendende Fahrzeugmaterial in Form einer Komposition angegeben, in den Metadaten für die Anfrage aber vor allem der

Umfang der zu berechnenden Trajektorie (in Metern) sowie ein Streckenprofil, welches Planungselemente wie Gradienten, Geschwindigkeiten, Signale und Tunnelquerschnitte, aber auch ggf. gewünschte Halteregime spezifiziert.

Mit diesen auf Metrierungen basierende Anfrage berechnet die mikroskopische EBW-Komponente eine kürzeste Fahrzeit (inkl. Regelzuschlägen nach Regelwerk) und gibt diese als grobe Zusammenfassung bzw. detaillierte Übersicht an das Planungstool zurück, mit der dort eine Darstellung für den Nutzer möglich ist. Eine beispielhafte Antwort ist nachfolgend wiedergegeben.

```
<runningTime>
  <summary departure="00:00:00" arrival="00:22:11" runtime="00:22:11"
           includedDwellTimes="00:05:00" includedStandardSurcharge="00:01:15"/>
    <details>
        <rtElement position="0" v="0" vMax="160" vMaxTrack="160" t="-00:00:30"
                   type="LZB-Start" element="LZB_0"/>
        <rtElement position="0" v="0" vMax="160" vMaxTrack="160" dwellTime="30"
                   tArrival="-00:00:30" tDeparture="00:00:00" type="Stopping"
                   element="HP_0_0"/>
        ...
        <rtElement position="1020" v="93.5" vMax="160" vMaxTrack="160" t="00:00:50"
                   type="Gradient" element="G_3_0" gradient="10.000"/>
        <rtElement position="2000" v="104.21" vMax="120" vMaxTrack="120" t="00:01:37"
                   type="Speed" element="S_0_0" speed="120"/>
        ...
    </details>
</runningTime>
```

3.3. Technische Umsetzung

Bei der Kopplung kommt eine Version des EWB-Tools *LaaS* zum Einsatz. *LaaS* ist vor allem eine serviceorientierte Architektur, die im Kern auf „Dienste im Kommunikationsnetz“ abzielt und als Service via http-Anfragen zentrale Dienste anbietet.

Den konkreten Anforderungen in aktuellen Planungstools folgend hat sich solch eine Service-basierte, zentrale Lösung aus verschiedenen technischen Randbedingungen (Einzelplatzrechner, bedingt Netzzugang, Wartbarkeit zentraler Dienste) als weniger geeignet erwiesen, eine direkte Kopplung und Bereitstellung zusammen mit dem verwendeten Planungstool *smarttrass* war konkret die einfachere Umsetzung.

Aus diesem Grund sind die hier beschriebenen EBW-Servicekomponenten in Form einer Windows-DLL modularisiert und Teil der Installation von *smarttrass* geworden. Die DLL ist in die Dongle-basierte Lizensierung von *smarttrass* integriert und in dieser Kombination im Einsatz. Einer einfachen Übertragung auf andere Tools und Anwendungsfälle – dann ggf. auch als zentrale Serverkomponente – widerspricht dieser

Ansatz nicht, er ist den konkreten Anwendungsanforderungen und technischen Rahmenbedingungen geschuldet.

3.4. Beispiele

Nachfolgend ist anhand einiger Screenshots die Einbindung der EBW-Funktionalitäten in das Planungstool illustriert und anschaulich aufgezeigt.

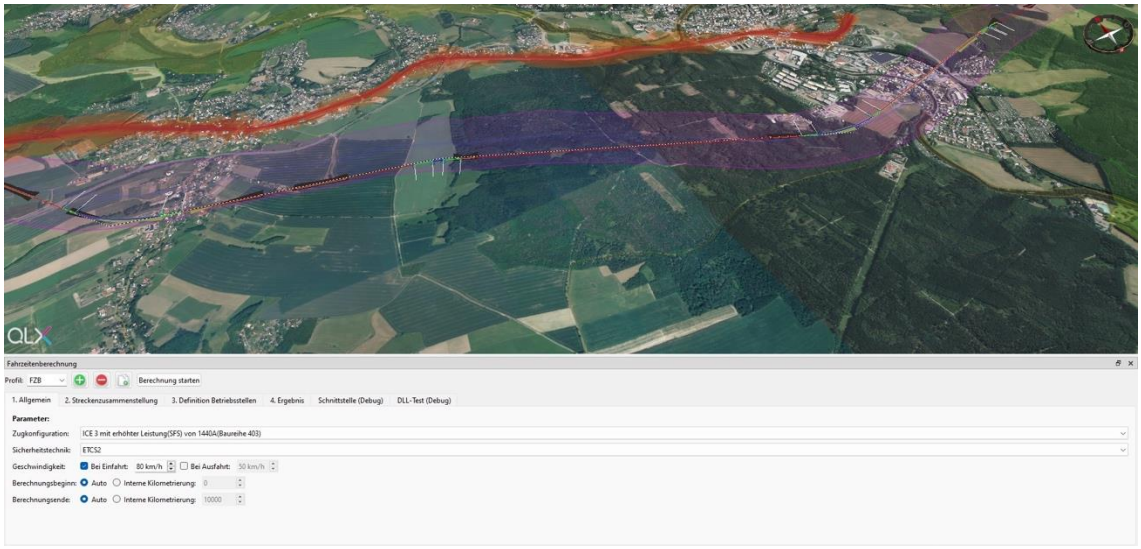


Abbildung 3: Grafische Benutzeroberfläche der Laas-Integration in smarttrass, allgemeine Parameter zur Fahrzeitrechnung, die zum Teil aus Nutzung der Schnittstelle zur Fahrzeugabfrage resultieren.

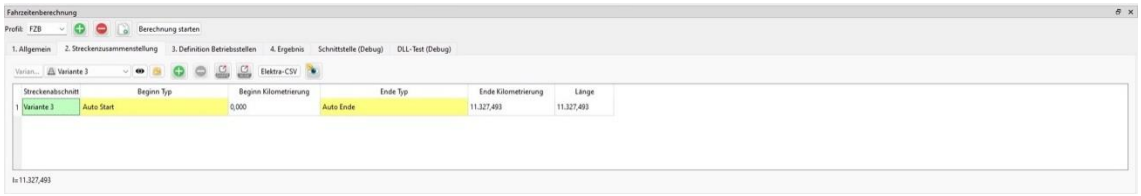


Abbildung 4: Streckenzusammenstellung aus Trassenabschnitten mit Möglichkeit zur eigenen Editierung vor Anfrage der nachfolgenden Fahrzeitrechnung.

Abbildung 5: Definition der Betriebsstellen, um der Fahrzeitrechnung weitere Informationen zur (späteren) besseren Verortung der Berechnungen zukommen zu lassen. Ohne diese eigens vorgenommene Teilung der Strecke in Abschnitte und Betriebsstellen betrachtet LaaS die Anfrage als eine lange, generisch adressierte Trasse.

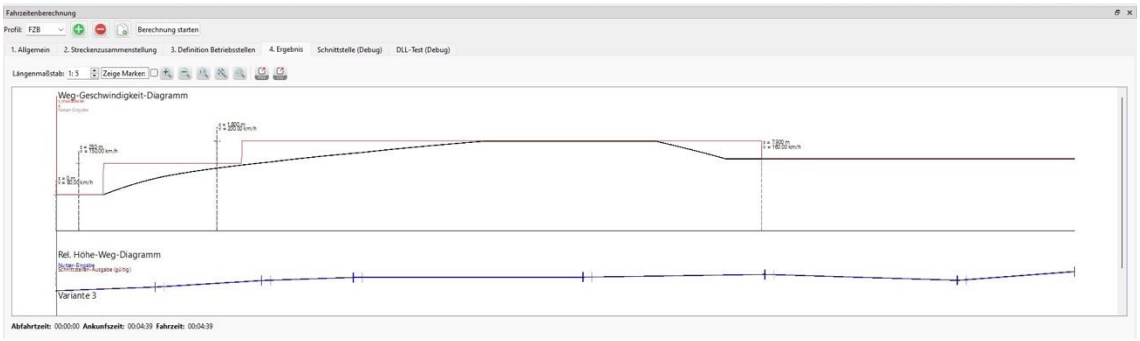


Abbildung 6: Grafische Darstellung des Ergebnisses einer Fahrzeitrechnung.

3.5. Potentiale und Funktionalitäten

Die gezeigte Kopplung einschließlich der aktuell realisierten Umsetzung stellt einen ersten Schritt bei der Kombination und Synchronisation der bisher unterschiedlichen Welten und Anwendungsszenarien dar, zeigt aber bereits Chancen und Potentiale, die die angegangene Integration bieten:

- Erste Planungen, Untersuchungen und betrachtete Trassierungsvarianten können in einfacher Weise und direkt innerhalb der verwendeten Tools um Aspekte und Kenngrößen eisenbahnbetrieblicher Untersuchungen ergänzt werden und erlauben somit eine frühzeitige Bewertung, ggf. auch Auswahl oder Verwerfung genauer zu betrachtender Varianten;
- Damit einhergehend sind Prozesse bereits optimiert und verschlankt worden, was vor allem Zeit, Aufwand und damit auch Kosten senkt;
- Eine technische Integration und Überbrückung der Datenwelten sind möglich und hilfreich, auch wenn es keine letztlich vollumfängliche und optimale Synchronisation geben wird und konzeptuell geben kann;
- Die einzelnen genutzten Komponenten fokussieren sich nach wie vor auf den eigentlichen Anwendungsfall und bleiben damit Expertensysteme, die Systemgrenzen können mit Schnittstellen überwunden werden.

Auch für zukünftige Anwendungen, Weiterentwicklungen und Schärfungen bieten sich weitere und interessante Ansätze:

- Die Einbeziehung von Belegungsrechnungen aufgrund von Heuristiken und Regelwerken, mit denen Blockteilungen und fehlende Daten der Planungstools ergänzt werden können;

- Dementsprechend eine frühzeitige, regelbasierte Unterstützung bei der Planung von Blockteilungen, Ausrollen von Elementen der Leit- und Sicherungstechnik und Berücksichtigung betrieblicher Aspekte;
- Herleitung weiterer eisenbahnbetrieblicher Kenngrößen wie erste Mindestzugfolgeabschätzungen oder grobe Ermittlung typischer Kenngrößen der Kapazitätsbetrachtung (z. B. Nennleistungen).

Dies sind einige potentiale kommende Anreicherungen und Arbeiten, die vor allem helfen können, derzeit übliche Zyklen zwischen der Planung und einer eisenbahnbetrieblichen Untersuchung zu reduzieren und Menge bzw. Umfang von sonst notwendigen iterativen Planungsschärfungen zu optimieren. Ein vollständiger Ersatz für eisenbahnbetriebliche Untersuchungen kann dieser Ansatz jedoch nicht sein, aber helfen, die Planungsqualitäten zu verbessern und Umsetzungszeiten mit allen resultierenden Folgen zu reduzieren.

3.6. Praxisbeispiele, Evaluierung und Bewertung

In der Praxis wird die Kombination aus Planungstools für frühe Leistungsphasen und EBW-Tools bei den Planungen von Neubaustrecken verwendet, da die Kombination beider Ansätze hier schon Mehrwerte bieten. Zwar sind aufgrund der verringerten Genauigkeit der Datengrundlage, der noch nicht finalen Lage der Trasse sowie der noch fehlenden betrieblichen Planungen keine exakten Fahrplan- oder Belegungsberechnungen möglich. Allerdings bieten sich über das Modul Fahrzeitberechnung belastbare Ergebnisse in „worst case/best case“-Szenarien, die bereits in der Variantenstudie über die grundsätzliche Eignung entscheiden können, insbesondere dann, wenn in Neu- und Ausbaubauvorhaben die Fahrzeit aus dem Zielfahrplan zwingend vorgegeben sind.

In den üblicherweise langwierigen Planungs- und Genehmigungsverfahren sind Änderungen der Rahmenbedingungen nichts Neues, die den Mehrwert der Ergebnisse in dieser frühen Phase infrage stellen könnten. Durch Nutzung dieser neuen Technologien in Kombination mit Verlagerung von Maßnahmen in frühere Phasen und einer frühzeitigen und transparenten Öffentlichkeitsbeteiligung besteht jedoch das Potenzial, den Planungs- und Genehmigungsprozess deutlich zu beschleunigen und damit Risiken der Veränderung von Rahmenbedingungen zu mindern. Im Bahnprojekt Fulda-Gerstungen konnte etwa kürzlich auf das Raumordnungsverfahren verzichtet werden[1]. Auch weitere Vorhaben wie z. B. Mannheim-Karlsruhe oder Hannover-Bielefeld nutzen die Vorteile der neuen Möglichkeiten. Hier wird, wie zuvor beschrieben, ebenfalls die

[1] https://www.fulda-gerstungen.de/aktuelles-reader/planungsbeschleunigung-beim-schienenausbau-ice-neubaustrecke-fulda-gerstungen-ohne-raumordnungsverfahren.html

Kombination der digitalen Trassenfindung in Kombination mit der Fahrzeitberechnung genutzt, um die grundsätzliche Eignung der entworfenen Varianten zu prüfen, aber auch als zusätzliches Bewertungskriterium in der vergleichenden Variantenbewertung. Im Ergebnis sind so zu deutlich früheren Zeitpunkten genauere Aussagen und höhere Planungsqualitäten erreichbar.

Referenzen:

1. „Raumordnungsverfahren für die ABS/NBS Fulda – Gerstungen“: *https://www.boschpartner.de/news?tx_news_pi1[action]=detail&tx_news_pi1[controller]=News&tx_news_pi1[news]=266&cHash=f1aae7cbe77da71b3fbe7a178b1392b1*
2. „Abschlussbericht zum Zielfahrplan Deutschlandtakt Grundlagen, Konzeptionierung und wirtschaftliche Bewertung“: *https://downloads.ctfassets.net/scbs508bajse/7hundjzKsJuMMt31b3tv5a/0e3d5a8e981c3d8068ebc95254e53894/2021-08-31_Abschlussbericht_Deutschlandtakt_1-00_gesamt.pdf*
3. LaaS – LUKS as a Service: https://www.via-con.de/zz08_laas-luks-as-a-service/

Session 4
Giorgio Medeossi, Mike Bagshaw, Simon Wimmer

Agile Simulation im Prozess der Fahrplanerstellung

Ein neuer Ansatz zur Erstellung robuster, störungsarmer Betriebskonzepte in hochbelasteten Netzen

Medeossi, Giorgio[1], Bagshaw, Mike[2], Wimmer, Simon[1]

[1]TRENOlab srl
[2]MTR Elizabeth Line Ltd.

Zusammenfassung

Dieser Erfahrungsbericht zeigt den Prozess der „Agilen Simulation“ als Best-practice der Fahrplankonstruktion für hochbelastete Netze mit einer hohen Diversität an Stakeholdern und dem Primärziel eines möglichst konfliktarmen und stabilen Fahrplans unter Berücksichtigung von Einflüssen des tagtäglichen Betriebsgeschehens. Dabei wird unter anderem auf den Anwendungsfall bei der Elizabeth Line in London vertieft eingegangen.

Keywords: Innovative Betriebskonzepte, Robuste Fahrplanerstellung, Störfallmanagement

1 Die Ausgangssituation: Der klassische Prozess

Im klassischen Prozess der Fahrplankonstruktion wird der Fahrplan anhand einer statischen Fahrzeitberechnung und dem Paradigma der Konfliktfreiheit erstellt, wobei diverse Randbedingungen technischer und infrastruktureller Natur, sowie eine meist aus politischen und sozioökonomischen Faktoren hergeleitete Angebotsstruktur in Übereinklang gebracht werden. Betriebliche Aspekte finden im Rahmen von Umlaufplanung, Personaleinsatzplanung und dem gezielten Hinzufügen von Fahrzeitreserven Berücksichtigung. In vielen Fällen, oft im Rahmen von Verkehrsvertragsvergabeverfahren, werden Umlauf- und Personalplanung in der Fahrplanerstellung fast vollkommen ausgeklammert. Das Verhalten des Fahrplans im Verspätungsfall wird nicht systematisch geprüft.

Eine traditionelle Simulation ist von diesem klassischen Prozess der Fahrplankonstruktion entkoppelt und der Fahrplanerstellung nachgelagert. Sie stellt einen eigenständigen Schritt mit wesentlich höherem Detailierungsgrad dar. Der makroskopisch konstruierte, statische Fahrplan wird dazu mit einer stochastischen Verteilung and Simulationsparametern aus dem Betrieb (z.B. Abfahrtsverspätungen, Haltezeitüberschreitungen, betriebliche Störungen, reduzierte Fahrzeugperformance, etc.) gefüttert und durch eine Monte-Carlo-Simulation auf Robustheit getestet. Anschließend können Rückschlüsse auf die Qualität des Fahrplans gezogen werden.

Da jedoch die eigentliche Fahrplanerstellung zu diesem Zeitpunkt oft bereits abgeschlossen ist, ist eine Verbesserung des Fahrplangefüges und somit eine grundlegende Stabilisierung des Fahrplans nur schwer möglich.

2 Die Methode - Agile Simulation

2.1 Was bedeutet Agile Simulation?

Die Agile Simulation ist die logische Weiterentwicklung der klassischen Vorgehensweise. Die Betriebssimulation wird dabei direkt in den Prozess der Fahrplanentwicklung integriert. Ein Entwurf – oder mehrere Entwürfe – werden dabei solange einer Bearbeitungsschleife aus Fahrplanbearbeitung → Simulation → Auswertung → Fahrplanbearbeitung unterzogen, bis ein für alle Stakeholder zufriedenstellendes Ergebnis erreicht worden ist. Die Definition von „zufriedenstellend" erfolgt hierbei situationsabhängig durch die Stakeholder, die an der Fahrplanerstellung beteiligt sind.

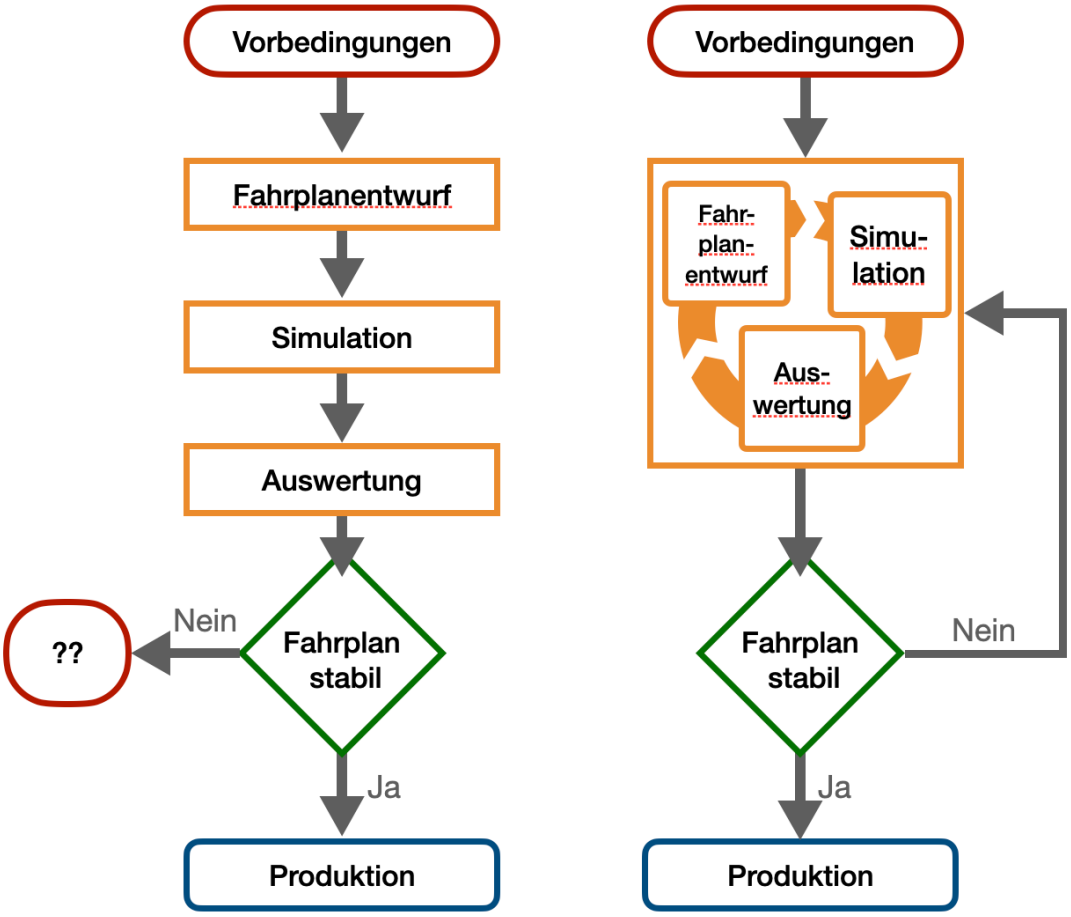


Abbildung 1: Klassischer Prozess und Agile Simulation in der Fahrplanerstellung

Die Grundstruktur einer Eisenbahnbetriebssimulation wie im Klassischen Prozess beschrieben bleibt auch im Agilen Prozess erhalten. Die Durchführung einer Agilen

Simulation im Rahmen der Fahrplanerstellung ist nur möglich, wenn ein hoher Grad der Integration zwischen Planungs- und Simulationspersonal erreicht wird. Zudem können (und sollten) auch weitere Stellen der internen Planung, zum Beispiel Personaleinsatzplanung, Baubetriebsplanung oder Verkehrsvertragsmanager eingebunden werden. Des Weiteren sind die Aufgabenträger ein wichtiger Akteur.

Der Begriff der ‚Agilen Simulation' lehnt sich in gewisser Weise an die Methode der Agilen Softwareentwicklung an, hat jedoch inhaltlich wenig mit den in der Informatik vorherrschenden Methoden und Projektorganisationsmodellen zu tun. Vielmehr soll das Adjektiv *agil* im wortwörtlichen Sinne verstanden werden: Die Fahrplanerstellung und die Simulation bewegen sich aufeinander zu, die Ergebnisse der Simulation werden direkt in die Fahrplanerstellung reintegriert. Im Prozess der Fahrplanerstellung können so betriebliche Randbedingungen präziser berücksichtigt werden.

2.2 Agile Simulation hilft bei der Fahrplankonstruktion

Ein wesentlicher Vorteil des beschriebenen Prozesses ist die hohe Präzision, die in der Fahrplanerstellung erreicht werden kann. Demgegenüber steht ein entsprechend hoher Aufwand – zeitlich und personell. Jedoch kann der zeitliche Aufwand durch eine leistungsstarke Simulationssoftware heute bereits auf wenige Stunden Vorbereitungszeit reduziert werden. Eine Simulation von 250 Betriebstagen auf der Elizabeth Line, Great Western Main Line und Great Eastern Main Line benötigt dann ebenfalls nur noch rund 30 Minuten. Wesentlich aufwendiger bleibt die Auswertung der Simulationsergebnisse, sowie die Anpassung des Fahrplans. An dieser Stelle müssen auch die notwendigen Abstimmungen mit internen und externen Stakeholdern (Personalplanung, externe EVU, Infrastrukturmanager, Aufgabenträger und so weiter) berücksichtigt werden. Der Umfang der Simulationsphase im Gesamtprozess ist daher zeitlich gering. Durch die unter Umständen hohe Intensivität der Änderungen und die Möglichkeit zur Veränderung an zahlreichen Parametern im Fahrplan entsteht so ein regelmäßiges Feedback in beide Richtungen. Die Agile Simulation wird zum „Sprint" im Sinne des Fahrplanprojekts.

Die Ergebnisse der Simulation können in zwei Wegen auf die Fahrplanung zurückgespiegelt werden: Basierend auf einer numerischen Datenauswertung oder einer visuellen Datenauswertung.

A) Numerische Auswertung: Die Daten der 250 Betriebstage werden auf Zugleistungen und Betriebsstellen aggregiert und können auf negative oder positive Veränderungen oder gegen einen vereinbarten Standardwert verglichen

werden. In der Regel wird die simulierte Pünktlichkeit oder die mittlere Verspätung zum Vergleich herangezogen.

B) Visuelle Auswertung: Die Daten werden in einer Grafik dargestellt. Die Einzelergebnisse der 250 Iterationen der Simulation bleiben ggf. erhalten. Besonders wirkmächtig im Bereich der visuellen Auswertung ist der Bildfahrplan mit geplanter und simulierter Fahrtverlaufskurve.

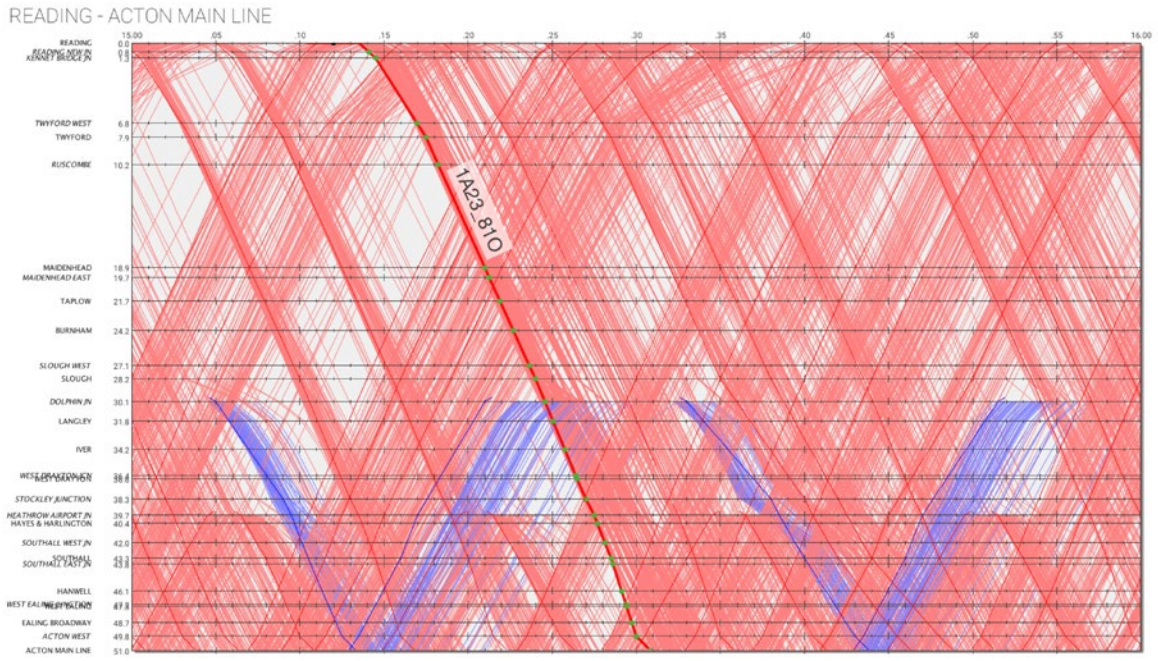


Abbildung 2: Ausschnitt der Simulationsergebnisse im Bildfahrplan[1]

[1] Starke Linien sind die geplanten Fahrtverlaufskurven, feine Linien sind die simulierten Fahrtverlaufskurven, Auszug 100 von 250 Simulationsläufen, Hervorgehoben ist Zug 1A23 von Bristol temple Meads

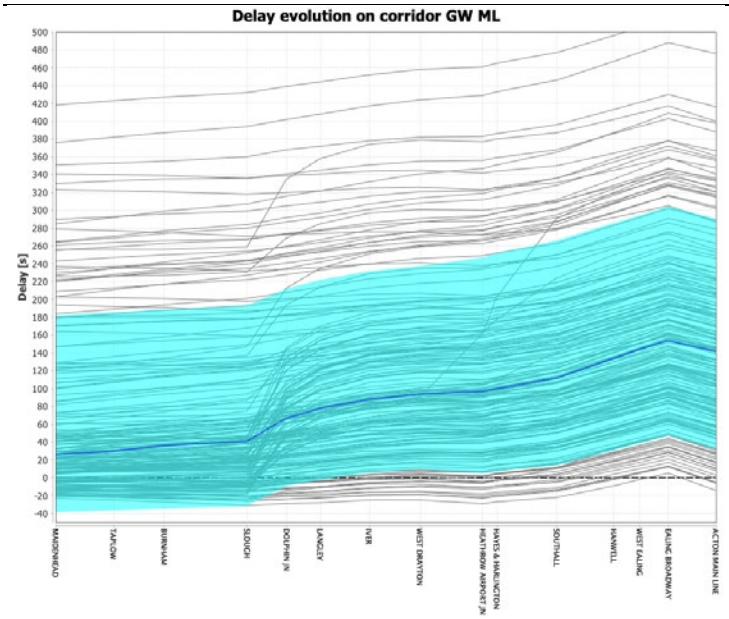


Abbildung 3: Verspätungsentwicklung für Zug 1A23_81O[2]

Die Ergebnisse der Auswertung werden zur Optimierung des Fahrplans genutzt. Beispiel:

Die im Fahrplan berücksichtigten Fahrzeitzuschläge können besser verteilt werden. Dadurch werden unnötige Wartezeiten an Zwischenstationen vermieden, während zusätzliche Puffer an neuralgischen Punkten wie größeren Knoten oder Abzweigen ohne zusätzliche Fahrzeitverlängerung in den Fahrplan integriert werden können. Zudem werden Zugleistungen ohne ausreichende Fähigkeit Verspätungen wieder aufzuholen, identifiziert. Es können dann Maßnahmen zur Stabilisierung des Fahrplans getroffen werden. Weitere, auch detailliertere Beispiele wären:

- Verhalten des Fahrplans in der HVZ mit regelmäßigen Haltezeitüberschreitungen
- Verhalten des Fahrplans bei Einsatz von Ersatz-Rollmaterial
- Verhalten des Fahrplans bei Kurzwenden mit zusätzlichem Triebfahrzeugführer
- Verhalten des Fahrplans bei reduzierter Adhäsion (Herbst, Winter)

Konkrete Anwendungsfälle, wie die Methode der Agilen Simulation bei der Elizabeth Line angewendet wurde, folgen im Kapitel 3.3.

[2] Darstellung:
Graue Linien – Simulierte Fahrten, Verspätungswerte
Dunkelblaue Linie – Medianverspätung
Hellblaues Band – Standardabweichung
Man erkennt den leichten Anstieg der Verspätung an der Überleitstelle Dolphin Junction. Zug 1A23 ist im Konflikt mit verspäteten „Weave"-Zügen, die an der Überleitstellen dessen Fahrweg höhengleich kreuzen.

2.3 Der Extra-Schritt: Pünktlichkeitsprognose und Pönale-Schätzung

Auf die Grundlage der Agilen Simulationsmethode kann ein weiterer Schritt angeschlossen werden: Die Prognose der Pünktlichkeit und die Prognose der Pönale laut Verkehrsvertrag. Es werden folgende Schritte durchgeführt:

1. Aufbau eines kalibrierten Modells mit realitätsnahen Eingangs- und Haltezeitverspätungen, und realitätsnahen Dispatching-Entscheidungen
2. Simulation des Fahrplans nach Methode der Agilen Simulation
3. Erfassung der im Verkehrsvertrag festgelegten Pönalegrenzwerte
4. Eine Methode zur ex-post Berichtigung der Simulationsergebnisse

Der vierte Schritt ist entscheidend, um die Pünktlichkeit bzw. die Höhe der zu erwartenden Pönale möglichst korrekt zu bestimmen. Dabei werden all jene Faktoren des alltäglichen Betriebs berücksichtigt, die das Simulationsmodell nicht in der Lage ist abzubilden. Dazu gehören unter anderem:

- Hohe Verspätungen im Bereich >30min
- Gestrichene Zugleistungen (Zugausfall)
- Externe Einflüsse
- Störungen bzw. Nichtverfügbarkeit der Infrastruktur (Signale, Weichen, Baustellen, etc.)

Durch die Simulation selbst wird lediglich ein „sonniger Tag“ betrachtet. Alle anderen Faktoren gehen als Abschläge in die Schätzung ein und können oft aus historischen Daten gewonnen werden.

3 Die Anwendung der Agilen Simulation

3.1 Infrastruktur Elizabeth Line

Die Elizabeth Line, auch bekannt unter dem früheren Namen Crossrail, ist eine Eisenbahninfrastruktur, die sich aus mehreren Strecken zusammensetzt. Beginnend im Westen fahren Züge auf der Great Western Main Line ab Reading und vom Flughafen Heathrow in Richtung London. Kurz vor dem historischen Kopfbahnhof Paddington beginnt eine Neubau-Tunnelstrecke, die sogenannte Central Operating Section (COS), welche die Innenstadt Londons unterquert und sicherungstechnisch mit CBTC

ausgerüstet wurde. Die COS unterquert den zweiten historischen Kopfbahnhof Liverpool Street und teilt sich anschließend im Osten Londons in zwei Äste, einer Richtung Docklands und Abbey Wood (südlich der Themse) sowie einer Richtung Stratford (nördlich der Themse). Der Nordast vereinigt sich dann mit der Great Eastern Main Line und läuft parallel zu dieser bis zum Endpunkt Shenfield. Die Elizabeth Line ist 118 km lang und bedient 41 Verkehrshalte, davon 8 neue Stationen im Londoner Untergrund. Obwohl Name und Ausstattung gegenüber den Fahrgästen eine U-Bahn-Atmosphäre suggerieren, handelt es sich technisch um eine Vollbahn, welche nach geltendem, britischen Eisenbahnregelwerk errichtet wurde und betrieben wird. Sicherungstechnisch kommen das britische Class-B-System TPWS, ETCS Level 2 und CBTC zum Einsatz. Durch die moderne Leit- und Sicherungstechnik werden fahrplanmäßige Zugfolgezeiten von 120 s erreicht. Im aktuellen Fahrplan verkehren 24 Züge pro Stunde in den Spitzenzeiten.

3.2 Trenissimo Simulationsprogramm

Trenissimo ist ein modernes Simulationsprogramm, das dazu entwickelt wurde, Eisenbahnbetriebssimulationen einfacher, intuitiver und effizienter zu machen. Neben den bewährten Prinzipien „synchron und mikroskopisch“ spielt auch der realitätsnahe Dispatching-Algorithmus eine zentrale Rolle bei der Aufgabe die Simulation intuitiver zu machen. Einfach und effizient wird der Prozess durch eine klare grafische Benutzeroberfläche, verschiedene Diagrammdarstellungen und eine Replay-Funktion.

Zur Effizienzsteigerung trägt auch der skriptbasierte Ansatz bei, der die Simulation von Varianten und die Prüfung mehrerer Szenarien innerhalb eines einzigen Arbeitsschrittes ermöglicht. Dies verkürzt die sonst nötigen Vorbereitungszeiten für die Simulation deutlich, da bereits eingerichtete „Setups“ wiederverwertet werden können.

3.3 Konkrete Optimierung des Fahrplans im Anwendungsfall

London Liverpool Street Baufahrplan

Ein Beispiel, welches die Benefits einer Agilen Simulation für den tagtäglichen Betrieb illustriert, bietet die Überarbeitung der Baufahrpläne während der Arbeiten zur Bahnsteigverlängerung am Kopfbahnhof London Liverpool Street. Vor der Betriebsaufnahme des zentralen Tunnelabschnitts wendeten dort die Züge der Elizabeth Line (Ostabschnitt). Um neue, neunteilige Züge auf der wichtigen Pendlerstrecke

einsetzen zu können, mussten einige Bahnsteige verlängert werden – während des laufenden Betriebs. [1]

Durch den Einsatz Agiler Simulation konnte einerseits gegenüber dem Infrastrukturmanager aufgezeigt werden, dass die geplanten Veränderungen des Fahrplans eine nicht akzeptable Verschlechterung der Pünktlichkeit bewirkt hätten und andererseits eine bessere Alternative angeboten werden. Eine besondere Schwierigkeit bestand darin, die Auswirkungen der Bautätigkeiten auf den Bahnbetrieb zu simulieren. Daher wurden neben einem fahrbaren Baufahrplan auch mehrere „Erholungspläne“ (recovery plans) erstellt, um die betrieblichen Auswirkungen von Störungen und Unterbrechungen durch die Bauausführung zu begrenzen.

Die Baumaßnahmen konnten schließlich in zwei 10-tägigen Teilsperrpausen an Weihnachten 2020 und Ostern 2021 ohne größere Störungen umgesetzt werden. Dies zeigt die Wichtigkeit, auch bei nur kurzandauernden Baustellen nicht auf eine hochwertige und detaillierte Ausarbeitung des Baufahrplans zu verzichten.

„Weave Timetable“ Fahrplan mit Einfädeln halbschneller Vorortzüge

Ein weiteres Produkt der Agilen Simulation war der Entwurf eines Fahrplans für die Great Western Main Line, welche aus zwei zweigleisigen Bahnstrecken besteht – der Main Line (ML) und der Relief Line (RL). Generell verkehren die Züge der Bahngesellschaft GWR auf der ML, während die RL für die Verkehre der Elizabeth Line vorgesehen ist. Bei beiden Strecken handelt es sich um Hochleistungsinfrastrukturen mit fahrplanseitigen Zugfolgezeiten zwischen 2 und 3 Minuten.

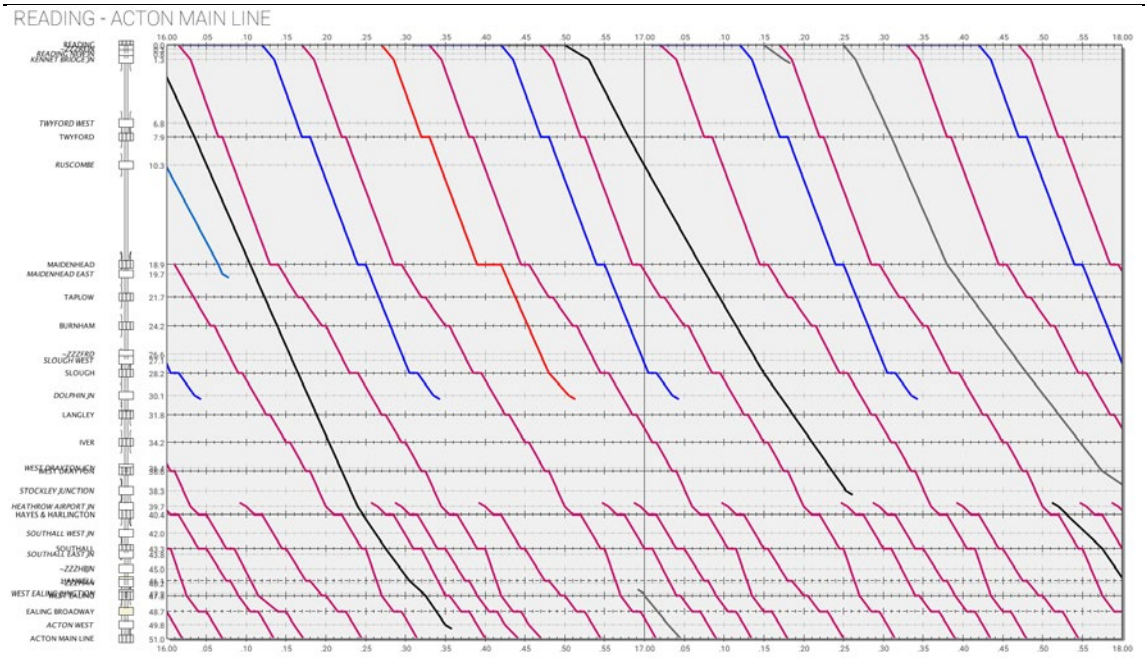


Abbildung 4: Bild Ausschnitt Fahrplan GW RL Richtung „Up“, also nach London[3]

Wie man im Fahrplan erkennen kann, fädeln einige GWR-Züge an der Überleitstelle „Dolphin Junction“ in die Relief Line ein. Dies erlaubt die Bedienung derer Haltestellen (Twyford, Maidenhead & Slough), welche sonst die Kapazität der Main Line über Gebühr einschränken würden. Der Fahrplan der GWML zeigt, dass diese Halte im dichten Gefüge der Expresszüge der ML nicht möglich wären.

[3] Farbliche Darstellung:
- lila – Elizabeth Line
- blau – Vorortverkehre GWR „Weave“
- rot – Expressverkehre GWR & Heathrow Express
- schwarz – Güterzüge
- grau – Leerfahrten

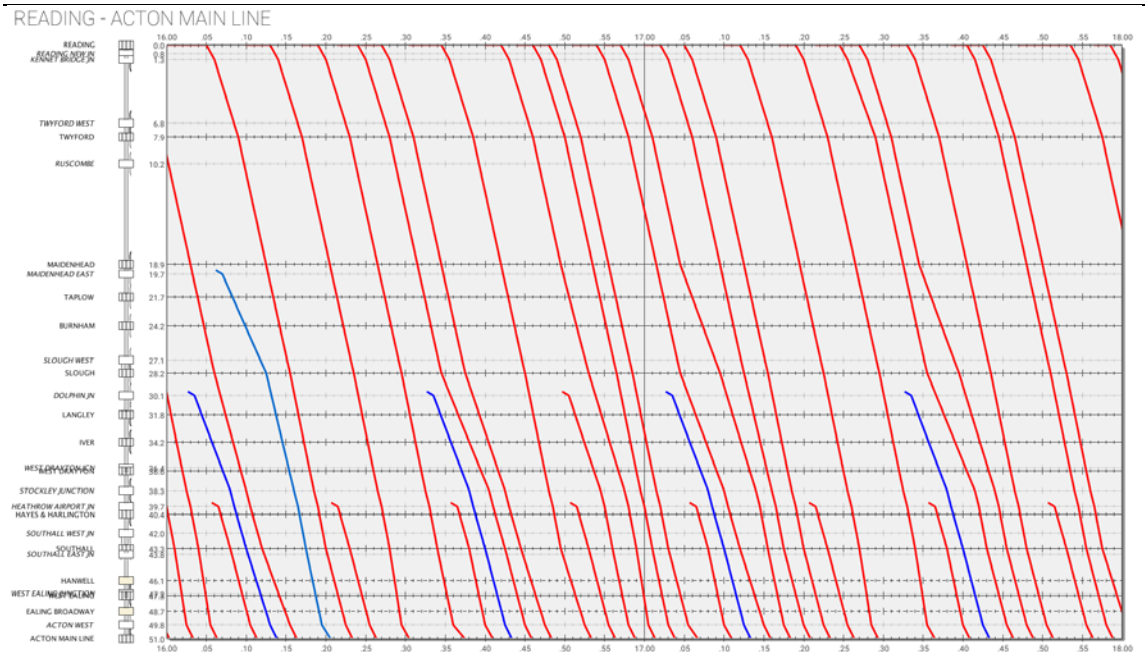


Abbildung 5: Ausschnitt Fahrplan GW ML, Richtung "Up"

Gleichzeitig werden so für Fahrgäste der Vororte schnelle Verbindungen ohne weitere Zwischenhalte nach London geschaffen.

Aus Fahrgastsicht kann diese Fahrplan-Variante als sehr attraktiv bewertet werden. Operativ birgt jedoch das Überleiten der GWR Züge auf die Infrastruktur der Elizabeth Line zusätzliche Konfliktpunkte (siehe Beispiel in Kapitel 2.2). Daher musste die Stabilität des Fahrplans mit besonderer Sorgfalt geprüft werden. Dies wurde nicht nur von MTR EL als Betreiber der Elizabeth Line, sondern ebenso von GWR und der Behörde Transport for London (TfL, als zuständige Bestellerorganisation) angemahnt.

Es zeigte sich in der Simulation des ersten Fahrplanentwurfs, dass das Ein- und Ausfädeln der Züge stabil funktioniert. Dennoch mussten einige Anpassungen am Fahrplan vorgenommen werden, um die gewünschte hohe Stabilität zu erreichen.

Neben Konflikten die sich durch außertourliche Leerfahrten mit regulären Taktverkehren ergaben, waren vor allem die Wendezeiten der EL-Züge, die bis Reading verkehrten, teilweise sehr kurz bemessen. Dadurch konnten sich Folgeverspätungen, welche aus verspäteten GWR-Zügen auf die EL übertragen wurden, auch in die Gegenrichtung fortsetzen. Verstärkt und bekräftigt wurde das Problem durch die überdurchschnittliche Länge (210 m) der EL-Fahrzeugflotte. Der Zeitaufwand für den Führerstandwechsel ist daher beachtlich und wurde in der Simulation mit einer Mindestwendezeit von 7 min

veranschlagt, ein Wert der von MTR in Messungen empirisch ermittelt wurde[4]. Bei geplanten Wendezeiten von 8 oder 9 Minuten, verbleibt somit kaum Puffer zum Verspätungsabbau.

Weitere Probleme ergaben sich durch die zahlreichen Güterzugleistungen, die auf der RL verkehren. Neben der (beherrschbaren) Schwierigkeit, die Güterzüge realitätsnah in der Simulation darzustellen, musste auch im Projektmanagement eine wichtige Frage adressiert werden:

> Welche Güterzüge verkehren tatsächlich und welche müssen in der Simulation berücksichtigt werden?

Hier gibt es mehrere Fallstricke zu beachten, je nachdem auf welche Fahrplanquelle zurückgegriffen werden kann:

- Güterzüge sind im Fahrplan, aber verkehren nur an wenigen Betriebstagen tatsächlich
- Güterzüge sind nicht im Fahrplan, weil sie kurzfristig und bei Bedarf geplant werden
- Güterzüge sind doppelt im Fahrplan (spezielles Problem in UK: sogenannte Y-paths)
- Güterzüge sind im Fahrplan, verkehren aber oft in anderen Lagen (aufgrund von Fahrplanänderungen oder Verspätungen)
- Güterzüge sind nicht oder unvollständig im Fahrplan und keiner der Projektbeteiligten verfügt über Daten

Der verwendete Fahrplan enthielt bereits zahlreiche geplante Güterzugleistungen. Durch die enge Zusammenarbeit zwischen den Verantwortlichen für Simulation und Fahrplan konnte leicht geklärt werden, welche Anzahl und welche Trassen für eine realistische Abbildung der Güterzugverkehre notwendig waren.

Eine weitere Komponente, welche im Fahrplanprozess eine hohe Bedeutung aufwies, war die Pünktlichkeit der GWR-Zugleistungen – sowohl derer die auch über die RL verkehrten, als auch derer die ausschließlich die ML nutzten. Da es sich bei den GWR-Verkehren auch um Fernverkehre mit Destinationen wie Cardiff, Bristol, Plymouth handelt, bringen diese häufig bereits Verspätungen mit. Es musste gezeigt werden, dass die ein- und ausfädelnden Verkehre keine zusätzliche Verspätung für langlaufende GWR-

[4] Die Messungen wurden durchgeführt, da die Wendezeiten einen wichtigen, kapazitätslimitierenden Faktor darstellen. Es wurden zudem technische und betriebliche Lösungen untersucht, um die Wendezeiten zu verkürzen, darunter ein ATO-System (Auto-Reverse) und „Step-down drivers“, also der Tausch von Triebfahrzeugführern bei der Bahnsteigwende.

Leistungen generieren, insbesondere für die Expressverkehre aus Wales. Durch die Einbindung der Simulation in den Fahrplandialog zwischen den Betreibern MTR und GWR und der Behörde TfL war der quantitative Beweis dieser Bedingung leicht zu führen.

4 Lessons learned

Das Verfahren der Agilen Simulation kann in drei Konstellationen als besonders gewinnbringend angesehen werden:

1. Fahrplanrevision oder Angebotsänderung im Großknoten mit zahlreichen beteiligten Verkehrsunternehmen und Stakeholdern
2. Inbetriebnahme von Infrastrukturgroßprojekten und damit einhergehende Betriebsaufnahmen
3. Fahrplanrevision mit dem Ziel die im Betrieb erzielte Pünktlichkeit zu steigern

Erfolgreich angewendet wurde das Verfahren im Vorfeld der Betriebsaufnahme auf der Elizabeth Line in London. Der zuständige Betreiber MTR setzte hierbei auf die Simulationssoftware *trenissimo* und eine umfassende Betreuung des Simulationsprozesses durch die Simulationsspezialisten von TRENOlab Srl. aus Italien. Die Fahrplanerstellung und -abstimmung mit Stakeholdern des Infrastrukturmanager (Network Rail) und den anderen Verkehrsunternehmen (GWR, c2c, Greater Anglia) erfolgte inhouse. Durch die enge Kooperation aller Beteiligter konnten zahlreiche Varianten untersucht werden und durch die hohe Präzision der Betriebssimulation selbst kleinste Veränderungen an einzelnen Zugleistungen auf ihre Auswirkungen auf das Gesamtsystem hin evaluiert werden.

Als Ergebnis wurde eine gestufte Intensivierung der Zugzahlen auf bis zu 30 Züge pro Stunde und Richtung herausgearbeitet, wobei im ersten Fahrplan nach der Eröffnung des zentralen Tunnelabschnitts zwischen Paddington und Stratford bereits 20 Züge pro Stunde und Richtung verkehren sollten. Des Weiteren wurden zahlreiche potenzielle Konfliktpunkte auf der viergleisigen, hochbelasteten, und im Mischverkehr betriebenen Great Western Main Line, identifiziert. Diese konnten im weiteren Planungsprozess angemessen berücksichtigt werden. Das Resultat: MTR Elizabeth Line ist bereits zur Betriebsaufnahme des zentralen Tunnelabschnitts der pünktlichste Betreiber im gesamten britischen Eisenbahnnetz (Pünktlichkeit bei 5 min: 84%) und der einzige Betreiber, der seine Pünktlichkeit zwischen dem Fahrplanjahr 2021 und 2022 verbessern konnte – und das trotz höherer Fahrgastzahlen! [2]

Literatur

[1] MTR UK, „Delivering a Complex Platform Extension at London's Liverpool Street Station With Minimal Passenger Disruption".

abgerufen am 13. April 2023.

[2] Office for Rail and Road, „Passenger rail performance October to December 2022".

abgerufen am 13. April 2023.

Autoren

Medeossi, Giorgio
Vortragender in englischer Sprache
TRENOlab srl
Via Giovanni Maniacco 7A, 34170 Gorizia, Italien
General Manager

Bagshaw, Mike
MTR Elizabeth Line (MTREL)
63 St Mary Axe, London EC3A 8NH, UK
Managing Director

Wimmer, Simon
TRENOlab srl
Via Giovanni Maniacco 7A, 34170 Gorizia, Italien
Planning & Operations

Session 4
Tobias Körner, Tobias Mohn, Steven Riecke, Daniel Pöhle

Die rollierende wochenweise Bauplanung aus Sicht eines EIU und EVU

Auswirkungen und Vorteile aus Sicht von DB Netz und DB Fernverkehr

Körner, Tobias[1]; Mohn, Tobias[1]; Riecke, Steven[2]; Dr. Ing. Pöhle, Daniel[2]

[1]DB Fernverkehr AG
[2]DB Netz AG

Zusammenfassung

Mit der Pilotierung der rollierenden wochenweisen Planung im August 2022 hat die DB Netz AG begonnen ihre Bauplanungssystematik grundlegend umzustellen. Um die sich daraus ergebenden Vorteile in vollem Umfang nutzen zu können, hat auch die DB Fernverkehr AG ihre Bauplanung angepasst und weiterentwickelt. In diesem Paper wird die methodische Vorgehensweise bei der Umsetzung sowie die Vorteile aus Sicht der Kunden beschrieben.

Keywords: Bauplanung, EIU, EVU, Prozessentwicklung

1 Einleitung und Problemstellung

Zur Steigerung der Kapazität und der Verfügbarkeit der Infrastruktur müssen im deutschen Schienennetz umfangreiche Baumaßnahmen geplant, koordiniert und durchgeführt werden, mit dem Ziel den Zugverkehr nicht übermäßig zu beeinträchtigen. Dieses Vorhaben ist eine Gratwanderung, denn allein im Fahrplanjahr 2022 belasteten 21.000 Baustellen – an Spitzentagen bis zu 1.200 Baustellen gleichzeitig – die Infrastruktur sowie die Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVUs). Zudem ist es das erklärte Ziel der Deutschen Bahn, mit der Umsetzung der Dachstrategie „Starke Schiene“ das Wachstum im Personen- und Güterverkehr voranzutreiben. Dies geht einher mit der

Verdopplung der Fahrgastzahlen im Fernverkehr auf über 260 Millionen Fahrgäste und der Schaffung von 30% mehr Netzkapazität (vgl.[1]).

Die Bewältigung dieses Spannungsfeldes – Wachstum bei gleichzeitig hohen Betriebseinflüssen durch Bautätigkeiten – erfordert organisatorisches Handeln sowohl auf Seite des Infrastrukturbetreibers (DB Netz AG) sowie auf Seiten der Eisenbahnverkehrsunternehmen (DB Fernverkehr AG). Einerseits werden große Baumaßnahmen mit hoher überregionaler Auswirkung in einem mehrjährigen Planungsprozess vorab koordiniert. Auf der anderen Seite müssen auch im laufenden Fahrplanjahr weitere Maßnahmen beispielsweise für kurzfristige Instandhaltung oder Fehlerbeseitigung eingeplant werden.

Der unterjährige Baufahrplan unterliegt beidseitig aktuellen und zukünftigen dynamischen Veränderungen bei gleichzeitig hoher Einlastung und überregionalem Koordinationsbedarf. Im Jahr 2022 fuhr etwa jeder zweite Fernverkehrszug (53%) durch eine Baustelle. Dieser Wert hat sich im ersten Halbjahr 2023 auf 61% erhöht. Auch bei Mehrfachbetroffenheiten d.h. Züge, die in ihrem Zuglauf mehrfach von Bauauswirkungen betroffen sind, zeichnet sich eine steigende Entwicklung ab. Im Vergleich zum Vorjahreszeitraum sind im Jahr 2023 deutlich mehr Züge von mehr als einer baubedingten Auswirkung auf den Fahrplan, wie beispielsweise (Teil-) Ausfälle, Haltausfälle/Umleitungen oder Fahrzeitverlängerungen auf dem Regelweg betroffen.

Die bisherige Kommunikation im unterjährigen Baufahrplan seitens DB Netz AG erfolgte bezogen auf einzelne Baumaßnahmen. Mehrfachbetroffenheiten und Gesamtverspätung bei mehreren gleichzeitig wirkenden Baumaßnahmen auf einem Zuglauf konnten nicht zusammenhängend in den Fahrplandokumenten dargestellt werden. Als Schritt in Richtung Umsetzung des Annex VII der Richtlinie 2012/34/EU[1], pilotiert die DB Netz AG seit August 2022 die rollierende, wochenweise Planung, um eine konsistente Sicht auf die Mehrfachbetroffenheit in die unterjährigen Fahrplandokumente zu bringen (vgl. [2]). Gleichzeitig arbeitet die DB Fernverkehr AG derzeit an der Weiterentwicklung des unterjährigen Bauplanungsprozesses. In den nächsten Punkten wird vorgestellt, welche Änderungen aus Sicht des EIU und eines EVU notwendig sind und welche Vorteile sich für die Reisenden daraus ergeben.

[1] Annex VII der Richtlinie 2012/34/EU: Gesetzliche Grundlage zur europaweit harmonisierten Abstimmung über Baumaßnahmen im europäischen Eisenbahnraum

2 Konsistente Ausregelung von Zügen mit Baubetroffenheit

Die geschilderten Punkte bildeten die Ausgangsbasis, um die rollierende wochenweise Planung zu initiieren. Zunächst wird für eine unterjährig zu koordinierende Baumaßnahme bei der DB Netz AG die baubetriebliche Einordnung durchgeführt und damit die räumliche und zeitliche Einschränkung der nutzbaren Infrastruktur festgelegt. Anschließend wird für die direkt und indirekt betroffenen Züge der Baumaßnahme ein Ausregelungsvorschlag erarbeitet, der 24 Wochen vor Baubeginn an die Verkehrsunternehmen mit dem Entwurf der Zusammenstellung vertrieblicher Folgen (ZvF-E) übergeben wird. Nach einer Stellungnahme werden gewünschte Änderungen am Ausregelungskonzept im Endstück der ZvF festgeschrieben und 15 Wochen vor Baubeginn übergeben. Wie in Abbildung 1 aufgeführt, folgt dem ZvF Endstück entweder direkt oder acht Wochen vor Baubeginn das Übergabeblatt (ÜB), das zur Feinplanung der Baumaßnahme mit fahrdynamisch gerechneten Fahrzeiten dient. Drei Wochen vor Baubeginn wird mit der Fahrplananordnung (Fplo) der finale Fahrplan übergeben.

	ZvF Entwurf	ZvF Endstück	ÜB	Fplo
	ZvF Entwurf	**ZvF-Endstück**	**Übergabeblatt**	**Fahrplananordnung**
Zeitpunkt der Versendung vor Baubeginn:	24 Wochen	15 Wochen	15 oder 8 Wochen	3 Wochen
Daten:	- Geschätzte Zeiten (Änderungen nach Feedback möglich)	- Geschätzte Fahrzeiten - Grobplanung	- Gerechnete Fahrzeiten - Feinplanung	- Gerechnete Fahrzeiten - Finaler Fahrplan

Abbildung 1: Übersicht der unterschiedlichen Baudokumente (Quelle: eigene Darstellung)

Eine der Herausforderungen sowohl für den Infrastrukturbetreiber als auch die Verkehrsunternehmen wird in Abbildung 2 dargestellt. Bei zeitlich überlappenden Bauzeiträumen besteht die Problematik unter anderem darin, dass durch die baumaßnahmenbezogene Planung und Kommunikation die ZvF-Dokumente zu unterschiedlichen Zeitpunkten an die Verkehrsunternehmen übergeben werden. Diese unabhängige Planung je Baumaßnahme führt dazu, dass keine konsistenten Regelungen mit allen Auswirkungen auf den Zuglauf eines Zuges (z. B. Fahrzeitverlängerungen, Umleitungen oder Haltausfällen) möglich ist.

Durch die parallele, aber zeitlich etwas versetze Planung bei sich überlappenden Baumaßnahmenzeiträumen ist die Identifikation von Mehrfachbetroffenheiten ebenfalls besonders herausfordernd, da die jeweiligen Planungen der gleichzeitig wirkenden Maßnahmen noch nicht abgeschlossen ist.

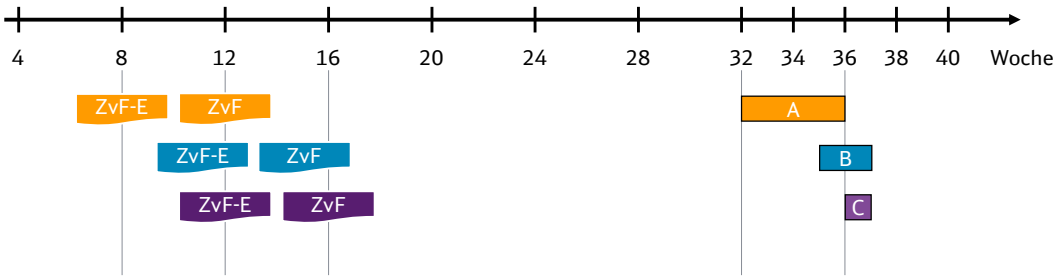


Abbildung 2: Beispiel überlappender Baumaßnahmen (Quelle: eigene Darstellung)

Die konsistente Planung und Betrachtung der Mehrfachbetroffenheit war jedoch eine der wichtigsten Anforderung der EVUs, um die eigenen betrieblichen Planungsprozesse (z.B. Umläufe) und zudem Informationsmedien für Kunden und Vertrieb (Fahrplanauskunft, Fahrscheinverkauf, Reservierungen u. dgl.) auf einer stabilen Basis durchführen zu können. Mit dem neuen wochenweise rollierenden Planungsprozess hat die DB Netz AG unter Beibehaltung der Fristzeitpunkte die interne Planungslogik so verändert, dass gleichzeitig wirkende Baumaßnahmen auch gleichzeitig betrachtet werden können. Dies gelingt dadurch, dass die Baumaßnahmen mit einer Wochen- und Korridorsicht ausgeregelt werden, statt isoliert für sich während der gesamten Maßnahmendauer. Zusätzlich zur internen Prozessbetrachtung, wurden die EVU marktübergreifend im Rahmen eines Kundenbeirats eng und proaktiv in die Prozessumstellung eingebunden. Dabei konnten gemeinsam Herausforderungen analysiert und Gegensteuerungsmaßnahmen abgeleitet werden.

3 Methodische Vorgehensweise für die Prozessanpassungen bei DB Fernverkehr

Bei der DB Fernverkehr AG werden die Verarbeitung von Fahrplan- und Bauinformationen im Bereich „Fahrplan und Verkehrsleitung“ gebündelt und bearbeitet. Ziel dieser organisatorischen Aufstellung ist, durch klare Verantwortlichkeiten und

definierte Prozesse einen „Fahrplans aus einer Hand“ zu gewährleisten. Der Begriff „Fahrplan“ inkludiert hierbei Angebotselemente, Kundenfahrplan sowie die Produktionsplanung (Planungen des Fahrzeugeinsatzes, der Triebfahrzeugführer:innen und Zugbegleiter:innen im Bordservice).

Um die beschriebenen Vorteile der rollierenden, wochenweisen Planung wirksam und effizient in die Bauplanungsprozesse zu integrieren, wurde im 2. Halbjahr 2022 das Projekt „Integrierter Prozess Produktionsplanung (IPP)“ gestartet. Im Rahmen der ersten Projektphase wurden durch eine umfassende Ist-Analyse in Form einer Swimlane-Prozessdarstellung alle Kernprozesse der Bauplanung inklusive aller beteiligten Schnittstellen (i.d.R. veränderte Ressourcenbedarfe bei Trasse, Fahrzeug und Personal) transparent gemacht. Das Ergebnis dieser Arbeitsphase hat deutlich gezeigt, dass die bisherige Arbeitsweise bzw. die Prozesslandschaft im Bereich der unterjährigen Bauplanung und Baukoordination nicht auf die neue Lieferlogik der Baudokumente seitens DB Netz ausgelegt bzw. abgestimmt ist. Daher lag der klare Fokus in der anschließenden Modellierung des Soll-Prozesses vor allem darauf, den Bauplanungsprozess inklusive aller angrenzenden Schnittstellen nach dem sich aus der rollierenden Planung ergebendem „Wochentakt“ anzupassen und eine klare Messbarkeit der Prozessstabilität und -güte herzustellen.

Der neue „Wochentakt“ ergibt sich aus der Bündelung der Baumaßnahmen zu einer Wochen- und Korridorsicht (siehe Kap.2). Jede Woche liefert DB Netz ZvF Endstücke bzw. Übergabeblätter (ÜB) mit einem Vorlauf von 15 Wochen vor Baubeginn. Alle notwendigen Prozessschritte im Rahmen der Bauplanung sowie der Personal- und Fahrzeugplanung müssen innerhalb von 15 Takten bzw. 15 Wochen synchronisiert, ausgeführt und abgeschlossen sein. Um die bestmögliche Datenqualität sowie die höchste Datenkonsistenz zu gewährleisten, wurden im Soll-Prozess drei neu definierte Übergabepunkte bzw. Etappenziele zu festgelegten Zeitpunkten implementiert. An jedem dieser Übergabepunkte werden definierte Planungsstände in Form von Datenabzügen aus dem Produktionsplanungssystem zu den Systemen der Personalplanung für Bordservice und Triebfahrzeugführer weitergegeben. Eine bereichsübergreifende Datenintegration trotz unterschiedlicher IT-Systeme wird dadurch sichergestellt. Die Systematik der Datenabzüge folgt der Logik von „grob zu fein“. Die ersten Daten basieren zunächst auf Grundlage von Schätzzeiten aus den ZvF Dokumenten. Dabei ist es unerheblich, ob ein Zug nur in einem Baukorridor von einer Baumaßnahme betroffen ist oder von Baumaßnahmen in mehreren aufeinanderfolgenden Baukorridoren. Wie in Kap. 2 beschrieben, sind die ZvF-Endstücke der unterschiedlichen Baukorridore inhaltlich aufeinander abgestimmt und gehen gleichzeitig in der Bauplanung ein.

Fahrzeitauswirkungen auf den Gesamtzuglauf auf Basis dieser ersten Schätzungen können dadurch deutlich früher in das Produktionsplanungssystem eingearbeitet werden. Die Schätzzeiten werden nach Eingang des Übergabeblattes durch die fahrplanerisch gerechneten Zeiten ersetzt und letztlich auf Konsistenz mit den Daten aus dem betrieblichen Baufahrplan abgeglichen. Die Darstellung des beschriebenen IPP Soll-Prozesses inklusive der Einbindung der Schnittstellen wird in Abbildung 3 verdeutlicht.

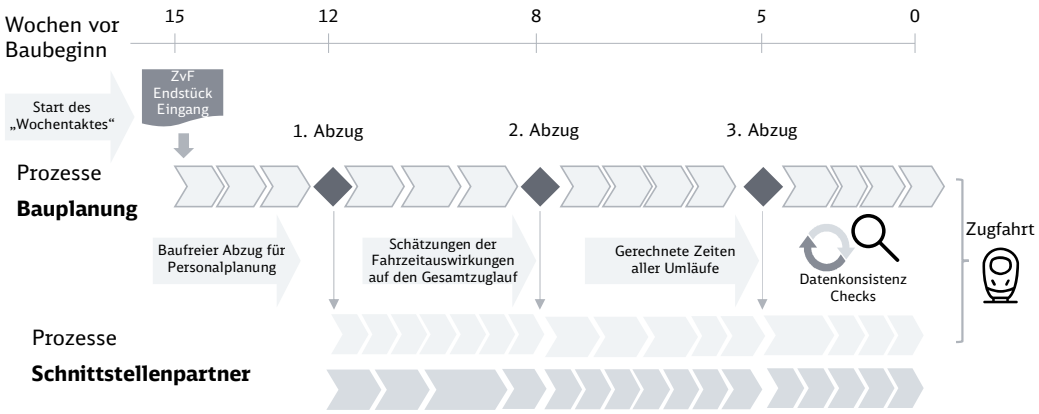


Abbildung 3: Vereinfachte Darstellung des Soll-Prozesses in der Bauplanung (Quelle: eigene Darstellung)

Um den Status des Prozessdurchlaufes im Blick zu behalten sowie jenen aktiv steuern zu können, wurde eine umfassende Zielmetrik bzw. ein Kennzahlenset entwickelt. Dieses beinhaltet neben Ergebniskennzahlen, mit welchen der Prozessdurchlauf an den jeweiligen Meilensteinen retrospektiv bewertet werden und somit erkanntes Verbesserungspotential genutzt werden kann, auch Prozesskennzahlen zur aktiven Steuerung der Prozessdurchführung. Dabei stehen vor allem die Kernelemente des Prozesses, die Datenabzüge aus dem System des unterjährigen Baufahrplans in die Systeme der internen Stakeholder (Personalplanung, Fahrzeugmanagement und Werkeverbund) im Fokus. Der Hochlauf des aktuellen Einarbeitungsstandes, der von der DB Netz AG gelieferten Baudokumente, wird bereits im zeitlichen Zulauf auf die Abzüge überwacht, sodass wenn nötig reagiert werden kann und so die Vollständigkeit der Datenabzüge sichergestellt ist. Neben der Vollständigkeit der Daten, gilt deren Qualität als weiterer Aspekt. So dürfen zum Zeitpunkt eines Abzuges beispielsweise keine Platzhalter oder Ortsbrüche in den bearbeiteten Laufplänen existieren. Zusätzlich zu den internen Stakeholdern spielen auch externe Beteiligte, im Wesentlichen die Reisenden, eine wichtige Rolle, weshalb auch diese in der Zielmetrik berücksichtigt werden. Hierbei

werden sowohl die Rechtzeitigkeit als auch die Konsistenz der Information der Reisenden über (Teil-) Ausfälle, Haltausfälle, Vorplanfahrten oder zu erwartende Fahrzeitverlängerung betrachtet. Weitere Kennzahlen wurden mit Blick auf Störgrößen, welche auf den Prozess wirken, konzipiert, wodurch bereits frühzeitig gegengesteuert werden kann. So können einzelne störende Einflüsse einen erfolgreichen Prozessdurchlauf nicht einschränken.

4 Ergebnisse und Nutzen der implementierten Prozess-umstellungen

Durch die Lieferung der Baudokumente im „Wochentakt“ konnten unterschiedliche methodische und organisatorische Änderungen innerhalb der Bauplanung der DB Fernverkehr AG umgesetzt werden, und es ergeben sich die folgenden Vorteile:

- Der „Wochentakt“ stabilisiert dabei den Bauplanungsprozess durch frühzeitigere Baubearbeitung in der Produktionsplanung und plant künftig den Fahrzeugumlauf zu einem früheren Zeitpunkt auf Basis der ersten Schätzungen der Fahrzeitauswirkungen auf den Gesamtzuglauf.
- Der Integrierte Prozess Produktionsplanung bündelt zudem die Verarbeitung von Fahrplan- und Bauinformationen innerhalb der Bauplanung und ermöglicht es, neue Übergabepunkte von Arbeitsständen zu internen Personalplanungsbereichen (für Triebfahrzeugführer:innen und Zugbegleiter:innen) zu implementieren. Dadurch können baubedingte Personalplanungs- sowie Fahrzeugänderungen früher berücksichtigt werden.
- Die Einführung einer integrierten Sicht auf alle Planungsstände (Kundenfahrplan, Fahrzeug, Personal) ermöglicht ein systematisches Prüfen auf Konsistenz im Sinne “Vollständigkeit und Synchronität”.
- Aufgrund der rechtzeitigeren Antizipation der Bauzustände lassen sich somit ressourcenbedingte (Teil-) Ausfälle früher identifizieren und diese können hierdurch ca. 3 Wochen früher in Buchung- und Reiseauskunftsprozess berücksichtigt werden.
- Darüber hinaus wird die Veröffentlichung von Fahrzeitänderungen, teilweise auf Basis von Fahrzeitschätzungen der DB Netz AG, in Richtung der Reisenden früher stattfinden.

- Mithilfe der umfassend erweiterten Zielmetrik lässt sich der Prozessdurchlauf besser messen, sodass frühzeitiger und gezielter auf Störeinflüsse reagiert werden kann.

5 Ausblick

Sowohl bei der DB Netz AG als auch bei der DB Fernverkehr AG stehen in den nächsten Monaten die Stabilisierung der Ergebnisse sowie weitere Anpassungen im Rahmen des kontinuierlichen Verbesserungsprozesses im Fokus. Beispielsweise soll bei der DB Netz AG eine stärkere Automatisierung den manuellen Arbeitsaufwand bei Durchführung der rollierenden wochenweisen Planung reduzieren. In den nächsten Jahren wird die DB Netz AG die Implementierung von Annex VII weiter vorantreiben, um noch mehr Baumaßnahmen bereits im Netzfahrplan auszuregeln und für die erst unterjährig geplanten Baumaßnahmen früher als bisher vollständig gerechnete und konsistente Baufahrpläne an die Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) liefern zu können. Die DB Fernverkehr AG wird auch nach Abschluss des Projektes „IPP“ den unterjährigen Bauplanungsprozess weiterentwickeln. Im Fokus stehen hierbei vor allem die schrittweise Integration aller Produktions- sowie Personalplanungsdaten in die Planungssysteme sowie die Verbesserung der Reisendeninformation.

6 Schlussteil

Danksagung

Wir bedanken uns bei allen Mitarbeiter:innen der DB Netz AG sowie der DB Fernverkehr AG, die sich mit ihrem Einsatz und Fachkompetenz an der Konzeption und Umsetzung der rollierenden wochenweise Bauplanung sowie im Projekt IPP eingebracht haben.

Quellen

[1] Deutsche Bahn AG: Lagebericht und Jahresabschluss 2022. S.22 ff. (DBAG_22_Web_01.pdf (deutschebahn.com)

[2] Pöhle, D.; Hüller, M.; Bormet, J.: Kapazitätssteuerung im Baubetriebsmanagement mit einem neuen rollierenden Planungsprozess. ETR Eisenbahntechnische Rundschau (2022), Heft 9, S. 66 – 69

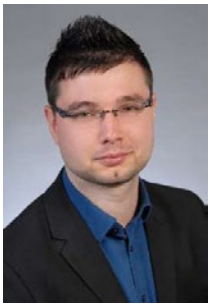
Session 4
Tobias Körner, Tobias Mohn, Steven Riecke, Daniel Pöhle

Autoren

Körner, Tobias
Leiter Entwicklung Betrieb; DB Fernverkehr AG, Frankfurt am Main;
Leiter der Abteilung Entwicklung Betrieb bei DB Fernverkehr AG, studierte an der FH Erfurt Wirtschaftsingenieurwesen mit Schwerpunkt Eisenbahnwesen

Mohn, Tobias
Senior Referent Strategie und Konzepte Betrieb, DB Fernverkehr AG, Frankfurt am Main

Riecke, Steven
Senior Projektmanager Fahrplan und Baubetriebsmanagement, DB Netz AG, Frankfurt am Main
Projektleiter für das DB Netz Projekt „ZvF-Stafette“



Dr.-Ing. Pöhle, Daniel
Leiter Netzfahrplan; DB Netz AG, Frankfurt am Main;
Leiter der Abteilung Netzfahrplan in der Zentrale der DB Netz AG, studiert und promoviert an der TU Dresden im Fach Verkehrsingenieurwesen mit Schwerpunkt Verkehrsströmungslehre und Eisenbahnverkehr

IRSA 2023

SESSION 5

ENERGIEVERSORGUNG
ENERGY SUPPLY

Session 5
Julian Kadar, Peter Wasserscheid, Lars Schnieder

Einsatz flüssiger organischer Wasserstoffträger in Schienenfahrzeugen

Kadar, Julian[1], Wasserscheid, Peter[1], Schnieder, Lars[2]

[1]Forschungszentrum Jülich GmbH, Helmholtz Institute Erlangen-Nürnberg for Renewable Energy
[2]ESE Engineering und Software-Entwicklung GmbH

Der Schienenverkehr leistet bereits heute einen wesentlichen Beitrag zum umweltfreundlichen Transport von Gütern und trägt zur ressourcenschonenden Mobilität im Alltag bei. Die Leistungsfähigkeit soll zukünftig weiter ausgebaut werden, die Strategie dabei ist klar: Weg von fossilen Brennstoffen und hin zu erneuerbaren Energien. Für die Triebfahrzeuge auf der Schiene bedeutet dies zunächst einmal den Einsatz von elektrischen Antrieben. Ihr Einsatz ist jedoch nicht flächendeckend möglich.

Unzureichende Elektrifizierung erfordert alternative Antriebskonzepte

Der Elektrifizierungsgrad des deutschen Schienennetzes erlaubt zurzeit als auch in naher Zukunft keine ausschließliche Energieversorgung der Triebfahrzeuge über Oberleitung oder Stromschiene. Der Elektrifizierungsgrad beträgt aktuell rund 61,5 % des Streckennetzes bei einer Betriebslänge (nur DB Netz) von 33.401 km (Stand 2021) [1]. Auf das gesamte deutsche Eisenbahnnetz gesehen ist der Elektrifizierungsgrad noch geringer. Deutschland bewegt sich damit im europäischen Mittelfeld. Die Kosten für eine vollständige Streckenelektrifizierung ohne Umstellung des rollenden Materials wurden von der Bundesnetzagentur vor einigen Jahren mit rund 28 Mrd. EUR veranschlagt. Aufgrund der aktuellen Randbedingungen (u. a. gestiegene Rohstoff- und Energiepreise) ist dieser Wert jedoch noch deutlich zu niedrig angesetzt. Es wird also dauern, bis die Vollelektrifizierung tatsächlich umgesetzt werden kann. Priorisierungen für die nachträgliche Elektrifizierung von Strecken mit hoher Nachfrage und strategischer Bedeutung gibt es bereits seit Längerem [2]. Soll ein emissionsfreier bzw. stark emissionsreduzierter Bahnverkehr auf nicht-elektrifizierten Strecken erzielt werden, erfordert dies alternative Antriebskonzepte.

Prinzip LOHC-basierter Wasserstoffspeicherung und -freisetzung

Als flüssige organische Wasserstoffträger (englisch: liquid organic hydrogen carriers, LOHC) werden organische Verbindungen bezeichnet, die Wasserstoff durch chemische

Reaktion aufnehmen und wieder abgeben können. LOHC ermöglichen es also, Wasserstoff in einer Flüssigkeit speichern. Diese kann anschließend sicher und unkompliziert in großen Mengen gelagert und transportiert werden. LOHCs können daher als Speichermedien für Wasserstoff in mobilen Anwendungen wie Schienenfahrzeugen verwendet werden. Prinzipiell kann jede ungesättigte Verbindung (organische Moleküle mit C-C Doppel- oder Dreifachbindungen) bei Hydrierung Wasserstoff aufnehmen. Jedoch erfüllen nur manche Verbindungen auch alle notwendigen Eigenschaften zur Nutzung als Speichermedium:

- *Umkehrbarkeit der Wasserstoffaufnahme:* Entscheidend für die Anwendbarkeit als LOHC ist die Umkehrbarkeit der Wasserstoffaufnahme bei technisch sinnvollen Bedingungen. Prinzipiell ist jede ungesättigte Kohlenwasserstoff-Verbindung in der Lage, durch Hydrierung Wasserstoff aufzunehmen. Lediglich zyklische organische Verbindungen erlauben jedoch eine vollständige Wasserstofffreisetzung bei Temperaturen von unter 300 °C.
- *Flüssiger Aggregatzustand während der Lagerung und Logistik:* Um eine einfache Handhabung (Pumpbarkeit u. a.) zu gewährleisten, ist der flüssige Aggregatzustand wichtig. [3] Das heißt, dass sowohl ein Festwerden bei winterlichen Temperaturen zu vermeiden ist, als auch ein Verdampfen an heißen Sommertagen. Hierbei ist zu beachten, dass ein LOHC-System im Laufe des Prozesses in verschiedenen Formen bzw. Hydriergraden vorliegt: der dehydrierten (wasserstoffarmen bzw. entladenen) Form, der hydrierten (wasserstoffreichen bzw. beladenen) Form und teilhydrierten Formen. Je nach Hydriergrad besteht das LOHC-System also aus einer Mischung von nicht-, teil-, oder voll-hydrierten Trägermolekülen. [4]
- *Temperatur- und Zyklenstabilität:* Da ein LOHC recycliert, d. h. immer wieder neu mit Wasserstoff be- und entladen wird, sollte möglichst wenig Zersetzung auftreten. Dabei ist neben den hohen Temperaturen im Prozess auch die Anwesenheit katalytisch-aktiven Materials während der Hydrierung und Dehydrierung zu beachten. Die LOHCs Benzyltoluol und Dibenzyltoluol werden unter ihren Handelsnamen Marlotherm LH und Marlotherm SH industriell als Wärmeträgeröle eingesetzt und sind daher gut im dauerhaften Einsatz bei hohen Temperaturen untersucht und haben sich hierfür etabliert. Für eine hohe Raum-Zeit-Ausbeute der verfahrenstechnischen Schritte ist es wichtig, dass das LOHC in der Flüssigphase verbleibt. Bei diesem feststoffkatalysierten Prozess bietet eine Flüssigphase bei hohen Temperaturen den Vorteil, dass mögliche schwersiedende

Nebenprodukte fortlaufend vom Katalysator abgewaschen werden und somit eine Verkokung des Katalysators verhindert wird. [5]

In der Literatur werden folgende aromatische LOHC-Systeme als besonders wichtig beschrieben: Toluol/Methylcyclohexan, Benzyltoluol/Perhydrobenzyltoluol und Dibenzyltoluol/Perhydrodibenzyltoluol. [6, 7] Insbesondere die letzten beiden Systeme zeichnen sich durch ihre niedrigen Dampfdrücke aus.

Verfahren der LOHC-basierten Wasserstoffspeicherung und -freisetzung

Das LOHC-Verfahren besteht aus den zwei wesentlichen Verfahrensstufen der Hydrierung und der Dehydrierung:

- *Verfahrensschritt der Hydrierung:* Zur Aufnahme von Wasserstoff reagiert die dehydrierte Form des LOHCs (eine ungesättigte, meist aromatische Verbindung) in einer Hydrierungsreaktion mit dem Wasserstoff. Die Hydrierung ist eine exotherme Reaktion und wird bei erhöhten Drücken (ca. 20 - 30 bar) und Temperaturen von ca. 150 - 200 °C in Gegenwart eines heterogenen Katalysators durchgeführt. Im Falle der aktuell bevorzugten LOHC-Systems Benzyltoluol/Perhydrobenzyltolul können so 6,2 Gewichtsprozent H_2 gespeichert werden. Dabei wird die korrespondierende gesättigte Verbindung gebildet, die bei Umgebungsbedingungen gelagert beziehungsweise transportiert werden kann. Der Verfahrensschritt der Hydrierung findet nicht auf dem Schienenfahrzeug statt, sondern an Orten mit hohem Vorkommen an erneuerbaren Energien, wie z.B. bei schottischen Windparks oder äquatornahen Photovoltaikanlagen. Die weltweite Logistik des LOHCs geschieht in Tanks, Schiffen, LKWs und Umfüllstationen, die bereits für Dieselkraftstoffe genutzt werden, da diese mit nur geringen Modifikationen kompatibel sind. Das beladene Trägermedium kann anschließend in einen Tank des Schienenfahrzeugs gefüllt werden.
- *Verfahrensschritt der Dehydrierung:* Wird der Wasserstoff wieder benötigt, wird die nun hydrierte, wasserstoffreiche Form des LOHCs dehydriert, wobei der Wasserstoff wieder aus dem LOHC freigesetzt wird. Diese Reaktion ist endotherm und erfolgt bei erhöhten Temperaturen (250 - 320 °C) wieder in Gegenwart eines heterogenen Katalysators. Zur Steigerung der Effizienz sollte die im heißen, aus der Freisetzungseinheit austretenden, Stoffstrom enthaltene Wärme auf den kalten, in die Freisetzungseinheit eintretenden, Stoffstrom aus wasserstoffreichem LOHC übertragen werden, um den Energiebedarf für dessen Vorwärmung vor der Reaktion gering zu halten. Der Verfahrensschritt der

Dehydrierung findet zusammen mit der Verstromung des freigesetzten Wasserstoffs in einer Brennstoffzelle auf dem Schienenfahrzeug statt.

Abbildung 1 zeigt den gesamten Verlauf der LOHC-Technologie von der Quelle der Energie inklusive Elektrolyse und Hydrierung bis hin zum Verbraucher inklusive Dehydrierung und Brennstoffzelle. Dabei ist auch der Kreislauf mit der Rückführung des LOHCs zur Quelle und die Wiederbeladung des LOHCs mit Wasserstoff verdeutlicht. Die Rückführung kann mit denselben Transportmitteln stattfinden, wie die Versorgung.

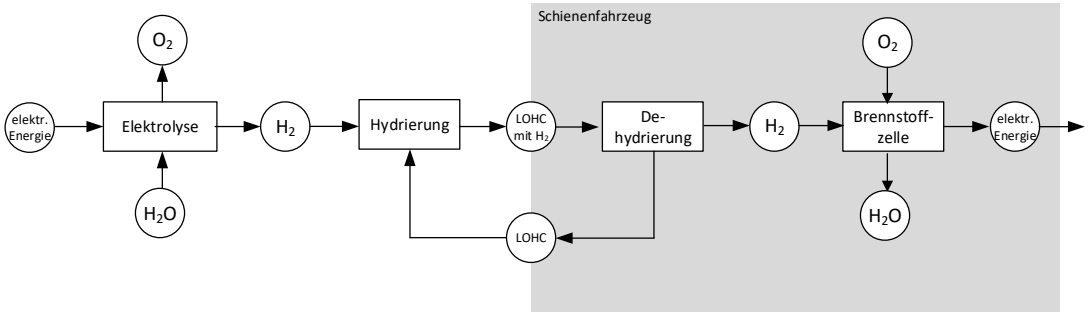


Abbildung 1: Schema eines LOHC-Verfahrens zur Speicherung und Wiederfreisetzung von elektrischer Energie für ein Schienenfahrzeug

Die LOHC-Technologie ermöglicht es, Energiequellen und Verbraucher sowohl zeitlich, als auch örtlich voneinander zu entkoppeln. Aufgrund der Kompatibilität aller LOHC-Komponenten zu Diesel-Tanks kann die bestehende Infrastruktur mit nur geringen Modifikationen weiter genutzt und so auch im Maßstab einer weltweiten Nutzung kostengünstig eine LOHC-Wasserstoff-Energieinfrastruktur aufgebaut werden. Diese erlaubt die Einbindung von Regionen mit hohem Potential für die Erzeugung von grünem Wasserstoff und dessen Nutzung z.B. im Schienenverkehr auf nicht elektrifizierten Strecken. Den Vergleich zu bereits weiter verbreiteten Wasserstoffspeichertechnologien, wie hochverdichtetem Wasserstoff oder tiefkalt verflüssigtem Wasserstoff (LH_2), aber auch lokal CO_2 emittierende Technologien, wie Methanol und Fischer-Tropsch-Diesel zieht Runge et.al. in einer im Jahr 2020 veröffentlichten Studie. Betrachtet wird die gesamte Wertschöpfungskette von der Erzeugung über die Wandlung zur Speicherung bis hin zur Verwertung. Sieben auf dem Globus verteilte Standorte, die sich für eine nachhaltige Erzeugung von Wasserstoff eignen, werden in die Studie einbezogen. Von diesen ausgehend werden die Aufwände für die gesamte Wertschöpfungskette von Erzeugung über Transport per Schiff und LKW bis hin zu den H_2-Tankstellen und der lokalen Kompression für die Befüllung von 700 bar-Fahrzeugen evaluiert. Für den

Transport von LOHC können leicht modifizierte (e.g. Dichtungswerkstoffe an Pumpen und Ventilen) Tanklager, Tankschiffe und Tanklaster der bestehenden Diesel-Infrastruktur verwendet werden. Für LH_2 hingegen müssen spezielle Schiffe und LKW-Trailer, die sich insbesondere auf die Investitionskosten auswirken, gebaut werden. Der Vergleich zwischen diesen beiden Wasserstoffverteilungstechnologien und dem konventionellen Diesel wird anhand eines Anwendungsbeispiels gezogen: Ein LKW wird von der globalen Energiequelle bis hin zum durchschnittlichen Verbrauch über 100 km betrachtet. Während Diesel etwa 15 €/100 km kostet, werden für LOHC und LH_2 Kosten von gleichermaßen jeweils 28 bis 48 €/100 km fällig – maßgeblich abhängig von der Transportstrecke und dem Produktionsland. [8] Bei Verwendung der LOHC-Technologie könnte jedoch etwa ein Viertel der Kosten eingespart werden, wenn an Tankstellen das H_2 nicht für 700 bar Fahrzeuge komprimiert, sondern das LOHC direkt in Fahrzeuge getankt und das H_2 auf diesen drucklos freigesetzt und in Brennstoffzellen verstromt wird. Dieses Konzept soll, anhand eines Schienenfahrzeugs im Folgenden näher beleuchtet werden.

Vorteile der Anwendung des LOHC-Prinzips bei Schienenfahrzeugen

Das Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie fördert die Erforschung und Entwicklung der Liquid-Organic-Hydrogen-Carrier (LOHC)-Technologie für den mobilen Einsatz am Beispiel der Schienenfahrzeugtechnik am Helmholtz-Institut Erlangen-Nürnberg. Das Fördervolumen beträgt insgesamt über 28 Mio. €. In dem Projekt geht es unter anderem darum, die Apparate, die für die Freisetzung des Wasserstoffs aus LOHC-Systemen benötigt werden, für mobile Anwendungen weiterzuentwickeln. Hierfür werden Erfahrungen, die in technischen Laboraufbauten gesammelt wurden, in verschiedenen Stufen zunächst in Laboraufbauten skaliert und entsprechend den Anforderungen für den Bahnbetrieb angepasst. Mit dem Einsatz der LOHC-Technologie in Schienenfahrzeugen eröffnen sich die folgenden Vorteile:

- Ermöglichen eines emissionsfreien Betriebs von Zügen auf nicht elektrifizierten Strecken.
- Verlängerung der Reichweite der von batterieelektrischen Fahrzeugen um ein Vielfaches.
- Vereinfachung der Logistik der Anlieferung und Betankung von Wasserstoff, dadurch, dass das störanfällige mechanische Verdichten des Wasserstoffs an den Tankstellen auf 700 bar umgangen wird. [9]

Anordnung des LOHC-PowerPacks im Versuchsträger

Im Förderprojekt wird der LOHC-basierte Wasserstoffantrieb auf einem „Tender“ in Form eines LOHC-PowerPacks realisiert. Dieses versorgt im Zugverbund eine Lokomotive mit elektrischer Energie für die Traktion. Die Komponenten sind hierbei in ISO-Containern untergebracht. Dieser Ansatz hat die folgenden Vorteile:

- *Bereitstellung der Traktionsenergie an ein bereits zugelassenes Schienenfahrzeug:* Im Projekt wird ein bereits zugelassenes Schienenfahrzeug (Lokomotive) eingesetzt. Die zusätzlichen Komponenten für die Bereitstellung und Aufbereitung der Traktionsenergie befinden sich außerhalb des Schienenfahrzeugs in einem „Tender“. Hieraus ergeben sich lediglich für die Auslegung der Bereitstellung und Aufbereitung der Traktionsenergie durch das Projekt zu berücksichtigende Randbedingungen. Für das Schienenfahrzeug sind bereits im Rahmen der Zulassung erforderlichen Funktionsnachweise erbracht worden und bleiben unverändert erhalten.
- *Anordnung der Komponenten für die Bereitstellung und Aufbereitung der Traktionsenergie auf einem zugelassenen Güterwaggon (“Tender”):* Im Projekt wird ein bereits zugelassener vierachsiger Containertragwagen verwendet. Für den zugelassenen Güterwaggon sind bereits im Rahmen der Zulassung alle nach erforderlichen Funktionsnachweise erbracht worden und bleiben unverändert erhalten.
- *Anordnung der technischen Aggregate in standardisierten Gehäusen (ISO-Container):* Damit kann auf genormte Großraumbehälter aus Stahl zurückgegriffen werden, die ein einfaches und schnelles Verladen, Befördern, Lagern und Entladen von Gütern bei der Bahn ermöglichen. Die Anordnung in Container ermöglicht auch einen flexiblen Übergang von der Laborumgebung auf den Versuchsträger für die praktische Erprobung im Bahnumfeld.

Abbildung 2 verdeutlicht das hier vorgestellte LOHC-PowerPack mit seinen Hauptkomponenten anhand einer 3D-Skizze. Hierbei sind die Tanks, die gesamte Verfahrenstechnik zur Freisetzung von Wasserstoff und dessen anschließende Verstromung übersichtlich dargestellt. Die einzelnen Hauptkomponenten werden nachfolgend in ihrem verfahrenstechnischen Zusammenhang beschrieben.

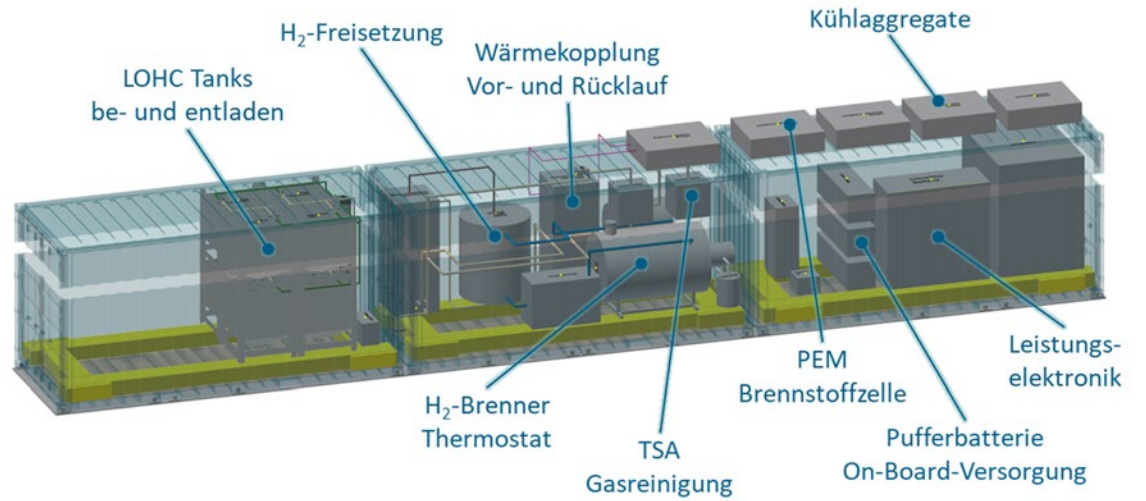


Abbildung 2: 3D-Skizze des LOHC-PowerPack

Der Container auf der linken Seite dient der *Traktionsenergiemitführung*. Das LOHC wird auf diesem Versuchsträger in herkömmlichen Edelstahl-IBC-Tanks mitgeführt, welche so miteinander verbunden sind, dass sie zunächst das beladene und später das entladene LOHC aufnehmen. Ziel dieser Baugruppe ist die emissionsfreie Übertragung und Speicherung der für den Betrieb des Schienenfahrzeugs erforderlichen Traktionsenergie im Rahmen spezifizierter Grenzen und im ausreichenden Maß. Die LOHC-Kapazität kann, je nach Anwendungsfall, durch die Anzahl der IBC-Tanks – unabhängig von der Leistung des Freisetzungsapparats – skaliert werden. In geplanten Demonstrator ist mit 6 m³ (entspricht knapp 6 Tonnen) LOHC ausreichend Energie für 8 Stunden Fahrbetrieb mit durchschnittlich 150 kW Traktionsleistung vorgesehen. Für die gleiche Kapazität müssten etwa 13 Flaschenbündel mit je 12x300 bar mitgeführt werden, welche in Summe etwa 19 m³ Volumen umfassen und etwa 19 Tonnen wiegen würden. [10] Im Gegensatz zu Gasflaschen für Wasserstoff sind die IBC-Tanks für LOHC drucklos gefüllt und sind aufgrund des hohen Flammpunkts und der hohen Zündtemperatur des verwendeten LOHC-Systems nicht entzündbar. Hieraus ergibt sich eine sichere Anwendung.

Der mittlere Container dient der *Traktionsenergiefreisetzung und -wandlung.* Hier wird der Wasserstoff mittels des oben beschriebenen Verfahrens in einer katalytischen Reaktion aus dem beladenem LOHC freigesetzt. Die für diese Wärme-verbrauchende Reaktion erforderliche Wärme wird direkt aus dem freigesetzten Wasserstoff entnommen

und mit Hilfe eines Brenners über einen Thermalölkreis dem Wasserstoff-Freisetzungsprozess zugeführt. Der Apparat für die Wasserstofffreisetzung ist auf die Leistung der Brennstoffzelle abgestimmt, um diese im Fahrbetrieb durchgehend mit Wasserstoff versorgen zu können und eine Wandlung in elektrische Traktionsenergie sicherzustellen.

Der rechte Container dient der *Traktionsenergieanpassung.* Die aus der Brennstoffzelle freigesetzte elektrische Energie von 200 kW dient der Traktion der Lokomotive. Dafür wird das Spannungsniveau im LOHC-PowerPack an den Hochvolt-Zwischenkreis der Lokomotive angepasst und an diese übertragen. Ein kleiner Teil der Energie wird für die Versorgung der Steuerungstechnik an Bord des LOHC-PowerPacks entnommen und über Wechselrichter auf 230 V bzw. 400 V gewandelt.

Für den robusten Betrieb soll mit Kooperationspartnern neben der mechanischen Konstruktion und verfahrenstechnischen Auslegung auch eine ausgefeilte Steuer- und Regelungstechnik entwickelt werden. Der gesamte Antriebsstrang von LOHC-Tanks über LOHC-H_2-Freisetzer und H_2-Aufreinigung bis hin zu Brennstoffzelle und Spannungswandlern muss unter den besonderen technischen und betrieblichen Randbedingungen des Bahnbetriebs ausgelegt werden. Hierbei sind auch umfassende technische und (zulassungs-)rechtliche Anforderungen für die Integration flüssiger organischer Wasserstoffträger in Schienenfahrzeuge zu berücksichtigen.

Ausblick

Zukünftige Forschungsaktivitäten richten sich auch auf die Betrachtung der im Rahmen dieser Technologie erreichbaren Wirkungsgradkette. Die aktuell verfügbaren Werte beziehen sich nur auf einzelne Schritte im Labormaßstab und müssen im Zuge des Realbetriebs um Messungen zur Wärmekopplung und den Verbrauch der Anlagenperipherie ergänzt werden. Weiterhin wird an einer weiteren Optimierung der verfahrenstechnischen Abläufe geforscht und eine Verkleinerung bzw. Zusammenführung der einzelnen Geräte und Schritte beabsichtigt, so dass es im Zuge einer künftigen Industrialisierung möglich erscheint, die Komponenten des LOHC-PowerPacks in eine Lokomotive integrieren zu können.

Literatur

[1] Daten und Fakten 2021 – Deutsche Bahn, https://www.deutschebahn.com/resource/blob/7537106/7d38dfcb4de528171002c09ae29ba705/DuF2021-data.pdf, 11.09.2022 11:32

[2] Allianz pro Schiene, https://www.allianz-pro-schiene.de/themen/umwelt/elektromobilitaet/, 11.09.2022 11:53

[3] Müller, K., Stark, K., Emel'yanenko, VN., Varfolomeev, MA., Zaitsau, DH., Shoifet, E., et al.. Liquid Organic Hydrogen Carriers: Thermophysical and Thermochemical Studies of Benzyl- and Dibenzyl-toluene Derivatives. Ind Eng Chem Res 2015;54:7967–76. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b01840

[4] G. Do, P. Preuster, R. Aslam, A. Bösmann, K. Müller, W. Arlt and P. Wasserscheid. React. Chem. Eng.,2016,1, 313. https://doi.org/10.1039/C5RE00080G

[5] Jorschick, H., Preuster, P., Dürr, S., Seidel, A., Müller, K., Bösmann, A., et al.. Hydrogen storage using a hot pressure swing reactor. Energy Environ Sci 2017;10:1652–9. https://doi.org/10.1039/C7EE00476A.

[6] Zhang, X., He, N., Lin, L., Zhu, Q., Wang, G., Guo, H. Study of the carbon cycle of a hydrogen supply system over a supported Pt catalyst: methylcyclohexane–toluene–hydrogen cycle. Catalysis Science & Technology 2020;10:1171–81.

[7] Brückner, N., Obesser, K., Bösmann, A., Teichmann, D., Arlt, W., Dungs, J. and Wasserscheid, P. (2014), Evaluation of Industrially Applied Heat-Transfer Fluids as Liquid Organic Hydrogen Carrier Systems. ChemSusChem, 7: 229-235. https://doi.org/10.1002/cssc.201300426

[8] Runge, P., Sölch, C., Albert, J., Wasserscheid, P., Zöttl, G., Grimm, V. Economic comparison of electric fuels produced at excellent locations for renewable energies: A scenario for 2035. Available at SSRN 3623514 2020.

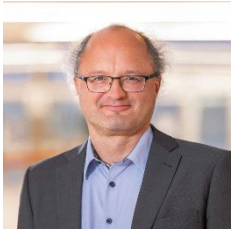
[9] https://h2-mobility.de/wp-content/uploads/2023/02/H2M_IAC-AnnualReport2022_2023-02-01.pdf

[10] Linde Wasserstoff 3.0 Produktdatenblatt (Stand 11.08.2016)

Session 5
Julian Kadar, Peter Wasserscheid, Lars Schnieder

Autoren

Dr.-Ing. Kadar, Julian
Teamleiter „Leistungsdichte Apparate für die stoffliche Wasserstoffspeicherung“
Helmholtz-Institut Erlangen-Nürnberg für Erneuerbare Energien (HI ERN)
Cauerstr. 1, 91058 Erlangen, Deutschland
Telefon: +49 151 46385620
E-Mail: j.kadar@fz-juelich.de
Webseite: www.hi-ern.de



Prof. Dr. Wasserscheid, Peter
Gründungsdirektor
Helmholtz-Institut Erlangen-Nürnberg für Erneuerbare Energien (HI ERN)
Cauerstr. 1, 91058 Erlangen, Deutschland
Telefon: +49 2461/61-4499
E-Mail: p.wasserscheid@fz-juelich.de
Webseite: www.hi-ern.de

Prof. Dr.-Ing. habil. Schnieder, Lars
Geschäftsführer (Chief Executive Officer, CEO)
ESE Engineering und Software-Entwicklung GmbH
Am Alten Bahnhof 16, 38122 Braunschweig, Deutschland
Telefon: +49 170 7712863
E-Mail: lars.schnieder@ese.de
Webseite: www.ese.de

Session 5
Jan Pape, Sarah Pospischil, Florian Bonn, Sven Körner, Arnd Stephan

Neuartige Bahnenergieversorgung für die schnelle Elektrifizierung der Eifelstrecken

Pape, Jan[1]; Pospischil, Sarah[2]; Bonn, Florian[3];
Körner, Sven[4]; Stephan, Arnd[1]

[1]TU Dresden, Professur für Elektrische Bahnen
[2]DB Energie GmbH
[3]DB Netz AG
[4]IFB Institut für Bahntechnik GmbH

Zusammenfassung

Nach der Zerstörung der Eisenbahninfrastruktur in der Region Eifel durch das verheerende Hochwasser im Jahr 2021 haben die Deutsche Bahn und die TU Dresden ein neues Bahnenergieversorgungssystem für die schnelle Elektrifizierung der Eifelstrecken bis Ende 2026 entwickelt. Dieses sieht eine Mitführung eines 2x25 kV-Bahnenergieübertragungsnetzes als Bestandteil der Oberleitungsanlage und mit abschnittsweiser Verkabelung vor. Die sich stellenden systemtechnischen Fragen wurden in einer Systemstudie untersucht.

Keywords: Elektrifizierung, Bahnelektrifizierung, Bahnenergieversorgung, Bahnstromversorgung, Oberleitung, Fahrleitung, Planungsbeschleunigung

Session 5
Jan Pape, Sarah Pospischil, Florian Bonn, Sven Körner, Arnd Stephan

1 Anforderungen an die beschleunigte Elektrifizierung

Warum eine beschleunigte Elektrifizierung der Eifelstrecken?

Die schweren Unwetter, die im Juli 2021 über Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen hinweggezogen waren, haben auch die Infrastruktur der Deutschen Bahn empfindlich getroffen; unter anderem wurden die Bahnstrecken in der Region Eifel so stark beschädigt, dass diese abschnittsweise komplett wiederaufgebaut werden müssen.

Um sicherzustellen, dass die vom Hochwasser zerstörten Bahnstrecken (kurz: Eifelstrecken) nach dem Wiederaufbau gleichzeitig den Anforderungen an einen modernen, klimafreundlichen Schienenpersonennahverkehr genügen, ist im Rahmen des Wiederaufbaus auch die Elektrifizierung eben dieser Strecken beschlossen worden. Darauf haben sich DB Netz AG, DB Station&Service AG und DB Energie GmbH gemeinsam mit dem Land Nordrhein-Westfalen bzw. Rheinland-Pfalz und dem Zweckverband Nahverkehr Rheinland bzw. SchienenPersonenNahVerkehr Rheinland-Pfalz Nord geeinigt. Die Elektrifizierung soll dabei mittels Oberleitung erfolgen. Gemäß den Finanzierungsvereinbarungen der genannten Parteien ist die Inbetriebnahme der Eifelstrecken für den elektrischen Zugbetrieb für den Fahrplanwechsel 2026/2027 vorgesehen. Die gesamte Projektlaufzeit zur Elektrifizierung der Eifelstrecken liegt damit zwischen Eintritt der Hochwasserkatastrophe und Inbetriebnahme der elektrifizierten Strecken bei etwas mehr als fünf Jahren.

Wie gelingt die beschleunigte Elektrifizierung der Eifelstrecken?

Mit dem Aufbauhilfegesetz 2021 [1] hat der Gesetzgeber die Planrechtsfreiheit für die Ausstattung einer bestehenden Bahnstrecke mit Oberleitungen im Zuge des Wiederaufbaus nach Naturkatastrophen ermöglicht (Änderungen im AEG [2] und UVPG [3]) und damit einen ersten Beschleunigungsansatz für die Elektrifizierung von Bestandsstrecken geliefert.

Im Fall der Elektrifizierung der Eifelstrecken greift dieser Ansatz jedoch nicht weit genug, denn Elektrifizierung bedeutet hier mehr als die Ausstattung der Strecken mit Oberleitung. Die zu elektrifizierenden Eifelstrecken (siehe Abbildung 2.1) bilden gemeinsam ein Netz von ca. 210 km Streckenlänge, bestehend aus Eifelbahn (Hürth-Kalscheuren – Trier-Ehrang), Voreifelbahn (Bonn – Euskirchen) und Erfttalbahn (Euskirchen – Bad Münstereifel), sodass zusätzlich zwingend auch zusätzliche Einspeisungen in die Oberleitung erforderlich werden. Die Realisierung dieser Einspeisungen fällt jedoch nicht unter die Erleichterungen des AufbhG 2021. Somit ist

die Projektlaufzeit einer Elektrifizierung mindestens mit der Realisierungsdauer dieser Einspeisungen gleichzusetzen.

Im Fall der in Deutschland überwiegenden zentralen Bahnenergieversorgung mit 110 kV-Bahnstromleitungen und Unterwerken liegt deren typische Realisierungsdauer bei mindestens zwölf Jahren; bei der dezentralen Bahnenergieversorgung mit Umrichterwerken liegt sie inklusive der Anbindung an das dreiphasige Landesnetz bei mindestens acht Jahren (Erfahrungswerte aus Vorgängerprojekten).

Um trotz zusätzlich notwendiger Einspeisungen die Elektrifizierung der Eifelstrecken bis Ende 2026 zu ermöglichen, haben DB Netz und DB Energie in Kooperation mit der Professur für Elektrische Bahnen an der Technischen Universität Dresden (TUD) und der IFB Institut für Bahntechnik GmbH (IFB) in einer Systemstudie ein neuartiges Bahnenergieversorgungssystem entworfen, welches auf den Eifelstrecken als Pilotprojekt angewandt wird. Dabei wurden die sich stellenden systemtechnischen Fragen untersucht.

Für die Bahnenergieversorgung auf der Eifelstrecke ergaben sich die **drei folgenden zwingenden Anforderungen**:

1. Die Bahnenergieübertragung zu den Unterwerken muss als Bestandteil der Oberleitungsanlage mitgeführt werden.
2. Für die Bahnenergieübertragung muss eine Spannungsebene genutzt werden, die in Europa als Fahrleitungsspannung in der EU-Verordnung TSI ENE [4] gesetzlich geregelt ist (Verweis auf EN 50163 [5]) und möglichst auch in Deutschland schon genutzt wird, damit eine planungsrechtliche Einordnung als Oberleitungsanlage möglich ist.
3. Der Einsatz von Kabeln im Bahnenergieübertragungssystem muss möglich gemacht werden, um auch in engen Ortslagen, in Tunneln und bei Brücken eine Mitführung der Verbindungsleitungen gewährleisten zu können.

2 Übersicht der Bahnenergieversorgung mit 2AC 2x25 kV 16,7 Hz + 1AC 15 kV 16,7 Hz für die Eifelstrecken

2.1 Spannung und Sternpunkterdung der Bahnenergieübertragung

Die in Abschnitt 1 genannten, zwingenden Anforderungen können nur erfüllt werden, wenn für die Bahnenergieübertragung eine **Leiter-Erde-Spannung von 25 kV** gewählt wird. Diese ist in Abschnitt 4.1 der EN 50163 [5] ohne eine zugehörige Netzfrequenz als

Nennspannung festgelegt. Bei dem eingesetzten symmetrischen Zweiphasensystem ergibt sich eine Leiter-Leiter-Spannung von 50 kV, wofür in Anlehnung an Autotransformatorensysteme seitens DB die Bezeichnung 2AC 2x25 kV 16,7 Hz festgelegt wurde Für das o. g. Spannungssystem existiert bereits ein umfangreiches technisches Regelwerk und es sind zugelassene Fahrleitungskomponenten am Markt verfügbar, was eine Voraussetzung für die schnelle Realisierung bis Ende 2026 darstellt.

Damit die verfügbaren Komponenten verwendet werden können, ist es jedoch zwingend erforderlich, dass bei Fehlern im Allgemeinen bzw. bei einpoligen Erdschlüssen im Speziellen keine unzulässig erhöhten Leiter-Erde-Spannungen auftreten. Aus diesem Grund muss der Netz-Mittelpunkt zwingend niederohmig geerdet sein, was nachfolgend wie bei 3AC-Netzen als **niederohmige Sternpunkterdung** (NOSPE) bezeichnet wird. Ein weiterer Grund für den Einsatz von NOSPE ist der erhebliche Kabelanteil im 2x25 kV-Netz.

Grundsätzlich stellt sich die Frage, was in der Region Eifel gegen die Mitführung von 110 kV-Stromkreisen in der Oberleitungsanlage spricht, wie dies an mehreren Stellen im DB-Bestandsnetz umgesetzt ist und auch bei gegenwärtigen Elektrifizierungsprojekten [6] geplant ist: Neben einerseits der regulatorischen Einstufung von 110 kV-Leitungen nicht als Oberleitungsanlage, sondern als Bahnstromfernleitungen, sowie andererseits der gegenüber der Mitführung von 2x25 kV-Leitungen nochmal erheblich aufwändigeren Oberleitungsanlage, gibt es auch systemtechnische Ausschlusskriterien. So würde der erforderliche erhebliche Kabelanteil (siehe Anforderung 3 und Abschnitt 2.2) den kapazitiven Erdschlussfehlerstrom im 110 kV-Bahnstromleitungsnetz der DB und ÖBB erheblich ansteigen lassen und damit die Löschfähigkeit des Netzes mit Resonanzsternpunkterdung (RESPE) in Frage stellen. Bisher beträgt die Länge aller Kabeltrassen im gemeinsamen 110 kV-Netz der DB und ÖBB ganze 18 km bei einer gesamten Trassenlänge von ca. 10.000 km. Daher wäre – vorbehaltlich einer detaillierteren technischen Untersuchung – auch bei der Mitführung von 110 kV-Stromkreisen entlang der Eifelstrecke eine galvanische Netztrennung durch Transformatoren erforderlich gewesen. Weiter hätten die Kabel der Eifelstrecke bei einer höheren Spannungsebene einen erheblich höheren Einfluss auf das Resonanzverhalten des Netzes. In vergleichbaren Netzkonfigurationen mit längeren Hochspannungskabeln sind in der Vergangenheit Stabilitätsprobleme aufgetreten. [7] Durch jüngst vorgestellte und in ersten Pilotanwendungen befindliche Beschaltungen des Kabelschirms [8, 9] lässt sich die kapazitive Wirkung des Kabels im Oberschwingungsbereich und damit der Einfluss auf die Netzresonanzen zwar reduzieren – der kapazitive Erdschlussfehlerstrom bei Grundschwingung jedoch nicht.

2.2 Aufbau des Systems

Abbildung 2.1 zeigt die Lage der Eifelstrecken im Bestandsnetz der DB. Die Elektrifizierung der Eifelstrecken umfasst:

- ca. 210 km Streckenlänge mit Oberleitung;
- ca. 155 km Streckenlänge mit zusätzlichen 2x25 kV-Leitungen (Eifelstrecke);
- ca. 80 km Kabel-Trassenlänge im 2x25 kV-Netz (inklusive Anbindung der Netzkupplung Karthaus), demnach ca. 320 km Länge der einzelnen Kabel.

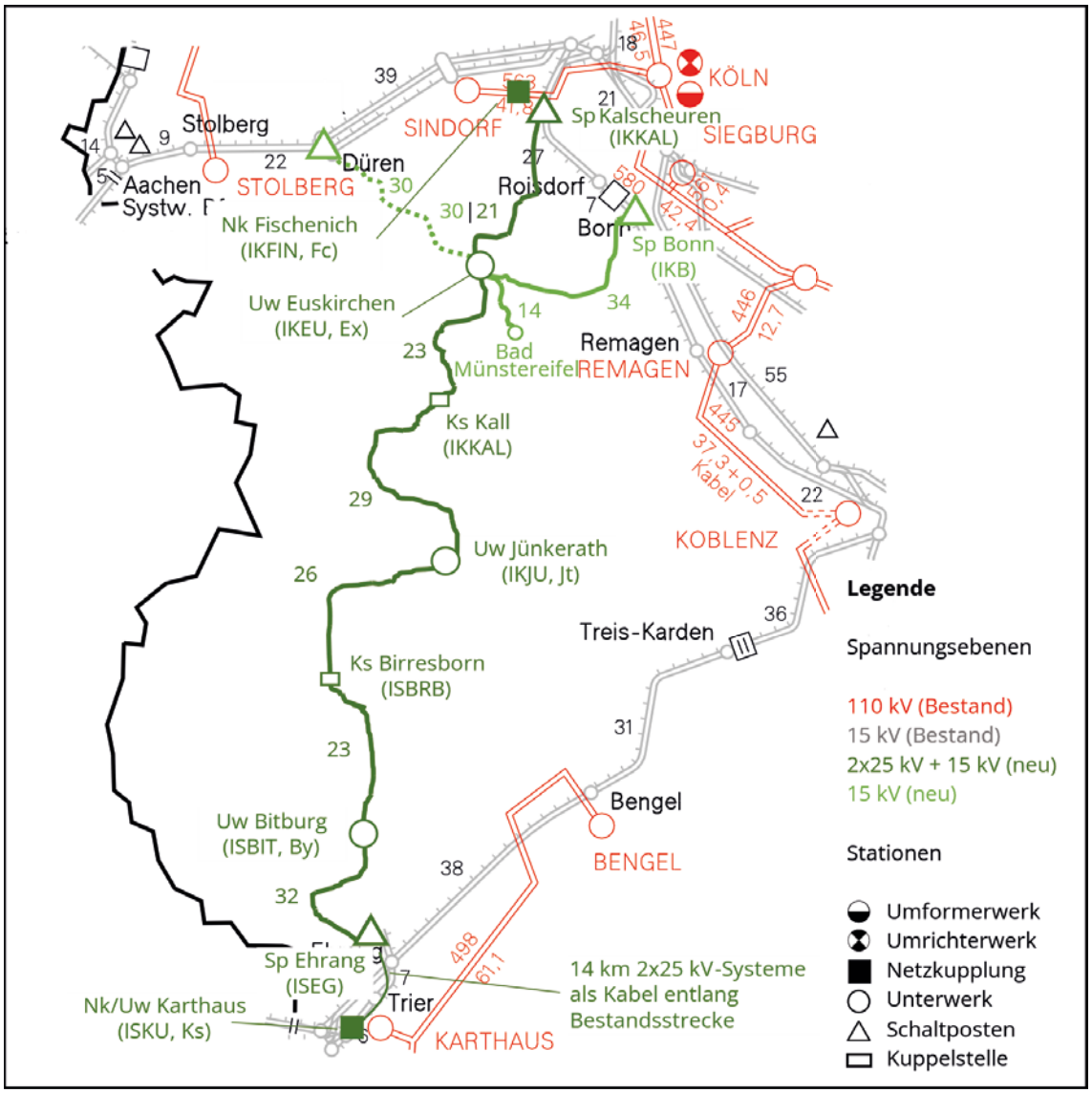


Abbildung 2.1: Lage und Übersicht der Eifelstrecken im Bestandsnetz der DB (Hintergrundkarte: DB Energie, bearbeitet durch TUD)

Abbildung 2.2 zeigt das nachfolgend erörterte Single-Line-Diagramm der Eifelstrecken.

Session 5

Jan Pape, Sarah Pospischil, Florian Bonn, Sven Körner, Arnd Stephan

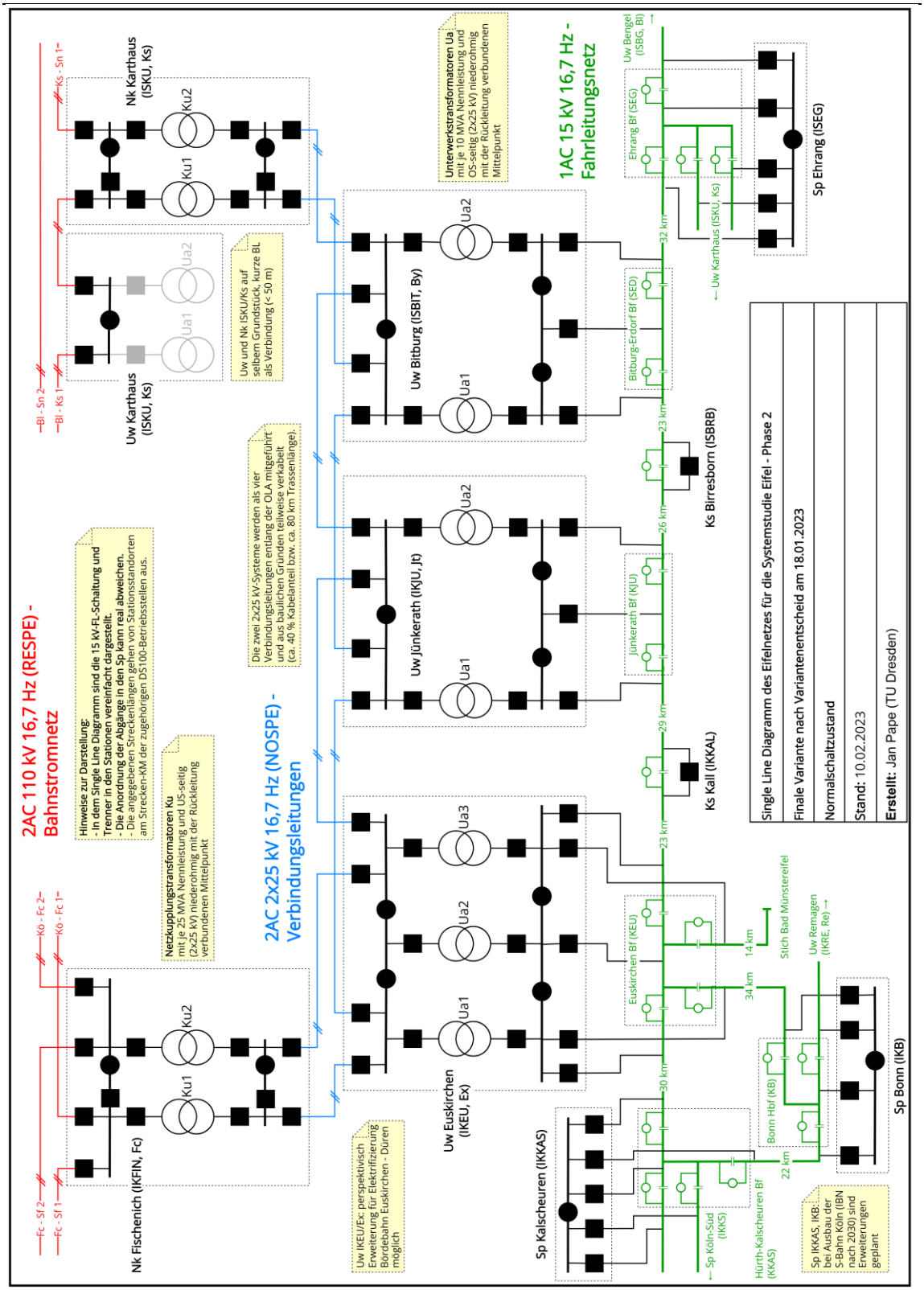


Abbildung 2.2: Single-Line-Diagramm der Eifelstrecken (Bildquelle: TUD)

110 kV-2x25 kV-Netzkupplungen

Bei Fischenich (Raum Köln) und Karthaus (Raum Trier) werden zwei sogenannte Netzkupplungen errichtet, welche das 2x25 kV-Netz aus dem bestehenden 110 kV-Netz der DB speisen. Die nächstgelegenen Erzeugeranlagen sind nördlich das Umrichter- und Umformerwerk Köln und südlich das Umformerwerk Saarbrücken. Die bestehenden Erzeugeranlagen und 110 kV-Leitungen besitzen hinreichende Leistungsreserven für die Speisung der Eifelstrecken.

Die Netzkupplungstransformatoren sind mit einer Bemessungsscheinleistung von 25 MVA ausgeführt, wobei in den beiden Netzkupplungen Fischenich und Karthaus je zwei Transformatoren eingesetzt werden. Die Schaltgruppe ist Iin0 und es ist ein Stufenschalter mit 21 Stufen vorgesehen. Jeder (unterspannungsseitige) Transformator-Mittelpunkt ist starr und unverlierbar mit der Rückleitung verbunden, sodass über die Erdung der Netzkupplung und der Bahnstrecke die niederohmige Sternpunkterdung erfolgt.

Zu erwähnen ist, dass sowohl die ober- als auch die unterspannungsseitigen Sammelschienen der Netzkupplungen mit Längskupplungen ausgerüstet werden. Diese ermöglichen bei Sammelschienenfehlern das selektive Abschalten des betroffenen Sammelschienenabschnitts und damit den unterbrechungsfreien Betrieb der Netzkupplung.

Sowohl auf der 110 kV- als auch auf der 2x25 kV-Seite werden Freiluftschaltanlagen mit den am Markt verfügbaren 110 kV-Hybridschaltmodulen verwendet. Zwar wurden im Rahmen der Systemstudie auch Spezifikationen für 25 kV 16,7 Hz-Leistungsschalter und -Trennschalter festgelegt, wegen des kurzen Realisierungszeitraums und der geringen Stückzahlen wurde eine Ausschreibung für Innenraumschalter seitens DB jedoch nicht weiterverfolgt. Der zusätzliche Flächenbedarf für die 2x25 kV-Freiluftschaltanlagen wurde frühzeitig in der Planung vorgehalten.

2AC 2x25 kV 16,7 Hz-Bahnenergieübertragungsnetz

Das 2x25 kV-Netz ist durchgehend redundant mit zwei parallelen Stromkreisen ausgeführt, wie dies auch im 110 kV-Netz der DB bis auf wenige Ausnahme der Fall ist. Die 2x25 kV-Leitungen werden gemäß DB-Richtlinie 997 als Bahnenergieleitungen, spezifischer als sogenannte Verbindungsleitungen bezeichnet. Als Leiter werden Seile vom Typ 243-AL1 (Al 240) bzw. Einleiterkabel mit 300 mm^2 Leiterquerschnitt aus Kupfer und der Spannungsebene 38 / 66 kV eingesetzt, deren Schirme grundsätzlich

einseitig geerdet werden. Die Außenleiter („Phasen“) werden in Anlehnung an das 110 kV-Netz der DB mit r und t bezeichnet.

2x25 kV-15 kV-Unterwerke

Die 2x25 kV-Leitungen werden in alle Unterwerke volleingeführt, was Vorteile für den Schutz und die Verfügbarkeit des Netzes bietet.

Die Unterwerkstransformatoren sind mit einer Bemessungsscheinleistung von 10 MVA ausgeführt, wobei im Unterwerk Euskirchen drei und in den Unterwerken Jünkerath sowie Bitburg je zwei Transformatoren eingesetzt werden. Der ungewöhnliche Transformatoreinsatz von 3x10 MVA statt 2x15 MVA im Unterwerk Euskirchen rührt daher, dass wegen der geringen Stückzahl ein zusätzlicher Transformatortyp vermieden werden sollte. Die Schaltgruppe ist INi0 und es ist ein Stufenschalter mit 13 Stufen vorgesehen. Jeder (oberspannungsseitige) Transformator-Mittelpunkt ist starr und unverlierbar mit der Rückleitung verbunden, sodass sich über die Erdung des Unterwerks und der Bahnstrecke eine niederohmige Sternpunkterdung ergibt.

Wie in den Netzkupplungen werden auf der 2x25 kV-Seite Freiluftschaltanlagen verwendet; die 15 kV-Seite wird standardmäßig als Innenraumschaltanlage ausgeführt.

1AC 15 kV 16,7 Hz-Fahrleitungsnetz

Die Oberleitungsanlage entspricht der Regelbauart Re 200 der DB. In den eingleisigen Streckenabschnitten der Eifelbahn werden Umgehungsleitungen eingesetzt. Die Oberstrombegrenzung liegt bei 600 A.

15 kV-Schaltposten und -Kuppelstellen

Die Einbindung der Oberleitung der Eifelstrecken in das bestehende 15 kV-Oberleitungsnetz der DB erfolgt über neu zu errichtende oder zu erweiternde Schaltposten in Hürth-Kalscheuren, Bonn und Trier-Ehrang. Zur Gewährleistung des 15 kV-Fahrleitungsschutzes mit dem bestehenden, betrieblich bewährten Schutzkonzept der DB werden in Kall und Birresborn zusätzliche Kuppelstellen eingerichtet.

Rückleitung und Erdung

Rückleitung und Erdung werden gemäß des DB-Regelwerks ausgeführt. Es wird grundsätzlich ein Rückleiterseil pro Streckengleis eingesetzt.

3 Systemstudie

3.1 Ablauf und Phasen

Nach einer initialen „Systemskizze“ der TUD [10] hat die DB gemeinsam mit TUD und IFB sowie den Firmen emkamatik[1], Railectric[2] und SIGNON[3] (jeweilige Unterstützung bei einzelnen Fragestellungen) in zwei Projektphasen eine Systemstudie der neuartigen Bahnenergieversorgung erarbeitet.

Phase 1 umfasste im Zeitraum von Mai 2022 bis August 2022 das grundlegende technische Systemdesign sowie die Identifikation und Beurteilung möglicher technischer Ausschlusskriterien für die technische Machbarkeit. Als technische Ausschlusskriterien wurden identifiziert (siehe Abschnitt 3.2):

- Netzresonanzen, insbesondere niedrigste Resonanzfrequenz;
- Fehlererkennung und schutztechnische Beherrschbarkeit;
- Transitleistungen.

Mit dem erbrachten Nachweis der technischen Machbarkeit wurde seitens DB im August 2022 die **Systementscheidung** zugunsten der 2x25 kV + 15 kV-Bahnenergieversorgung getroffen.

Im Anschluss an die Systementscheidung führten TUD und IFB im Zeitraum von Oktober 2022 bis Februar 2023 die **Phase 2** der Systemstudie durch, in welcher das technische Systemdesign finalisiert wurde und die neu zu beschaffenden Komponenten für das 2x25 kV-System (Sonderfrequenz 16,7 Hz!) funktional spezifiziert wurden.

3.2 Inhalte, Methodik und Ergebnisse

Nachfolgend werden die wesentlichen Kriterien für das Systemdesign vorgestellt:

Spannungshaltung

Die Spannung am Stromabnehmer muss sowohl im Normal- als auch im Ausfallbetrieb den Anforderungen nach EN 50163 [5] und EN 50388-1 [11] genügen. Im 2x25 kV-Netz wird ein übliches Spannungstoleranzband von ±10 % angesetzt, wobei die obere Spannungsgrenze von 27,5 kV Leiter-Erde der höchsten Dauerspannung U_{max1} nach

[1] emkamatik GmbH, Schweiz
[2] Railectric GmbH, Schweiz
[3] SIGNON Deutschland GmbH

EN 50163 [5] entspricht. Die o. g. Anforderungen wurden mithilfe einer kombinierten, quasistationären Bahnbetriebs- und Lastflusssimulation [12] untersucht und nachgewiesen.

Für die Bahnbetriebssimulation wurde ein worst case-Auslegungsfahrplan auf Basis der verkehrlichen Aufgabenstellung, des Deutschlandtakts [13] sowie der Planungen der Aufgabenträger erstellt. Dabei wurden auch zum zweigleisigen Ausbau vorgesehene Streckenabschnitte berücksichtigt. Da nicht alle zukünftig eingesetzten Fahrzeuge explizit vorgegeben waren, wurden für die Zugtypen je typische Fahrzeuge angesetzt.

In der Lastflusssimulation wurden neben dem Normalschaltzustand sämtliche (n-1)- und (n-2)-Ausfallzustände der Transformatoren und 2x25 kV-Leitungen der Eifelstrecken untersucht.

Dimensionierung der Betriebsmittel

Alle Betriebsmittel sind für die thermische Belastung im Betriebsfall sowie die mechanische und thermische Belastung im Fehlerfall ausreichend zu dimensionieren. In der Systemstudie wurde dies für die Netzkupplungs- und Unterwerkstransformatoren, die 2x25 kV-Verbindungsleitungen und -Kabel, die Oberleitungsanlage, die Leistungs- und Trennschalter sowie die Wandler durchgeführt bzw. nachgewiesen.

Für die Bewertung der Belastung im Betriebsfall wurden die Ergebnisse der kombinierten Bahnbetriebs- und Lastflusssimulation (siehe oben) ausgewertet; für die Bewertung der Belastung im Betriebsfall wurden die maximalen Fehlerströme mit dem Verfahren nach VDE 0102 [14] (übertragen auf 2AC- bzw. 1AC-Netze) berechnet. Für die Berechnung der maximalen Fehlerströme wurde ein zukünftig geplanter Netzzustand mit Ausbau von 110 kV-Leitungen und Erzeugeranlagen unterstellt.

Berührungsspannungen

Die Gleis-Erde-Spannungen müssen sowohl dauerhaft im Betrieb als auch kurzzeitig im Fehlerfall den Grenzwerten nach EN 50122-1 [15] für Berührungsspannungen genügen. Dies ist gewährleistet, da Rückleitung und Erdung gemäß DB-Richtlinien mindestens für einen Strom von 25 kA ausgeführt werden, welcher aktuell und zukünftig stets weit unterschritten wird, und mit dem erstellten Schutzkonzept die schnelle Klärung sämtlicher Fehler gewährleistet ist.

Fehlererkennung und Schutzkonzept

Alle möglichen Netzfehler müssen schnell, sicher und selektiv geklärt werden. Für die Fehlererkennbarkeit sind die minimalen Fehlerströme maßgeblich, welche ebenfalls mit

dem Verfahren nach VDE 0102 [14] (übertragen auf 2AC- bzw. 1AC-Netze) berechnet wurden. Dabei wurde das Bestandsnetz mit einem worst case-Schaltzustand unterstellt, in welchem mehrere benachbarte Synchrongeneratoren außer Betrieb sind und sich demzufolge geringere Kurzschlussleistungen und -ströme einstellen.

Im Gegensatz zur konventionellen Oberleitung, bei der nur die Kurzschlüsse Fahrleitung – Rückleitung auftreten können, sind bei der kombinierten Bahnenergieversorgung 2x25 kV + 15 kV sieben Arten von Fehlern möglich und zu berücksichtigen. Die Fehlerarten sind in Abbildung 3.1 dargestellt.

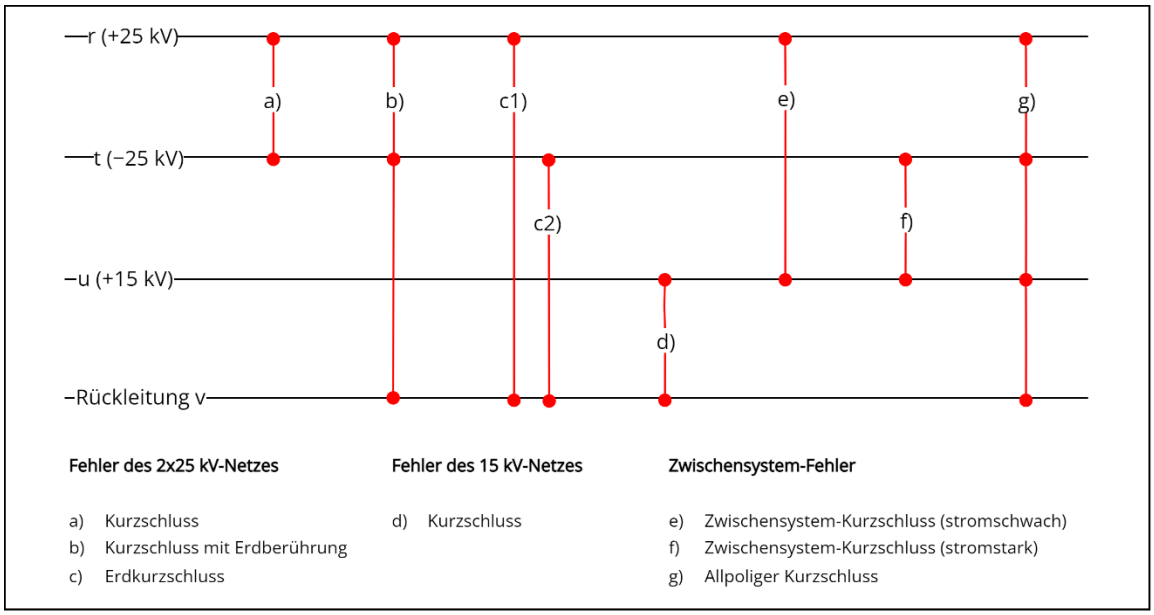


Abbildung 3.1: Arten von Netzfehlern bei der kombinierten Bahnenergieversorgung 2x25 kV + 15 kV (Bildquelle: TUD)

Auf Basis der berechneten Charakteristika der Netzfehler wurde ein Schutzkonzept im Sinne von EN 50633 [16] erstellt, wobei vollständig auf bereits bei der DB oder bei anderen 16,7 Hz-Netzbetreibern eingesetzte Schutzfunktionen zurückgegriffen wird.

Für den 15 kV-Fahrleitungsschutz wurden verschiedene Varianten gebildet und die Lastunterscheidung anhand der Ergebnisse der kombinierten Bahnbetriebs- und Lastflusssimulation sowie der berechneten minimalen Fehlerströme („Leitungsgeraden“) untersucht. Als Ergebnis der Untersuchung wurde entschieden, das 15 kV-Schutzkonzept der DB mit Kreiskennlinien des Distanzschutzes ohne Änderungen anzuwenden und hierfür in Kall und Birresborn Kuppelstellen einzurichten.

Zu dem entwickelten Schutzkonzept ist eine weitere Veröffentlichung geplant.

Transitleistungen im 2x25 kV-Netz

Im 2x25 kV-Netz dürfen auch bei ungünstigen Schaltzuständen des 110 kV-Netzes (Ausfall von Erzeugeranlagen und Leitungen) keine unzulässig hohen Transitleistungen auftreten. Dies wurde durch die Identifikation von möglichen worst case-Netzzuständen und anschließende quasistationäre Lastflussberechnungen nachgewiesen.

Netzresonanzen, insbesondere niedrigste Resonanzfrequenz

Netzresonanzen können zu Instabilität und Überspannungen durch Harmonische führen, weswegen inzwischen Grenzwerte und Berechnungsverfahren in den Interoperabilitäts-normen EN 50388-1 [11] und prEN 50388-2 [17] festgelegt sind.

Für die Resonanzstabilität ist insbesondere die niedrigste Resonanzfrequenz des Netzes von Interesse. Diese muss sicher oberhalb einer sog. Grenzfrequenz liegen, oberhalb der sich die Fahrzeuge im Netz passiv verhalten müssen, d. h. kein Quellenverhalten besitzen dürfen. Falls dieses Kriterium verletzt wird, kann dies dazu führen, dass die Fahrzeuge Leistung in der Grundschwingung beziehen und in Oberschwingungen Resonanzen anregen. Durch Rückkopplung kann es zur Instabilität kommen. Im Netz der DB ist die Grenzfrequenz in [18] auf 120 Hz festgelegt.

Der Wirkmechanismus kann vereinfacht durch einen Parallelschwingkreis beschrieben werden (siehe Abbildung 3.2), sodass folgende Einflüsse auf die niedrigste Resonanzfrequenz gelten:

- zusätzliche Induktivitäten im Querzweig wie Transformatoren und Generatoren erhöhen die niedrigste Resonanzfrequenz;
- zusätzliche Kapazitäten im Querzweig wie insbesondere (Hochspannungs-)Kabel senken die niedrigste Resonanzfrequenz.

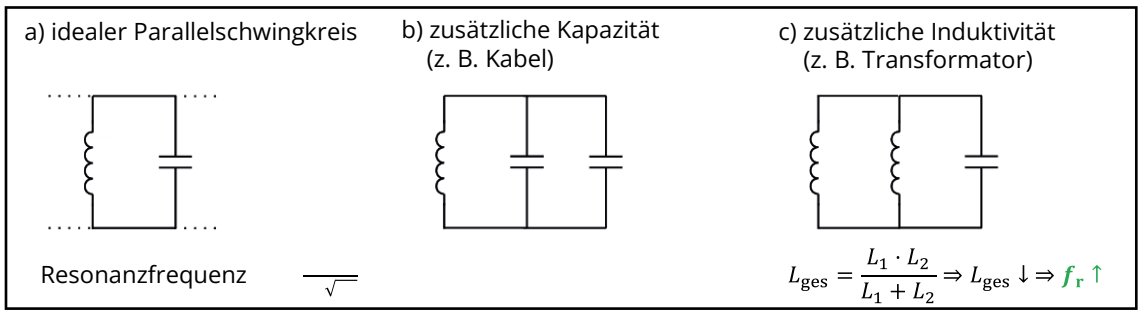


Abbildung 3.2: Einflüsse auf die Parallelresonanz (Bildquelle: TUD)

Wegen des hohen Kabelanteils im 2x25 kV-Netz wurde eine Untersuchung des Resonanzverhaltens durchgeführt. Die gesamte Eifelstrecke wurde dazu durch ein

galvanisch, induktiv und kapazitiv gekoppeltes Mehrleitermodell abgebildet. Das Bestandsnetz wurde auf der 110 kV-Ebene (Netzkupplungen Fischenich und Karthaus) und der 15 kV-Ebene (Schaltposten Kalscheuren und Ehrang sowie Unterwerk Euskirchen mit OLAB Richtung Bonn) abgegrenzt und jeweils durch Netzäquivalente modelliert.

Für die Untersuchung der technischen Machbarkeit in Phase 1 wurde ein worst case-Kabeltyp mit einem deutlich höheren Kapazitätsbelag angesetzt als jener des als Ergebnis der Dimensionierung in Phase 2 resultierenden Kabeltyps.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die niedrigste Resonanzfrequenz die Grenzfrequenz von 120 Hz zuzüglich eines definierten Sicherheitszuschlags von 20 Hz stets sicher überschreitet. Dabei wurden neben dem Normalschaltzustand auch Ausfallschaltzustände mit Ausfall von Unterwerks- und Netzkupplungstransformatoren betrachtet.

Zum Resonanzverhalten der kombinierten Bahnenergieversorgung 2x25 kV + 15 kV auf den Eifelstrecken ist eine weitere Veröffentlichung geplant.

Überspannungen Leiter-Erde durch Wellenüberlagerung

Im 2x25 kV-Netz wird es eine Vielzahl an Übergängen zwischen Verbindungsleitungen und Kabeln geben. Die Kabel sind dabei sowohl angrenzend an Schaltanlagen als auch zwischen Abschnitten mit Verbindungsleitungen angeordnet, was in der Literatur [19] auch als Teil- bzw. Zwischenverkabelung bezeichnet wird.

Wegen der unterschiedlichen Wellenwiderstände der Verbindungsleitungen und Kabel kommt es zur Wellenreflektion an den Übergängen. Dadurch kann es zur Überlagerung von z. B. durch Schaltvorgänge oder Blitzeinschläge angeregten Wellen kommen, welche als Überspannungen die Kabel schädigen können. Dies wurde mittels des Verfahrens des Wellengitters nach Bewley (siehe Darstellung in [20]) für verschiedene Konfigurationen rechnerisch untersucht und nachgewiesen.

Zum Schutz der Kabel, deren Austausch i. d. R. aufwändig ist und Betriebserschwernisse verursachen kann, werden als Ergebnis der Untersuchung grundsätzlich Überspannungsableiter an den Übergängen Verbindungsleitung – Kabel angeordnet.

Schirmerdung, Überspannungen Schirm-Erde und Cross-Bonding

Die Schirme der längs der Bahnstrecke verlegten 2x 25 kV-Kabel werden grundsätzlich einseitig geerdet, damit keine zusätzliche thermische Beanspruchung und keine

zusätzlichen Schirmverluste durch Triebrückströme (galvanische Kopplung) und Kreisströme (infolge induktiver Kopplung) auftreten.

Zum nicht-geerdeten Ende des Schirms hin ansteigend baut sich eine induzierte Spannung gegenüber Erde auf, deren Höhe wesentlich von der geometrischen Anordnung (ggf. mit Cross-Bonding), der Länge der Parallelführung und den Strömen im Leitersystem (Netzfehler) abhängt. Es ist sicherzustellen, dass es zu keiner Schädigung des Kabels kommt; hierzu sind abhängig von den oben genannten Einflussparametern Überspannungsableiter Schirm – Erde einzusetzen, was im Rahmen der Planung festzulegen ist.

Mastbilder

Für die Erarbeitung der in Abbildung 3.3 dargestellten Regelmastbilder für die Bahnenergieversorgung 2x25 kV + 15 kV wurden unter Berücksichtigung des einschlägigen allgemeinen und DB-internen Regelwerks folgende, zum Teil entgegenlaufende Kriterien berücksichtigt:

- elektrische Sicherheit;
- Arbeitsschutz;
- Vogelschutz;
- Verfügbarkeit bei Instandhaltungsarbeiten („Was muss freigeschaltet werden?“);
- Minimierung der Masthöhe (Sichtbarkeit, Einstufung als Oberleitungsanlage);
- Minimierung des Flächenbedarfs (Errichtung möglichst auf Bahngrund).

Niederfrequente elektrische und magnetische Felder

Die niederfrequenten elektrischen und magnetischen Felder müssen den gesetzlichen Grenzwerten gemäß 26. BImSchV [21] genügen und sollen, soweit technisch machbar und wirtschaftlich vertretbar, minimiert werden.

In der Systemstudie wurden die nach 26. BImSchV [21] maßgeblichen, „bei maximaler betrieblicher Anlagenauslastung“ entstehenden elektrischen Felder (E-Feld, elektrische Feldstärke) und magnetischen Felder (B-Feld, magnetische Flussdichte) mithilfe eines elektro- bzw. magnetostatischen Berechnungsansatzes (hierzu siehe z. B. [22]) ermittelt.

Abbildung 3.4 zeigt exemplarisch für die zweigleisige Strecke die Ausnutzung des Grenzwertes der magnetischen Flussdichte von 300 µT [21] bei „maximaler betrieblicher Anlagenauslastung“. Die Ströme in der 15 kV-Oberleitung und der Rückleitung (siehe Abbildung 3.3) sind in den beiden gezeigten Varianten mit zwei zusätzlichen 2x25 kV-Stromkreisen und ohne identisch. Ersichtlich ist, dass die zusätzlichen 2x25 kV-

Stromkreise praktisch keine Verstärkung des Magnetfeldes in Bodennähe bewirken. Dadurch dass die Leiter der 2x25 kV-Stromkreise nah beieinander geführt sind und im Betrieb bis auf eine zu vernachlässigende Rest-Unsymmetrie entgegengesetzte Ströme führen, kommt es zu einer hochwirksamen Kompensation des Magnetfeldes.

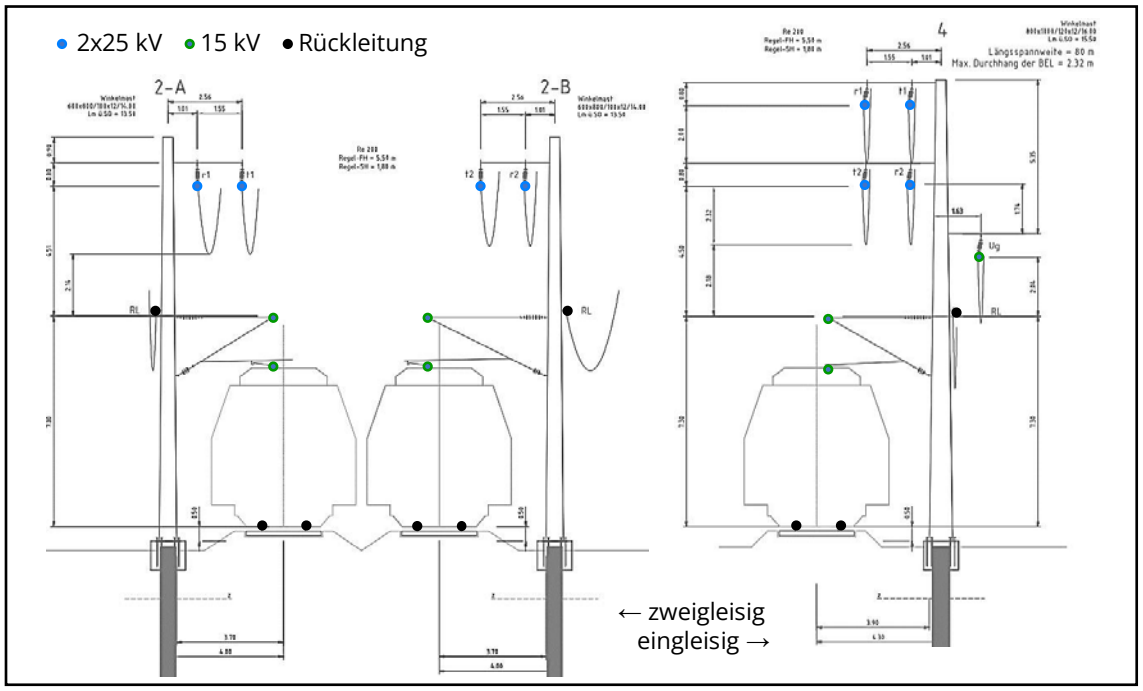


Abbildung 3.3: Regelmastbilder für die Bahnenergieversorgung 2x25 kV + 15 kV (Bildquelle: SIGNON, bearbeitet durch TUD)

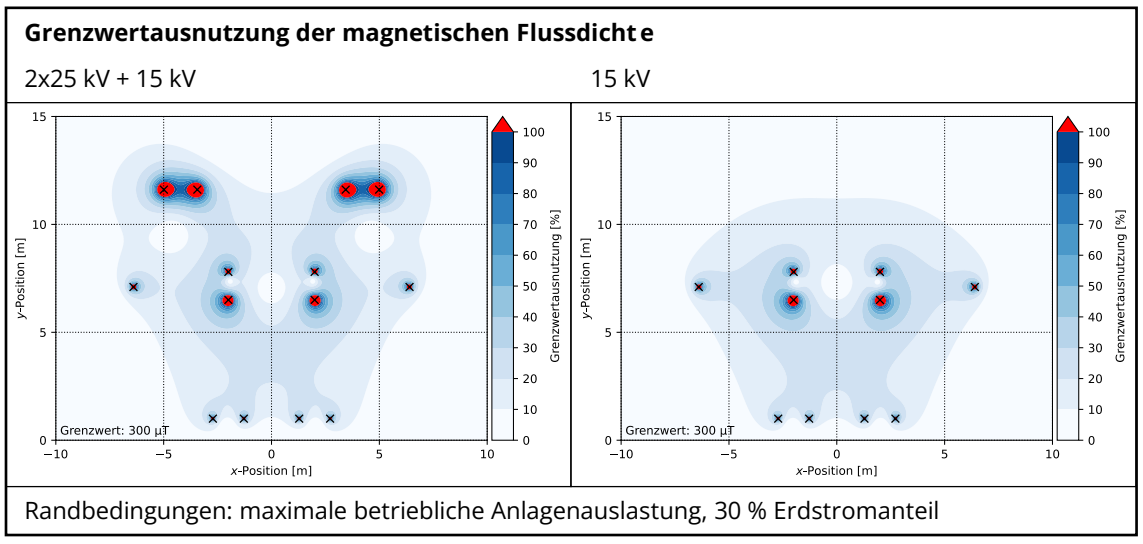


Abbildung 3.4: Magnetfelder der 2x25 kV + 15 kV-Bahnenergieversorgung im Vergleich zur 15 kV-Oberleitungsanlage (Bildquelle: TUD)

4 Herausforderungen der beschleunigten Elektrifizierung

Was braucht es außerdem für die beschleunigte Elektrifizierung der Eifelstrecken?

Mit dem Abschluss der Systemstudie der TUD und des IFB wurde bestätigt, dass ein 2x25 kV-System zur Bahnenergieversorgung als Bestandteil der Oberleitungsanlage und abschnittsweise verkabelt mitgeführt werden kann. Auf Basis des Ergebnisses der Systemstudie konnte durch zusätzliche Abstimmungen seitens der DB und des Eisenbahnbundesamts (EBA) festgehalten werden, dass die 2x25 kV-Bahnenergieübertragung auf der Strecke der Eifelbahn als Teil der Oberleitungsanlage im Zuge des Wiederaufbaus nach der Hochwasserkatastrophe im Juli 2021 gemäß AufbhG 2021 [1] planrechtsfrei realisiert werden kann.

Wenn auch durch die Planrechtsfreiheit der Errichtung der Oberleitungsanlage mit den mit 2AC 2x25 kV 16,7 Hz-Verbindungleitungen ein wesentlicher, wenn nicht sogar der zeitaufwendigste Schritt in der Realisierung einer Elektrifizierung übersprungen werden kann, so ist auch das neue Bahnenergieversorgungskonzept als Beschleunigungsansatz nicht umfassend: Die erforderlichen 16,7 Hz-Schaltanlagen zur Bahnenergieversorgung fallen auch mit dem neuen Konzept nicht unter die Erleichterungen des AufbhG 2021 und unterliegen somit gemäß dem Allgemeinen Eisenbahngesetz (AEG) [2] nach wie vor einem Planrechtverfahren. Hier braucht es Ansätze zur Beschleunigung in der Zusammenarbeit zwischen DB Energie und dem EBA als zuständige Genehmigungsbehörde bzw. schnelle Anhörungs- und Beteiligungsverfahren bei den betroffenen Ämtern, Behörden und Trägern öffentlicher Belange.

Ebenso bleibt das Projektziel einer Inbetriebnahme der elektrifizierten Strecken bis Ende 2026 ambitioniert, betrachtet man unabhängig der Notwendigkeit des Planrechts allein den Projektumfang. Die Planung und Realisierung von Oberleitungsanlagen entlang einer Strecke von insgesamt 210 km inklusive der Nebengewerke (z. B. Telekommunikation) und Anpassungen an der Bestandsinfrastruktur (z. B. Aufweitung von Tunneln und Brücken), sowie von insgesamt zehn 16,7 Hz-Schaltanlagen erfordert eine nicht zu unterschätzende Anzahl unterschiedlichster Ressourcen, zusätzlich zum eigentlichen Wiederaufbau, dem bundesweiten, sektorübergreifenden Investitionsstau und einer Marktsituation, die sich von den vergangenen Krisen noch nicht vollständig erholt hat. Eine Beschleunigung kann diesbezüglich nur durch die Verschlankung von bestehenden Prozessen erreicht werden; sei es durch das Ineinander-Verschieben einzelner Leistungsphasen der Projektplanung, durch Einkaufs- und Vergabe-erleichterungen oder Ansätze des Building Information Modelling (BIM).

Wo steht die DB aktuell im Projekt Elektrifizierung der Eifelstrecken?

DB Energie

Zum Zeitpunkt des Symposiums (November 2023) hat die DB Energie alle notwendigen Anträge auf Planrecht für die 16,7 Hz-Schaltanlagen beim Eisenbahnbundesamts eingereicht. Ausschreibungen zur Lieferung der 2x25 kV-Komponenten wurden am Markt platziert. Zusätzlich erfolgt seitens der DB Energie gemeinsam mit der DB Netz eine Vorbereitung auf das Inbetriebnahmegenehmigungsverfahren nach EIGV [23] für die drei zu elektrifizierenden Strecken.

DB Netz

Bei der DB Netz AG laufen die Planungen zum Zeitpunkt des Symposiums ebenfalls auf Hochtouren. Noch in diesem Jahr sind die ersten Vermessungen und bauvorbereitenden Maßnahmen wie Kampfmittelsondierungen und Baugrunduntersuchungen gestartet. Ab Ende 2023 beginnen sukzessive die Baumaßnahmen. So werden auf der Erfttalbahn bis März 2024 bereits die ersten 200 Oberleitungsmaste gestellt. [24, 25]

5 Fazit und Ausblick

In der Systemstudie wurde eine neuartige kombinierte Bahnenergieversorgung 2AC 2x25 kV 16,7 Hz + 1AC 15 kV 16,7 Hz entworfen und spezifiziert, welche die schnelle Elektrifizierung der Eifelstrecken unter den gegebenen planungsrechtlichen Rahmenbedingungen bis Ende 2026 ermöglicht. Damit wird ein leistungsfähiger und klimafreundlicher elektrischer Bahnbetrieb in der Region Eifel erreicht und insbesondere die mit großen Fahrzeuggrößen in dichten Takten verkehrenden Dieselverkehre in der Metropolregion Rheinland können auf Elektrotraktion umgestellt und mittelfristig in die S-Bahn Köln integriert werden.

Die Bahnenergieversorgung der Eifelstrecken erfüllt dabei die gleichen technischen Anforderungen, wie sie an eine konventionelle zentrale Bahnenergieversorgung mit 110 kV-Bahnstromleitungen und Unterwerken oder eine dezentrale Bahnenergie-versorgung mit dezentralen Umrichterwerken gestellt werden. Der Einsatz auf den Eifelstrecken wird erheblich durch das regional vorhandene zentrale 110 kV-Bahnstromleitungsnetz begünstigt, welches Leistungsreserven für die Speisung der Eifelstrecken besitzt und eine hohe Kurzschlussleistung bereitstellt. Soll die 2x25 kV + 15 kV-Bahnenergieversorgung über die Pilotanwendung bei den Eifelstrecken hinaus in anderen Elektrifizierungsprojekten angewendet werden, so muss daher eine projektspezifische systemtechnische Untersuchung im Einzelfall durchgeführt werden.

Literaturverzeichnis

1. Gesetz zur Errichtung eines Sondervermögens „Aufbauhilfe 2021" und zur vorübergehenden Aussetzung der Insolvenzantragspflicht wegen Starkregenfällen und Hochwassern im Juli 2021 sowie zur Änderung weiterer Gesetze (Aufbauhilfegesetz 2021 – AufbhG 2021), www.buzer.de/Aufbauhilfegesetz.htm (abgerufen am 12.08.2023).
2. Allgemeines Eisenbahngesetz (AEG), www.gesetze-im-internet.de/aeg_1994 (abgerufen am 12.08.2023).
3. Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG), www.gesetze-im-internet.de/uvpg (abgerufen am 12.08.2023).
4. TSI ENE, VERORDNUNG (EU) Nr. 1301/2014 DER KOMMISSION vom 18. November 2014 über die technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Energie“ des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union.
5. DIN EN 50163 VDE 0115-102:2005-07, *Bahnanwendungen – Speisespannungen von Bahnnetzen*, Deutsche Fassung EN 50163:2004.
6. DB Netz AG, *Ausbaustrecke 38 München – Mühldorf – Freilassing: Elektrifizierung und Bahnstrom entlang der Strecke*, www.abs38.de/elektrifizierung.html (abgerufen am 02.08.2023).
7. M. Meyer, M. Stadelmann und R. Kernen, *Auswirkung der Netzresonanzen im Lötschberg-Basistunnel*, In: eb Elektrische Bahnen, Jg. 105 (2007), H. 11, S. 570 – 576.
8. M. Aeberhard und R. Vollenwyder, *Erweiterung des Spielraums bei der Verkabelung von Bahnenergie-Hochspannungsleitungen*, In: eb Elektrische Bahnen, Jg. 121 (2023), H. 6, S. 226 – 231.
9. R. Vollenwyder und M. Aeberhard, *Erweiterung des Spielraums bei der Verkabelung von Bahnenergie-Hochspannungsleitungen*, Vortrag auf der 11. acrps, Leipzig, 2023.
10. J. Pape und A. Stephan, *Systemskizze für MS-Bahnenergieübertragung*, Unveröffentlicht, Dresden, 03.03.2022.
11. DIN EN 50388-1 VDE 0115-606-1:2023-06: *Bahnanwendungen - Ortsfeste Anlagen und Fahrzeuge - Technische Kriterien für die Koordination zwischen elektrischen Bahnenergieversorgungssystemen und Fahrzeugen zum Erreichen der Interoperabilität - Teil 1: Allgemeines*, Deutsche Fassung EN 50388-1:2022.
12. Simulationssoftware µPAS, Version 4.1.1, entwickelt und vertrieben von der IFB Institut für Bahntechnik GmbH.

13. BMDV: *Zielfahrplan Deutschlandtakt: Netzgrafiken für NW und RP / SL zum dritten Gutachterentwurf*, www.deutschlandtakt.de/downloads-und-presse (abgerufen am 11.08.2023).
14. DIN EN 60909-0 VDE 0102:2016-12, *Kurzschlussströme in Drehstromnetzen, Teil 0: Berechnung der Ströme*.
15. DIN EN 50122-1 VDE 0115-3:2023-02, B*ahnanwendungen - Ortsfeste Anlagen - Elektrische Sicherheit, Erdung und Rückleitung - Teil 1: Schutzmaßnahmen gegen elektrischen Schlag,* Deutsche Fassung EN 50122-1:2022.
16. DIN EN 50633 VDE 0115-633:2017-03, *Bahnanwendungen – Ortsfeste Anlagen – Schutzprinzipien für Wechselstrom- und Gleichstrom-Bahnenergieversorgungs-systeme*, Deutsche Fassung EN 50633:2016.
17. DIN EN 50388-2 - Entwurf VDE 0115-606-2:2017-09: *Bahnanwendungen – Ortsfeste Anlagen und Fahrzeuge - Technische Kriterien für die Koordination zwischen elektrischen Bahnenergieversorgungssystemen und Fahrzeugen zum Erreichen der Interoperabilität - Teil 2: Stabilität und Oberschwingungen*, Deutsche Fassung prEN 50388-2:2017.
18. DB Netz AG, *Technische Netzzugangsbedingungen (TNB)*, gültig ab 12.12.2021, zuletzt aktualisiert am 12.09.2022.
19. M. Palic, G. Schultz und K. O. Papailiou, *Freileitungen und Kabel in Hoch- und Höchstspannungsnetzen*, 1. Auflage, expert Verlag, 2022.
20. G. Hilgarth, *Hochspannungstechnik*, 3. Auflage, B. G. Teubner, 1997.
21. Sechsundzwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV), www.gesetze-im-internet.de/bimschv26 (abgerufen am 11.08.2023).
22. D. Oeding, B. R. Oswald, *Elektrische Kraftwerke und Netze*, 7. Auflage, Springer Vieweg, 2016.
23. Verordnung über die Erteilung von Inbetriebnahmegenehmigungen für das Eisenbahnsystem (EIGV), https://www.gesetze-im-internet.de/eigv/ (abgerufen am 14.08.2023).
24. Deutsche Bahn AG, *Aktiver Klimaschutz: Startschuss für die Elektrifizierung von mehr als 100 Kilometer Eisenbahnstrecke in NRW*, 23.10.2023, In: www.deutschebahn.com/de/presse/presse-regional/pr-duesseldorf-de/ presseinformationen-regional (07.11.2023).
25. Deutsche Bahn AG, *Baustart auf der Erfttalbahn: DB elektrifiziert Strecke zwischen Euskirchen und Bad Münstereifel*, 23.10.2023, In: www.deutschebahn.com/de/ presse/presse-regional/pr-duesseldorf-de/presseinformationen-regional (07.11.2023).

Session 5

Jan Pape, Sarah Pospischil, Florian Bonn, Sven Körner, Arnd Stephan

Autoren

Jan Pape
Dipl.-Ing.
Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Technische Universität Dresden
Professur für Elektrische Bahnen

Sarah Pospischil
M.Sc.
DB Energie GmbH
Projektleitung Investitionsprojekte
Betriebsbereich West

Florian Bonn
Dipl.-Ing. (FH)
DB Netz AG
Leiter Projekte Ausrüstungstechnik
Infrastrukturprojekte West Köln

Sven Körner
Dr.-Ing.
IFB Institut für Bahntechnik GmbH
Geschäftsführer

Arnd Stephan
Prof. Dr.-Ing.
Lehrstuhlinhaber
Professur für Elektrische Bahnen,
Technische Universität Dresden

Session 5
Gregor Reitz, Dirk Reiners, Martin Spiller, Oliver Jung, Jörg Multhoff,
Hendrik Hoffmann, Ernst August Werner

HYPP (Hydrogen Power Pack) A second life with a green heart

Reitz, Gregor[1]; Reiners, Dirk[1]; Spiller, Martin[1]; Jung, Oliver[1], Multhoff, Jörg[1]; Hoffmann, Hendrik[2]; Werner, Ernst August[1,2]

[1]ISATEC GmbH, Rathausstraße 10, 52072 Aachen, Germany
[2]ENGIRO GmbH, Avantisallee 51, 52072 Aachen, Germany

Zusammenfassung

Das modulare Konzept HYPP von ISATEC ermöglicht die Umrüstung bestehender dieselmechanisch angetriebener Züge auf einen batteriegepufferten Wasserstoffantrieb mit Brennstoffzelle. Die Modularität des Konzepts sichert dessen Zukunftsfähigkeit, da es über die gesamte Lebensdauer des Fahrzeugs eine Anpassung an den technischen Fortschritt ermöglicht. Die Umrüstung trägt zur Ressourceneffizienz bei und kann einen Beitrag zur Erreichung des Ziels der Klimaneutralität darstellen. Am Beispiel des VT 643 Talent wird eine mögliche Umsetzung der Konzeptidee vorgestellt.

Keywords: Ressourceneffizienz, batteriegepufferte Wasserstoffantriebe, Retrofit dieselmechanisch angetriebener Züge

1 Einleitung

Die Deutsche Bahn und deren Partner wollen bis 2040 klimaneutral fahren. Gleichzeitig werden bis 2030 lediglich gut 60% des gesamten Schienennetzes in Deutschland elektrifiziert sein. Da es sich hierbei vor allem um Hauptstrecken handelt, wird der Bahnverkehr auf den Nebenstrecken noch über Jahre auf alternative Antriebe und Kraftstoffe angewiesen sein. Ein Baustein zur Erreichung dieses Ziels ist die Erneuerung der Zugflotte mit Batterie- und Wasserstoffzügen. Um diese Transition im Sinne der Ressourceneffizienz zu unterstützen, hat ISATEC ein modulares Konzept entwickelt, mit dem sich bestehende dieselmechanisch angetriebene Züge auf einen batteriegepufferten Wasserstoffantrieb mit Brennstoffzelle umrüsten lassen. Dabei stützt sich unser Unternehmen auf über 20 Jahre Erfahrung in der Entwicklung von diesel-elektrischen, diesel-hydraulischen und diesel-mechanischen Antriebsmodulen für

Schienenfahrzeuge und eine weitreichende Expertise in der Auslegung, Konstruktion und Optimierung von Komponenten für elektrische und wasserstoffbetriebene Antriebsstränge.

Die Systeme werden passgenau für jedes Fahrzeug und jede Strecke optimiert, so dass die Dimensionierung der teuren Komponenten Brennstoffzelle und Batterie mit maximaler Effizienz und Wirtschaftlichkeit erfolgt. Da vorhandene Bauräume genutzt werden, kann der Umbau ohne größere Anpassungen am Fahrzeug realisiert werden.

2 Allgemeines

Der CO_2-neutrale Betrieb von Schienenfahrzeugen ist unter Verwendung von Oberleitungen grundsätzlich etabliert. Sobald aber auf einem Abschnitt der Fahrstrecke keine Oberleitung verfügbar ist, wird bisher meistens für die gesamte Fahrstrecke ein Dieselantrieb eingesetzt. Aktuell sind im Netz der Deutschen Bahn ca. 2.500 dieselbetriebene Züge im Einsatz. Die Umrüstung bestehender Züge mit einem CO_2-neutralen Antriebsstrang kann einen Weg zur Erreichung des Ziels der Klimaneutralität darstellen. Nach heutigem Verständnis ist der Einsatz von Brennstoffzellen-Antrieben für Strecken ab ca. 100 km sinnvoll. Die in diesem Beitrag beschriebene Konzeptidee ermöglicht es, für das Fahrzeug auf bewährte Technologieplattformen bisheriger Powerpacks zurückzugreifen. Die Modularität sichert die Zukunftsfähigkeit des Konzepts ab, da im Laufe der langen Nutzungsdauer (ca. 30 Jahre) die Technologie im Bereich Brennstoffzelle und Batteriespeicherung sicher deutliche Fortschritte machen wird. Durch den Austausch eigenständiger schnittstellenkompatibler Module ist eine nachträgliche Anpassung an den Einsatzzweck und an den technischen Fortschritt über die gesamte Lebensdauer des Fahrzeugs möglich.

Brennstoffzellenzüge sind lokal emissionsfrei, da sie lediglich Wasser als Abfallprodukt erzeugen. Die Hauptnachteile von Brennstoffzellenfahrzeugen sind die begrenzte Verfügbarkeit von Wasserstoff-Tankstellen und die aufwändige Wasserstoffherstellung. Werden für die Erzeugung des Wasserstoffs erneuerbare Energien eingesetzt, ist der Brennstoffzellenzug sogar komplett emissionsfrei. E-Fuels, also synthetisch hergestellte Kraftstoffe, können ebenfalls eine sehr gute CO_2-Bilanz aufweisen, wenn das CO_2 durch Carbon Capture unter Einsatz erneuerbarer Energien aus der Luft gefiltert wurde. Sie können in herkömmlichen Verbrennungsmotoren verwendet werden. Die Herstellung von E-Fuels ist jedoch energieintensiv und vergleichsweise teuer. Bei der Verbrennung von E-Fuels entstehen ca. 85-100% der NOx-Schadstoffe wie bei Dieselverbrennung, etwa gleich viel CO und ca. 60% Partikel. Auch Wasserstoff kann

in speziell angepassten Wasserstoffverbrennungsmotoren direkt verbrannt werden (H_2-Verbrenner). Hierbei entstehen geringe Emissionen an CO_2 und CO-Partikeln durch verbranntes Motoröl, auch kann sich (bei optimiertem Brennverfahren sehr wenig, ca. 1% im Vergleich zum Dieselmotor) NOx bilden.

Batteriebetriebene Züge sind emissionsfrei und tragen zur Reduzierung der Luftverschmutzung und des CO_2-Ausstoßes im Schienenverkehr bei. Da sie nicht an Oberleitungen oder Dieselkraftstoff gebunden sind, können batteriebetriebene Züge auf Strecken eingesetzt werden, auf denen eine Elektrifizierung nicht wirtschaftlich oder technisch möglich ist. Wie die Brennstoffzellenzüge sind diese Züge in der Regel leiser als herkömmliche Dieselzüge, was die Lärmbelastung in städtischen Gebieten verringern kann. Batterieantriebe können regenerative Bremsenergie effizient nutzen, um die Batterien während des Bremsvorgangs aufzuladen. Das hohe Gewicht und die geringe Leistungsdichte beschränken den Einsatz von batteriebetriebenen Zügen tendenziell auf kürzere Strecken mit insgesamt geringerem Energiebedarf.

3 Konzept des Umrüstkits

3.1 Stand der Technik & Konzeptentwicklung

In Deutschland sind im Personenverkehr derzeit ca. 970 Lokomotiven im Einsatz. Davon sind ca. 800 elektrische Lokomotiven, und 170 dieselbetriebene Lokomotiven (Wille et al. 2020). Im Bereich der Gelenktriebwagen waren 2023 ca. 30 Nahverkehrszüge mit innovativer Traktionstechnologie versehen. Derzeit und in naher Zukunft sind für den Personenverkehr mehrere Wasserstofftriebwagen verfügbar, z.B. Alstom Coradia iLINT, Coradia Stream & Coradia Polyvalent FCEMU Bimode Train (Wasserstoff & Pantograph), Siemens Mireo Plus H und der Stadler Flirt H2 (Böhm et al. 2022). Durch die Nachrüstlösung ist es möglich, bestehende Diesel-Züge auf CO_2-neutralen Antrieb umzurüsten.

3.2 Antriebsstrangauslegung & Optimierung

Mit dem von ISATEC entwickelten System-Simulationstool ISA-HyPlan erfolgt anhand eines digital twin eine Optimierung der Komponenten sowie die Abschätzung des Bauraum- und Massenbedarfs des brennstoffzellen-batterieelektrischen Antriebsstrangs bei gegebenem Anforderungsprofil. Hier gehen Werte verschiedener tatsächlich verfügbarer Komponenten (Batterie, FC, H_2-Tanks, etc.) aus einer bei ISATEC

aufgebauten Datenbank ein. Das Tool erlaubt eine stufenlose Skalierung der Systemgrenzen um flexibel auf die Anforderungen eingehen zu können. So kann beispielsweise eine allgemeine Auslegung des gesamten Antriebsstranges durchgeführt werden, bei der alle Komponenten mit ihren Schnittstellen integriert sind. Oder die Betrachtung kann auf ein Teilsystem begrenzt werden wie beispielsweise Motor und Wechselrichter. Bei der Analyse von Teilsystemen ist eine höhere Auflösung möglich und das Komponentenverhalten wird auch in sehr kleinen Zeitschritten realistisch wiedergegeben.

Dieser Aufbau erlaubt die Beantwortung komplexer Fragen wie beispielsweise nach dem Einsparpotenzial verschiedener Rekuperationsstrategien auf den Betrieb, sowie auch die Beantwortung von Detailfragen wie beispielsweise der Auswirkung eines zusätzlichen DC-DC-Wandlers vor dem Wechselrichter.

Abbildung 1 zeigt den Verlauf der Fahrwiderstände für einen VT 643 Talent über einer ausgewählten Fahrstrecke sowie die anteiligen Energiebedarfe zur Überwindung der Fahrwiderstände, wobei die im Antriebsstrang auftretenden peripheren Verluste (z.B. Lagerreibung) vernachlässigt werden. Als Referenzstrecke dient die Kursbuchstrecke 482 der Euregiobahn in der Region Aachen von Stolberg nach Düren. Die Gesamtstreckenlänge beträgt 132 km bei einem mittleren Haltestellenabstand von 3 km sowie einer Gesamtumlaufdauer von vier Stunden. Grundlage für diese Daten und das Referenzgeschwindigkeitsprofil bilden durchgeführte GPS Messungen während einer Mitfahrt im normalen Fahrbetrieb. Die Auswertung zeigt deutlich, dass der Beschleunigungs- und der Steigungswiderstand die dominierenden Fahrwiderstände darstellen. Unter der Annahme, dass die zur Überwindung dieser beiden Fahrwiderstände aufgewendete Energie bei identischer Start- und Endhaltestelle zu einem großen Teil rekuperierbar ist, ergibt sich ein deutliches Energieeinsparpotential gegenüber der Fahrt ohne Rekuperation. So reduziert beispielsweise ein Gefälle den Energiebedarf des Fahrzeugs zur Beschleunigung.

Durch konsequente Optimierung des Antriebsstrangs auf der einen und der Betriebsstrategie auf der anderen Seite können Komponenten optimal ausgewählt und die installierte Leistung und somit das Gewicht und die Kosten minimiert werden. Dabei spielt auch das Volumen und die Beschaffenheit des verfügbaren Bauraums eine Rolle, welcher bei der Simulation mitberechnet wird und die für eine Umrüstung möglichen Systemgrenzen vorgibt.

Eine zusätzliche Besonderheit von ISA-HyPlan ist, dass das Tool nicht nur auf die Simulation von Antriebssträngen in mobilen Anwendungen ausgelegt ist, sondern auch

Module zur Simulation der vorgelagerten Wasserstoffinfrastruktur enthält. So wird das „Henne-Ei-Problem“ der Einführung von Wasserstoff als Energieträger der Zukunft von beiden Seiten betrachtet. Bei der Herausforderung, Mobilität neu zu denken, kann es wirtschaftlich sinnvoll sein, die Umrüstung mit einer eigenen, regionalen Wasserstoffherstellung und Betankungsinfrastruktur kombiniert zu realisieren. Die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit der Fahrzeuge erweitert sich in diesem Falle um einen weiteren Geschäftszweig der dezentralen Wasserstoff-/ und Stromerzeugung, sowie deren Handel.

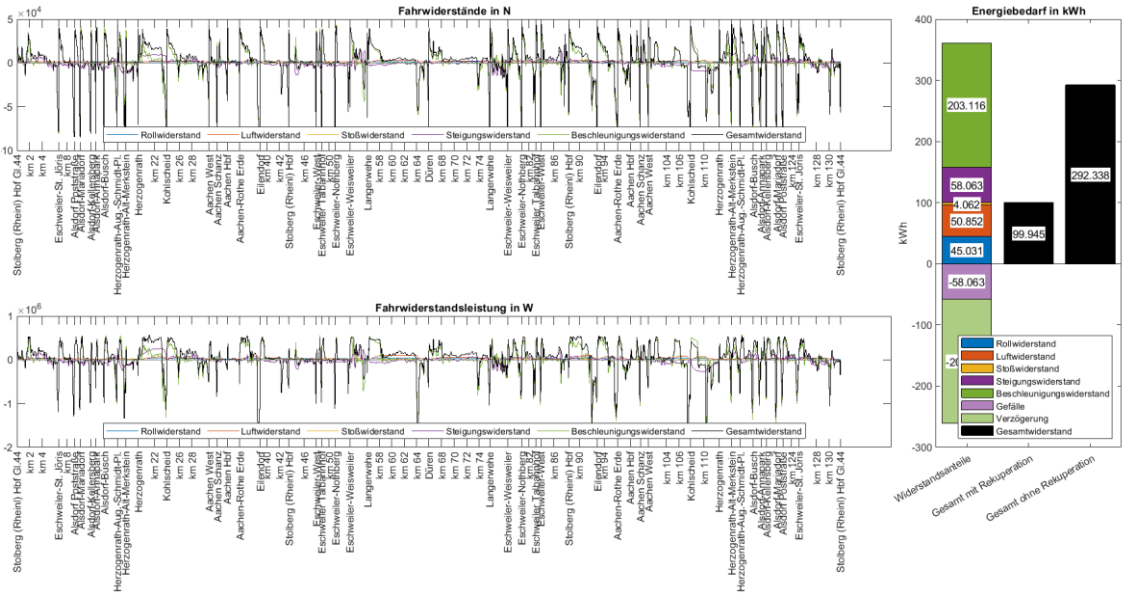


Abbildung 1: Simulation des Energiebedarfs für eine ausgewählte Referenzstrecke

3.3 Umsetzung in Konzeptidee für den VT 643 Talent

Abbildung 2 zeigt die Umsetzung der Konzeptidee für den VT 643 Talent. Das System hat eine Brennstoffzellenleistung von 2x120 kW, 2x100 kWh Batteriekapazität sowie Drucktanks für 2x60 kg Wasserstoff und erreicht damit je nach Streckenprofil eine Reichweite von über 500 km. Je nach Konfiguration können Antriebsleistungen von 2x400 kW genutzt werden.

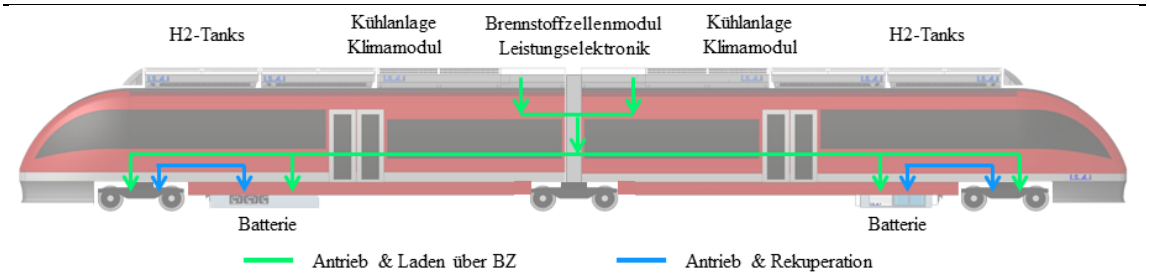


Abbildung 2: Gesamtsystem integriert im VT 643 Talent

Alle Module nutzen vorhandene Bauräume auf dem Dach sowie Bereiche unterflur, die durch den Wegfall von Dieselmotor, Getriebe und Dieseltank freiwerden. Bei der Suche nach einem möglichen Konzeptträger fiel die Wahl bewusst auf den VT 643 Talent. Zum einen handelt es sich hier um einen im Nah- und Regionalverkehr weit verbreiteten Fahrzeugtyp. Darüber hinaus stellt das Fahrzeug mit seinem engen Lichtraumprofil G1 höchste Anforderungen an den verfügbaren Bauraum. Somit dient der VT 643 Talent als Entwicklungsplattform, auf der die Konzeptlösung für ein möglichst breites Spektrum an Fahrzeugen ertüchtigt werden konnte. Die Befestigung der Module an der Fahrzeugstruktur erfolgt über eine adaptive mechanische Schnittstelle, die eine optimale Lasteinleitung garantiert bei gleichzeitig minimalen baulichen Anpassungen.

Da bei vielen Fahrzeugen die zulässigen Radsatzlasten nahezu ausgeschöpft sind, wurde großes Augenmerk auf ein möglichst geringes Gewicht der Module gelegt. Durch eine kompakte Anordnung der Komponenten und die gewichtsoptimierte Ausführung der Gehäuse in leichter Blechbauweise wurden die Massen bestmöglich reduziert. Darüber hinaus wurde bei der Auslegung und Anordnung der Module auf eine harmonische Lastverteilung geachtet, die den Fahrzeugschwerpunkt nach Möglichkeit minimal beeinflusst.

Der modulare Ansatz ermöglicht eine unabhängige parallele Fertigung und Prüfung der einzelnen Bausteine und trägt damit zur Reduzierung von Kosten und Bearbeitungszeiten bei. Die großzügige Zugänglichkeit im Außenbereich des Fahrzeuges bietet optimale Bedingungen für die Wartung, Reparatur und den Austausch einzelner Komponenten. Durch die geringe Anzahl klar definierter Schnittstellen bietet sich zusätzlich die Möglichkeit, komplette Module in kürzester Zeit zu tauschen. Dadurch lassen sich Stillstandszeiten im Betrieb erheblich minimieren.

3.3.1 Brennstoffzellenmodul mit Kühlanlagen

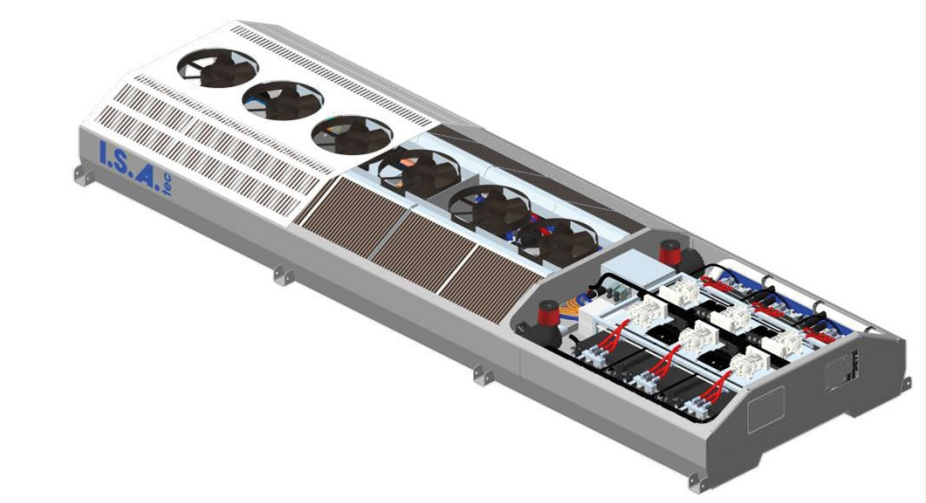


Abbildung 3: Darstellung des Brennstoffzellenmoduls mit Kühlanlagen

Durch die enge partnerschaftliche Zusammenarbeit der ISATEC GmbH mit einem Hersteller von Brennstoffzellenmodulen ist es uns möglich, dass System Brennstoffzelle bis auf die Komponentenebene zu beeinflussen. Somit können wir den Antriebsstrang in einer feineren Abstufung an die spezifischen Leistungsanforderungen des Kunden anpassen als es durch den Einsatz marktüblicher Einheiten möglich ist. Als Folge dieser anforderungsnahen Auslegung ist mit einer Reduzierung der Betriebskosten zu rechnen. Darüber hinaus eröffnet die freiere Anordnung der Systemkomponenten großes Potenzial bei der effizienten Ausnutzung des verfügbaren Bauraums. Dieses Prinzip findet seine Fortsetzung in der Integration der Kühlanlage in das Brennstoffzellenmodul (vgl. Abbildung 3). Auf diese Weise werden Leitungswege verkürzt, die Anzahl der äußeren Schnittstellen verringert sich und der erforderliche Bauraum wird wiederum reduziert. Eine Integration der Klimaanlage für den Fahrgastraum ist ebenfalls umsetzbar.

3.3.2 H2-Tankmodul

Abbildung 4: Darstellung des H2-Tankmoduls

Das in Abbildung 4 dargestellte Tankmodul fasst vier Typ IV-Druckbehälter in liegender Anordnung. Darin können 60 kg Wasserstoff bei einem Fülldruck von maximal 350 bar mitgeführt werden. Die Anhebung auf einen Fülldruck von 700 bar ist zum jetzigen Zeitpunkt zwar technisch möglich, allerdings sind Tanks und Komponenten der Gasregelstrecke bis 350 bar zu deutlich geringeren Kosten auf dem Markt verfügbar. Über die modulinterne Druckregelstrecke wird der Druck unmittelbar hinter dem Tankanschluss auf Niederdruck begrenzt. Durch die Anordnung des Tankmoduls in unmittelbarer Nähe zur Brennstoffzelle reduziert sich die Länge der wasserstoffführenden Leitungen auf ein Minimum. Zusätzlich sorgt die offene Bauweise des umgebenden Gehäuses für eine durchgehende passive Belüftung, die das Zustandekommen eines zündfähigen Gasgemisches durch etwaige Leckagen oder Permeation verhindert. In Verbindung mit der gezielten Platzierung gasführender Komponenten außerhalb des Aufenthaltsbereiches von Personen tragen die genannten Maßnahmen zu einer maximalen Reduzierung des Betriebsrisikos bei.

3.3.3 Antriebsmodul

Abbildung 5: Darstellung des Antriebsmoduls

An die Stelle von Dieselmotor und Getriebe tritt ein Elektromotor mit hohem Drehmoment, der direkt an die Kardanwelle des Drehgestells angeflanscht werden kann. Die deutlich höhere Leistungsdichte des Elektromotors und der Wegfall des Getriebes geben ausreichend Bauraum frei, der für Umrichter, Kühlanlage und Batterien genutzt werden kann. Selbst Reserven für die Ausweitung der Batteriekapazität lassen sich unterflur noch realisieren und vergrößern damit die Flexibilität in der Systemauslegung.

4 Zusammenfassung

Das Nachrüstset HYPP (Hydrogen Power Pack) verfügt über folgende Eigenschaften:

- Hohe Ressourceneffizienz durch weitgehende Übernahme der Komponenten des bestehenden Zuges
- Getriebelose Anbindung des elektrischen Antriebs an die Kardanwelle
- Leichte Nachrüstbarkeit
- Effizienzsteigerung durch Batteriepufferung & Rekuperation
- Geringerer Durchschnittsverbrauch
- Einsatzmöglichkeit trotz moderner Technik auf Nebenstrecken, da dezentrale Power2Gas-Anlagen mit mobilen Wasserstofftankstellen errichtet werden
- Streckenspezifische Optimierung der Komponenten mit unserem System-simulationstool ISA-HyPlan sowie Erstellung eines digitalen Zwillings
- Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zur Erreichung der vom Betreiber anvisierten Zielkosten

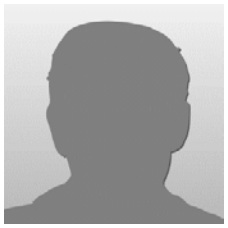
Literatur

Mathias Böhm, Abraham Fernández Del Rey, Johannes Pagenkopf, Maider Varela, Sebastian Herwartz-Polster & Beatriz Nieto Calderón (2022): Review and comparison of worldwide hydrogen activities in the rail sector with special focus on on-board storage and refueling technologies, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 47, Issue 89, Pages 38003-38017,https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.08.279.

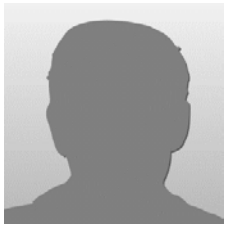
Nicolas Wille, Raphael Pfaff, Roland Nolte, Mark Vetter, Martin Hohn & Tim Tappert (2020): Innovatives Triebfahrzeug – Abschlussbericht „Identifizierung von Forschungsansätzen und technischen Grundlagen zur Entwicklung eines leiseren, umweltfreundlicheren und betriebswirtschaftlich darstellbaren innovativen Triebfahrzeugs für bislang nicht elektrifizierte Netze“, Studie im Auftrag des Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI).

Session 5
Gregor Reitz, Dirk Reiners, Martin Spiller, Oliver Jung, Jörg Multhoff, Hendrik Hoffmann, Ernst August Werner

Autoren



Reitz, Gregor
Stellv. Abteilungsleiter Konstruktion
g.reitz@isatec-aachen.de

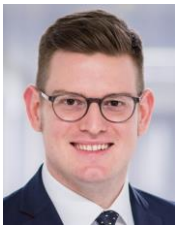


Reiners, Dirk
Abteilungsleiter Konstruktion
d.reiners@isatec-aachen.de

Dr. Spiller, Martin
Projektleiter R&D
m.spiller@isatec-aachen.de

Dr. Jung, Oliver
Systemanalyse & Modellentwicklung
o.jung@isatec-aachen.de

Multhoff, Jörg
Projektleiter
j.multhoff@isatec-aachen.de



Hoffmann, Hendrik
Teamleiter - Mechanische Entwicklung und Konstruktion
h.hoffmann@engiro.de

Dr. Werner, Ernst August
Geschäftsführer ISATEC GmbH
Rathausstraße 10
52072 Aachen
e.a.werner@isatec-aachen.de

IRSA 2023

SESSION 6

RAD SCHIENE I

WHEEL RAIL I

Session 6
Xin Ding, Helmut Netter, Saeed Hossein Nia, Zhendong Liu, Gang Chen, Sebastian Stichel

Impact prediction of higher operating speeds on wheel wear of a high-speed train

Xin Ding[1], Helmut Netter[1], Saeed Hossein Nia[2], Zhendong Liu[2], Gang Chen[1], and Sebastian Stichel[2]

[1] CRRC CHANGCHUN GERMANY RailTech GmbH, Kackertstraße 11, 52072 Aachen, Germany

[2] KTH Royal Institute of Technology, School of Engineering Sciences, Teknikringen 8, SE-100 44 Stockholm, Sweden

Abstract

One of the major challenges for designing higher operation speed train is to predict and control the wheel wear. To investigate the speed influence on the evolution of wheel wear, two high-speed trains operating on the Beijing-Shanghai Railway line at a maximum operational speed of 300km/h and 350km/h, respectively, are monitored over a time of 1.5 years. MBS based wear calculation software tool using stochastic simulation inputs has been used for wear prediction, where the vehicle suspension parameters and global structural modes of car-body and bogie frame have been identified using roller rig measurements and dynamic track measurements as well to validate the simulation models. The calculated wear is then validated against measurements for trailer and motor coaches by calibrating the wear rate coefficients. The lateral wear distribution of the leading and intermedial coaches under higher speed over 350km/h are analyzed. A feasible wear control strategy of lower initial conicity is proposed for future study.

Keywords: High-speed train, wear prediction, wear monitoring, wear control, multi-body simulation, field tests, ride comfort, suspension parameter, conicity, model validation

1 Introduction

The current highest operation speed of the high-speed trains in China is 350km/h. It only takes less than 4 hours to travel from Beijing to Shanghai by the fastest Jinghu high-speed railway, which generates lots of benefits for the national economy and conveniences for people. According to the development planning of high-speed railway transportation, the higher speed railway and trains operating at 400km/h are under developing in China. One of the major challenges is how to predict and control the wheel wear for the higher speed trains, which is the critical factor to ensure operational safety and comfort [1]. The higher operation speed over 350km/h, not only increases wheel-rail contact loads due to worse track irregularities and larger cant difference in curves, but also highlights more

prominent influence of aerodynamic loads [2]. Aerodynamic loads distributed unevenly along the longitudinal direction of high-speed train, which results in very different load conditions for wheel wear development between the leading and intermedial vehicles [3]. On the other hand, due to the existence of transmission system. Different wear evolution rates between motor and trailer coach may be enhanced by the higher speed.

Therefore, the goal of this work is to predict the complete evolution of wheel wear at the train under higher operation speed over 350km/h. The research results will provide boundary restrictions and optimization objectives for the higher speed train design.

2 Wear evolution from monitoring test

2.1 Setup of monitoring test

Two CR400BF high-speed trains operating on the Beijing-Shanghai Railway line at maximum operational speed of 300km/h and 350km/h respectively are chosen to be monitored, including wheel wear measuring, and running dynamics testing. Fig. 1 shows the tested train, the MiniProf™ tooling for measuring wheel tread, and running dynamic monitoring system. Approximately, the wheels of high-speed trains were reprofiled after every 200,000 km. The total monitoring time for each train was about 1.5 years. The wheel tread profiles of the test trains were measured after every approximately 20,000 km.

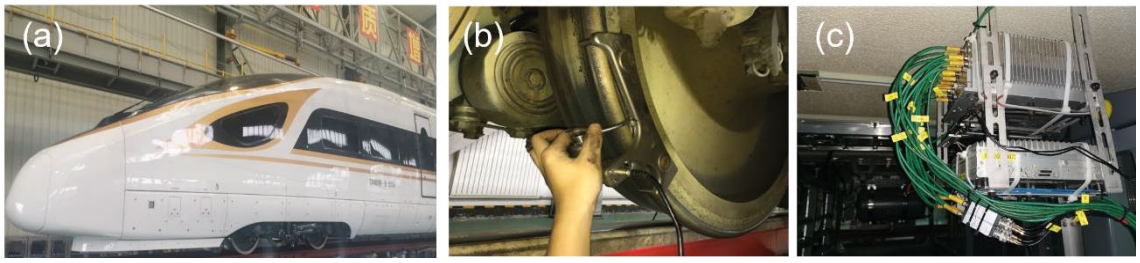


Fig. 1. Setup of monitoring test, (a) one tested train, (b) MiniProf™ for measuring wheel tread, (c) running dynamic monitoring system.

2.2 Evolution of equivalent conicity

The monitored CR400BF high-speed EMU trains are composed of 17 coaches. Cars at both ends (No. 1, 17) are defined as the leading cars, since the trains always operate in 2 directions. The wheelsets of each 4 intermediate trailer cars (No. 6,8,9,11) and motor cars (No. 5,8,10,12) are selected for comparison. Fig. 2 shows the evolution of the normalized

equivalent conicity of leading cars, trailer cars, and motor cars of the two monitored trains with operation speeds of 300km/h and 350km/h, respectively.

1) Both for the two monitored trains, the increase of developed equivalent conicity is significantly higher than for the intermediate trailer or motor cars. However, there is no discernible difference in conicity evolution between the motor vehicles and trailer cars.

2) In the first two operation reprofiling stages of Train 2, the operation speed of 350km/h only occupied half mileages. The equivalent conicity increases faster when more percentages of 350km/h were implemented. Comparing the 5th reprofiling stage of Train 1 and Train 2, the average growth rate of equivalent increases by 10% (calculated from real values) with operation speed changes from 300km/h to 350km/h.

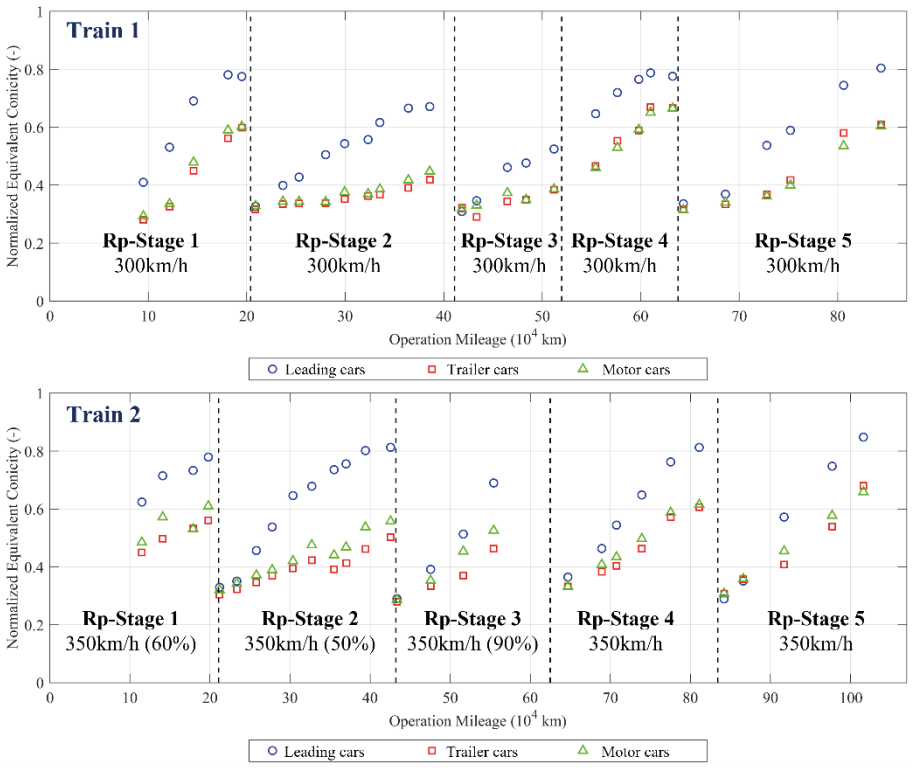


Fig. 2. Evolution of the equivalent conicity of two trains with different operation speeds

3 Modelling and validation of wear prediction

The proposed workflow and methodology of wheel wear prediction will be implemented and validated by simulating the monitored train and track, as well as the measured wheel wear data.

3.1 Workflow and methodology

The principal algorithm [4] of the wheel wear prediction tool is shown in Fig. 3. The general procedure can be divided into smaller groups: load collective design, vehicle-track simulations (MBS using SIMPACK), calculation of wheel and rail contact response. The obtained results are then used for wear calculations. Lastly, wheel profiles are updated and considered as starting profile for the next set of MBS simulations and wear calculations (this is called wear step).

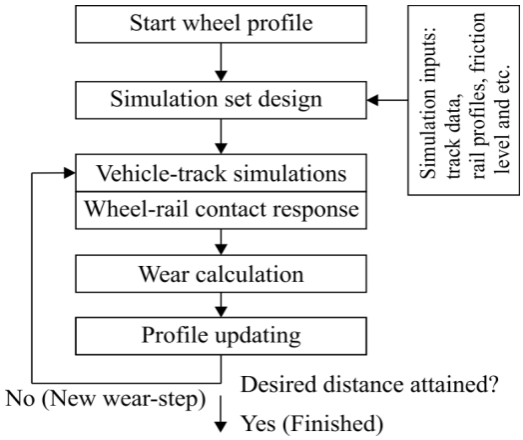


Fig. 3. Principal algorithm of the wheel wear prediction tool.

The high-speed EMU trains monitored in Section 2 are selected for the wear prediction. 1) *MBS simulation model*. Vehicle suspension parameters and global structural modes of car-body and bogie frame have been identified using roller rig measurements and dynamic track measurements as well to validate the simulation models.

2) *Load collective design*. A set of time-domain simulations that is chosen to reflect the actual railway network and the vehicle operating conditions. The original rail profile (CN60N) is used, where the track is divided into 14 sections based on the existing curve radii on the track from Beijing to Shanghai. The share of each track section with the total track length is represented in Fig. 3.

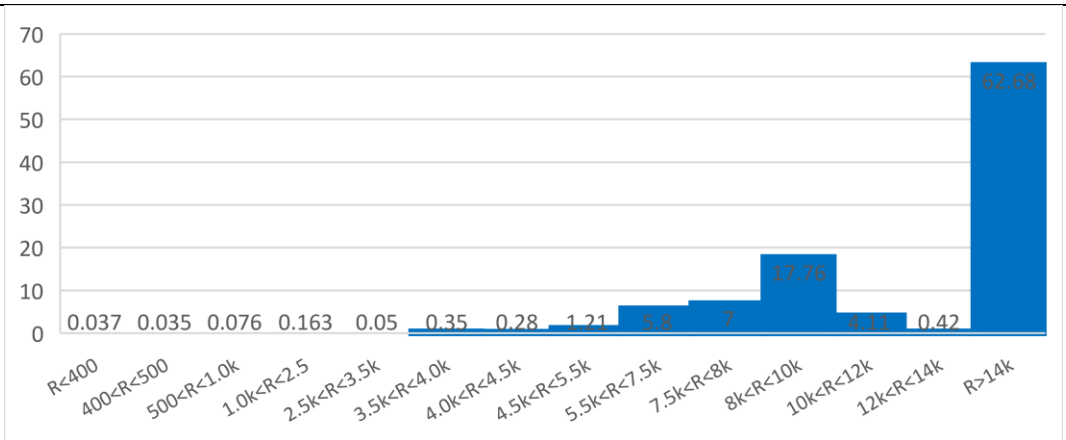


Fig. 4. Share of each track section with the total track length.

3) *Wear calculation method*. In SIMPACK the contact is modelled with the Hertzian theory [5] for the normal contact and the tangential contact is solved by using the FASTSIM algorithm which is based on Kalker's simplified theory [6]. As a post processing stage, the output of MBS, i.e., contact patch shape and size, position of contact point on the wheel, creepages, and normal load are used to determine the parameters that are needed for the calculation of wear on the wheel. To determine the amount of wear on the wheel, the normal load on the contact patch, wheel-rail slip velocity vector and sliding distance magnitude are needed. Archard's wear model [7] is used to calculate the wear due to sliding of the wheel over the rail. The wear coefficients are chosen using the measured evolution data of wheel profiles. To determine the wheel wear, the MBS based wear calculation software tool of KTH using stochastic simulation inputs is used [8,9].

3.2 Validation of wear prediction

The first measurements of wheel profiles done at 15,000 km for the 3rd vehicle (trailer car) of Train 2 are selected as initial profiles for calculation. The last measurement before reprofiling done at 198,000 km are selected to compare with the wear prediction results. Fig. 5 shows the simulated worn profile of the left wheel of the leading axle of the trailer coach and the comparison with measured worn profile. Fig. 6 shows the corresponding predicted wear depth on each wheelset of this trailer car.

1) The predicted worn profile is in good agreement with the measured worn profile, which can validate the proposed wear prediction method.

2) The maximum predicted wear depth of leading axle is 0.57mm and it is located at -7.6 mm in lateral direction of wheel profile origin. The source of the maximum point away

from zero lateral coordinate of wheels is due to the deviations between the nominal rail profiles (which is used in the simulations), and the actual rail profiles used on the line between Beijing and Shanghai.

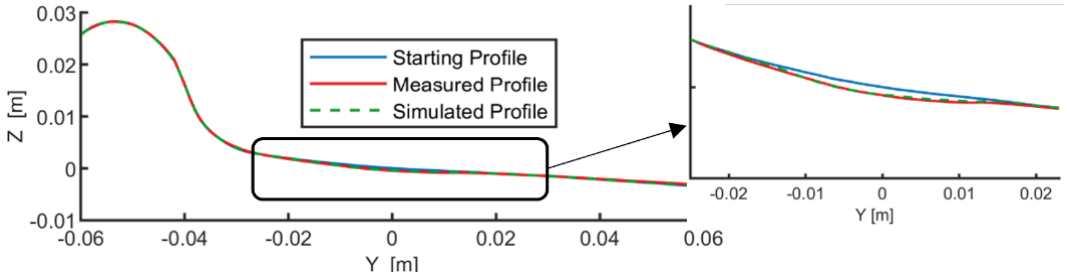


Fig. 5. Starting wheel profile LMB10 and worn profiles.

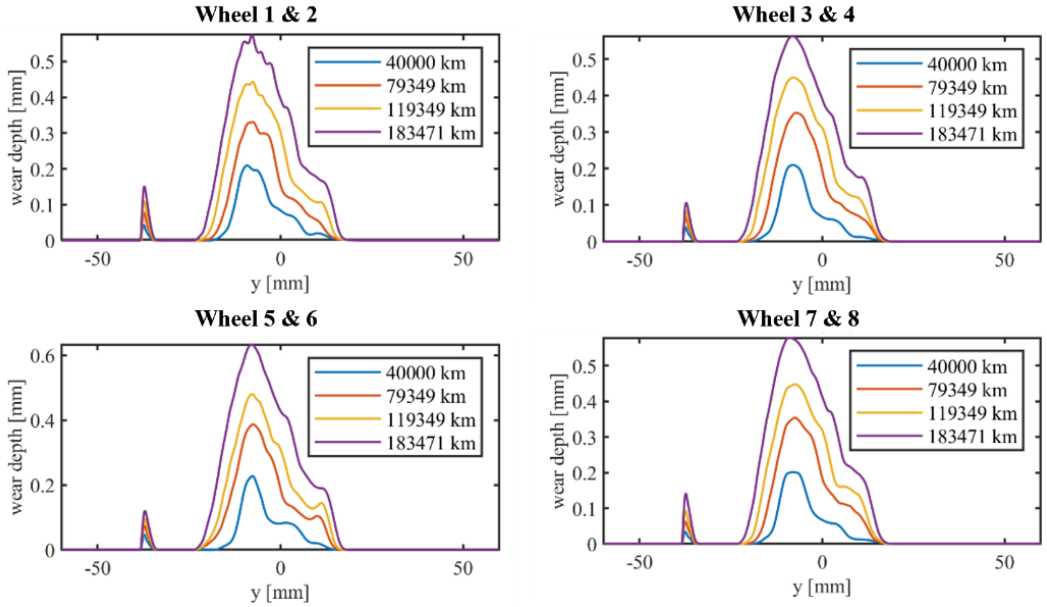


Fig. 6. Wear depth distribution on each wheelset

4 Wear prediction in higher speeds and control strategies

Based on the validated wheel wear prediction model, the wheel wear under higher operational speeds, and the influence of initial conicity will be calculated in this section.

4.1 Wear prediction in higher speeds

Fig. 7 and Fig. 8 shows the wear depth distribution of each wheel while increasing the simulated speeds from 350km/h to 385km/h and 400km/h on the straight track section (R>14k in Fig. 4) by using the wear prediction methodology validated in Section 3.

1) For the original profile, increasing the speed to 385 and 400km/h, the maximum wear depth results in around 0.2 mm more wear on the tread side and 0.3 mm more wear at the flange side after about 200,000 km running distance.

2) The original wheel profile needs to be optimized while designing the new train with higher speeds than 350km/h.

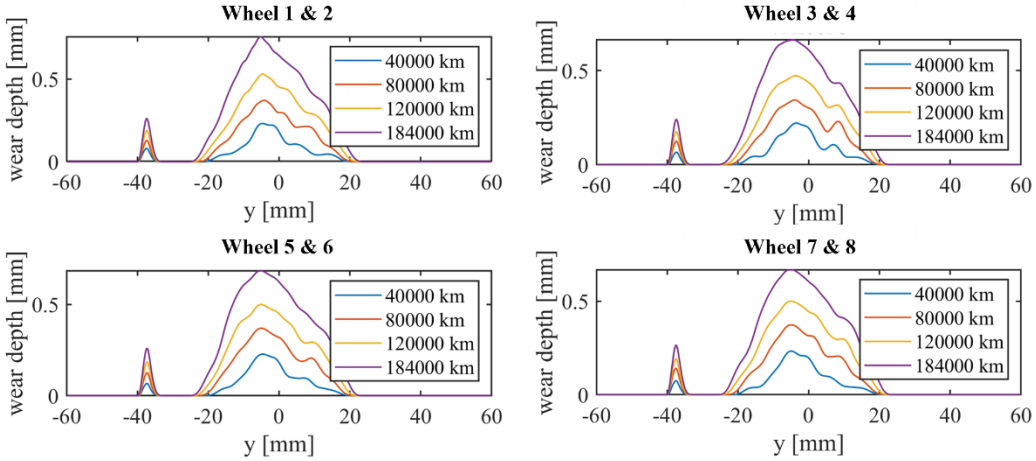


Fig. 7. Wear depth distribution of each wheel with maximum operation speed of 385 km/h

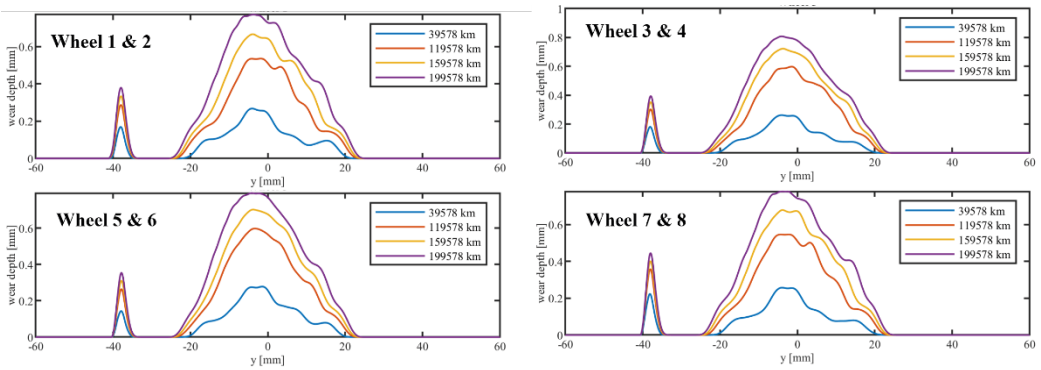


Fig. 8. Wear depth distribution of each wheel with maximum operation speed of 400 km/h

4.2 Influence of the initial equivalent conicity

To investigate the influence of the wheel profiles with different initial equivalent conicity, the new wheel profiles are generated numerically using systematic geometric translation and rotation of the pre-existing LMB10 wheel profile geometry. Fig. 9 shows the simulated normalized wear depths for 200,000 km running distance with the maximum speed of 350km/h using the wheel profiles with 4 different initial conicities ranging from

0.056 to 0.127 (the original profile refers to the LMB10 wheel profile with un-worn wheel conicity of 0.10). The lowest starting equivalent conicity wheel (denoted by the blue line) shows the lowest overall wear depth lower than 0.29 mm compared to the highest equivalent conicity wheel which has a wear depth larger than 0.7 mm.

Therefore, wheel profiles with low initial conicities result in significantly less wear. However, for the optimization of the wheel profile, both the influences on the wear depth and running dynamic performance needs to be considered. Optimization of suspension parameters for the implementation of new wheel profiles with lower initial conicity will be studied in future.

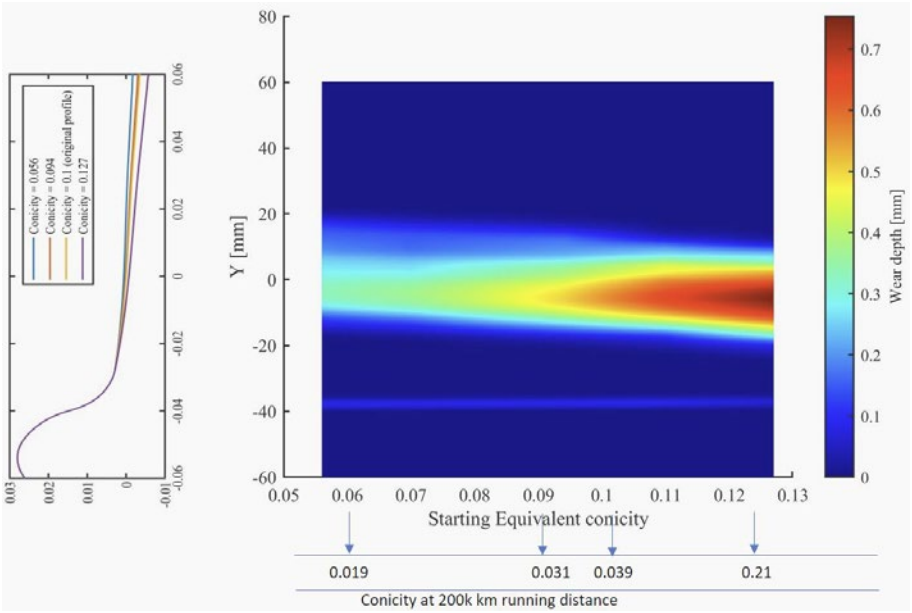


Fig. 9. Normalized wear depth results using the wheel profiles with different initial conicities.

5 Conclusions

In this paper, the wheel wear prediction methodology is demonstrated for two high-speed EMU trains operating on Beijing-Shanghai high-speed network line with maximum speeds of 300km/h and 350km/h. The influence of higher operation speeds on the wheel wear is predicted, and the feasible wear control strategy of lower initial conicity is proposed for future study.

1) Equivalent conicity of leading cars is significantly faster increasing than for the intermediate trailer or motor cars. The average growth rate of equivalent conicity is increased by 10% when the operational speed raised from 300km/h to 350km/h.

2) The proposed wear prediction methodology is validated by the monitored wheel tread data of high-speed trains. The simulated worn wheel profile is in good agreement with the measured wheel profile both regarding wear distribution and wear depth.

3) Raising the maximum speed from 350km/h to 385km/h and 400km/h result in around 0.2 mm more wear on the tread side and 0.3 mm more wear at the flange side after about 200,000 km running distance. Wheel profiles with lower initial conicities can be selected as a feasible wear control strategy for further study.

References

[1] Zhai W., Jin Y., Wen Z., and Zhao X.: *Wear Problems of High-Speed Wheel/Rail Systems: Observations, Causes, and Countermeasures in China.* Applied Mechanics Reviews, 72(11), 060801-1-060802-23(2020).

[2] Ding X., Chang C., and Ling L., etc.: *Mechanism analysis of low-frequency swaying motion of high-speed trains induced by aerodynamic loads*. Journal of Vibration and Control, 2023.

[3] Bell JR, Burton D, Thompson MC, et al.: *Dynamics of trailing vortices in the wake of a generic HST*. Journal of Fluids and Structures 65: 238–256(2016).

[4] Jendel T: *Prediction of wheel profile wear-comparisons with field measurements*. Wear, 253, 89-99(2002).

[5] Hertz H.: *Über die Berührung zweier fester, elastischer Körper*. Journal für die reine und angewandte Mathematik, 92(1882).

[6] Kalker J.: *Three-dimensional elastic bodies in rolling contact*. Springer Science & Business Media (2013).

[7] Archard J.: *Contact and rubbing of flat surfaces*. Journal of applied physics, 24(8), 981-988(1953).

[8] Hossein Nia S., Sichani M., Stichel, S. and Casanueva C.: *Wheel life prediction model – an alternative to the FASTSIM algorithm for RCF*. Vehicle System Dynamics, 56(7), 1051-1071(2018).

[9] Bosso N., Magnelli M., and Zampieri N.: *Simulation of wheel and rail profile wear: a review of numerical models*. Rail Engineering Science, 30(4), 403-436(2022).

Session 6

Xin Ding, Helmut Netter, Saeed Hossein Nia, Zhendong Liu, Gang Chen, Sebastian Stichel

Authors

Ding, Xin

Received Ph.D. degree in engineering from Dalian University of Technology, China. Now he is a senior engineer in CRRC CHANGCHUN GERMANY RailTech GmbH, Germany. His main research domains include experiment and simulation of railway vehicle dynamics.

Helmut, Netter

Senior expert and team lead of running dynamics at CRRC CHANGCHUN GERMANY RailTech GmbH, Germany.

Saeed Hossein Nia

Currently a researcher in Engineering Mechanics at KTH Royal Institute of Technology, Sweden. He is also a senior vehicle-track interaction researcher at NRC, Canada.

Liu Zhendong

Currently a researcher in Rail Vehicle Technology in KTH Royal Institute of Technology, Sweden.

Chen Gang

Managing director of CRRC CHANGCHUN GERMANY RailTech GmbH, Germany.

Sebastian Stichel

Professor in Rail Vehicle Dynamics at KTH Royal Institute of Technology, Sweden.

Session 6
Luna Haydar, Florent Loete, Frédéric Houzé, Philippe Testé, Tanguy Choupin, Fabien Guiche

A wheel-rail electrical contact experiment at the laboratory scale

Haydar, Luna[1,2], Loete, Florent[2], Houzé, Frédéric[2], Testé, Philippe[2], Choupin, Tanguy[1], Guiche, Fabien[3],

[1]SNCF, Direction Technologies Innovation et Projets Groupe, 1-3 avenue François Mitterrand, 92300 La Plaine Saint Denis, France

[2]GeePs, Group of electrical engineering Paris, CNRS, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay, 3 & 11 rue Joliot-Curie, 91192 Gif-sur-Yvette Cedex, France

[3]SNCF Réseau, Direction Générale Industrielle & Ingénierie, Direction Technique Réseau, Département de la Signalisation Ferroviaire, 6 avenue François Mitterrand, 93574 La Plaine Saint Denis Cedex, France

Summary

In order to improve the safety of the railway network, accurately knowing the train's location on a track section is an important task. Generally, this can be ensured by the technical system known as "track circuit". The reliability of the track circuit depends on the quality of the electrical contact between the wheel and the rail. Unfortunately, any degradation of the materials (wheel-rail) can result in a malfunction of the track circuit and thus a failure of the train detection, which can be extremely dangerous in terms of the safety of the rail network and passengers. In this paper, the designing and realization of a test bench that reproduces the electrical wheel-rail contact at a laboratory scale is presented. The scaling was done considering mechanical, electrical, and thermal effects. An original homemade salt spray system was elaborated and used to obtain a controlled oxidation of the rail. Some preliminary results of the electrical resistance behavior of the test bench as a function of several parameters (contact force, roughness and surface oxidation) are examined.

Keywords: deshunting, track circuit, wheel/rail electrical contact, oxidation, test bench.

1 Introduction

The accurate localization of trains on railway tracks is crucial for ensuring the safety of railways. This is achieved through a technical device called the "track circuit", which provides real-time information about the presence of the train within a specific track section. When a train enters this zone, its wheels and axle create a short circuit between the two rails, indicating the occupancy of the zone. The signaling systems can be activated

accordingly. Maintaining a high-quality wheel-rail contact is therefore a major issue for ensuring the reliability of the track circuit system and hence the track safety. If this contact is affected by a third body of natural or artificial origin, present in the interface, the train detection can be jeopardized for a certain period, leading to the phenomenon known as "deshunting" and the train presence is no longer detected. Despite the implementation of various devices to prevent [1] or reduce the occurrence of deshunting, many instances are still being detected every year.

The significant impact that deshunting events can have on the railways management and on the occurrence of potentially dangerous situations, such as level crossing failures and rail accidents, has forced researchers to focus their attention on studying the behavior of the wheel-rail electrical contact interface. The composition of the third body present at the wheel-rail interface may be complex, since it can include both external contaminants (dead leaves, frost, sand, oil...) and oxides formed naturally on surfaces [2]. Regarding oxides, composition was investigated using in situ X-ray diffraction. On the rail head, iron oxide, particularly in the form of FeOOH and Fe_3O_4, is the most dominant species [3]. Furthermore, Nakahara *et al.* provide a surface analysis by examining the concentration of oxide near the contact surface and the composition of both oxide and hydroxide [4]. In [5], the mechanical and electrical aspects of the third body (oxide layer) formed in the wheel-rail contact interface are examined through tribological, morphological and microscopic analyses. The study investigates the electrical conductivity, heterogeneity, continuity, and compactness of the third body under both good and poor shunting conditions. Additionally, Fukuda *et al.* establish that several factors, including normal load, current intensity, oxide layer thickness and traffic frequency, can jointly influence the contact resistance [6]. A better understanding of wheel-rail electrical contact was also obtained through the studies that were carried out on a ¼-scale test rig and on-site using an instrumented regional train [7-8]. These studies highlighted the non-linear $U - I$ characteristics, which are strongly dependent on the presence of oxide at the contact interface. These results showed that scaled-down tests were in fact significantly representative compared to full-scale tests, demonstrating the relevance of performing such experiments. However, conducting tests at full-scale or even ¼-scale can be both cumbersome and costly, making it an obstacle to rapid progress in this area of research.

The aim of this work is to develop a laboratory-scale rolling contact test bench that reduces the complexity and cost associated with conducting these experiments, while faithfully reproducing wheel-rail electrical contact on a reduced scale. By analyzing various aspects of contact under reproducible conditions (controlled speed, load, and oxidation state), we seek to improve our knowledge of the deshunting phenomenon. This paper will be focused on the study of the influence of oxidation since it is one of the major causes of deshunting. The first performed tests to validate the bench consisted in investigating the resistance behavior in relation to different parameters such as load, current, and time. Furthermore, the ease of developing controlled surface degradation protocols makes it easier to assess their impact on contact resistance. Overall, our work offers new perspectives and possibilities for improving railway systems.

2 Bench conception

2.1 General principle

The developed setup, presented in Figure 1, consists in a reduced-scale wheel running on a 1 m full-scale rail. An electrical actuator applies a normal force on the wheel axis inducing a pressure on the contact area equivalent to that produced by a real loaded train. The linear motion axis allows the wheel carriage to move along the rail at a controlled, scaled-down speed.

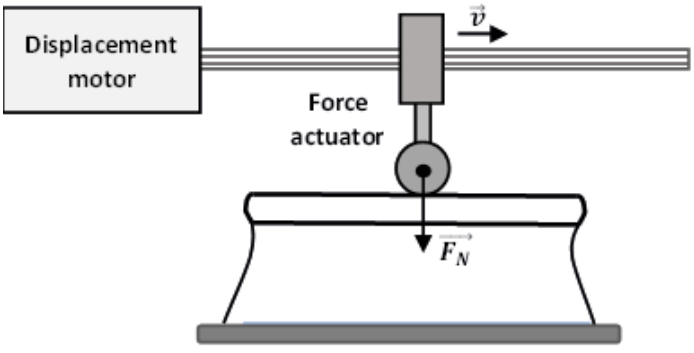


Figure 1: Schematic diagram of the test bench

The bench was designed in order to be the most representative as possible of the devices most likely to be involved in deshunting problems. Electrically, the aim will be to simulate the most extensively used track circuit on the French rail network (FRN).

The sizing of the reduced scale wheel (hereinafter referred to as roller), the load applied, and the speed of the displacement were estimated as explained in section 2.2.

Our major concern was to reproduce the physical behavior of the contact interface. Consequently, we had to study carefully the impact of the downscaling on the dimensions of the setup.

2.2 Dimensioning methodology

Mechanical laws were considered when scaling the test bench to be the most representative of the full-scale behavior of the wheel-rail contact.

It was designed following three criteria:

1. same aspect ratio of the contact surface at both scales.
2. same average contact pressure at both scales.
3. same fraction of contact surface renewed at both scales during a track circuit signal period.

2.2.1. Choice of the roller

The shape of the roller is chosen to ensure that the contact surface between the wheel and the rail is geometrically similar at both scales. To estimate the wheel-rail contact surface, we rely on Hertz's theory, which is a widely-used reference, although we are aware that its assumptions will only be partially satisfied. Hertz's theory assumes:

- Perfectly elastic and homogeneous bodies in contact with isotropic mechanical properties.
- Smooth contact surfaces.
- Semi-infinite bodies with contact dimensions very small compared to body dimensions and radii of curvature.

According to Hertz's theory [9], the contact surface forms an ellipse with semi-axes (a, b) and the surface is given by the following expression:

$$S_{contact} = \pi * m * n * \left(\frac{3}{2} * F_N * \left(\frac{1-\upsilon^2}{E}\right) * \left(\frac{1}{A+B}\right)\right)^{\frac{2}{3}} \quad (1)$$

- E and υ: Young's modulus and Poisson's ratio of the steel.
- A and B: combined longitudinal and transverse curvatures.
- m and n: tabulated coefficients dependent on A and B [10].

Consequently, the first criterion means maintaining the same *a/b* ratio between the long and short axes of the elliptical contact surface on both scales.

It is important to note that at full scale, the wheel can be assimilated to a cylinder when it is in contact with the rail (Figure 2, top). Considering that the curvature radius of the head of the rail $R_{c\ rail}$ is unchanged, and the scaling ratio of the wheel, the shape of the contact surface in the transverse direction would have been nearly rectangular. To satisfy the first criterion, the rolling face of the wheel was chosen toroïdal, as pictured in Figure 2, bottom. The transverse radius of curvature $R_{T\ roller}$ allows us to adjust the shape of the contact surface while maintaining the desired *a/b* ratio.

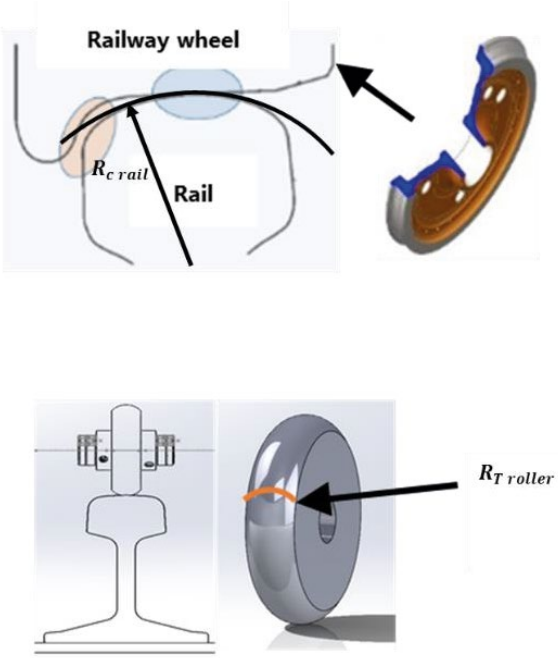


Figure 2: Wheel-rail contact at full scale (top) [13] and at reduced scale (bottom).

2.2.2 Choice of force actuator

According to the second criterion, the choice of the force actuator aims to maintain the same average contact pressure at both scales (denoted respectively $P_{scale\ 1}$ and $P_{reduced\ scale}$) :

$$P_{scale\ 1} = P_{reduced\ scale} \quad (2)$$

Knowing the normal forces per wheel of a full-scale train and its size, and using the Hertz' equation (1), we can calculate the normal force to be applied at the reduced scale using the following equation:

$$F_{N\ reduced\ scale} = P_{scale\ 1} * S_{contact\ reduced\ scale} \quad (3)$$

An abacus has been developed to determine the appropriate normal force required on the reduced scale for a given roller radius, maintaining the same average pressure applied as at full scale. Considering the trains that are the most subject to deshunting, the full scale load per wheel ranges from 55 kN to 105 kN resulting in a 235 N to 430 N range at reduced scale for a 30 mm radius roller.

2.2.3. Speed scaling

Considering the third criterion, the speed of the wheel carriage has to be chosen to maintain the same fraction of contact area renewed during a track circuit signal period at both scales.

The extreme case of this criterion corresponds to the minimum displacement speed at which the contact ellipse will be completely renewed within a track circuit signal period Δt. In this case, the contact interface comprises a "new" oxide layer at each current alternation. The minimum speed required to obtain a fully renewed contact ellipse is denoted by v_{2a}. It can be calculated using the following equation:

$$v_{2a} = 2 * a * f_{cdv} \quad (4)$$

where f_{cdv} is the frequency of the track circuit considered in our study.

2.3 Four-point electrical measurements

The measurement of the wheel-rail electrical contact resistance is performed using the four-point method, as shown in Figure 3-b, which illustrates the principle of this technique applied to the test bench. Figure 3-a shows a photograph of the concrete implementation, where two copper thread brushes are used to inject current from a source into the contact, while two other brushes (placed closest to the contact) are used to measure the contact voltage. The current flowing through the contact is evaluated by measuring the voltage V_s across a well-known shunt resistance R_s.

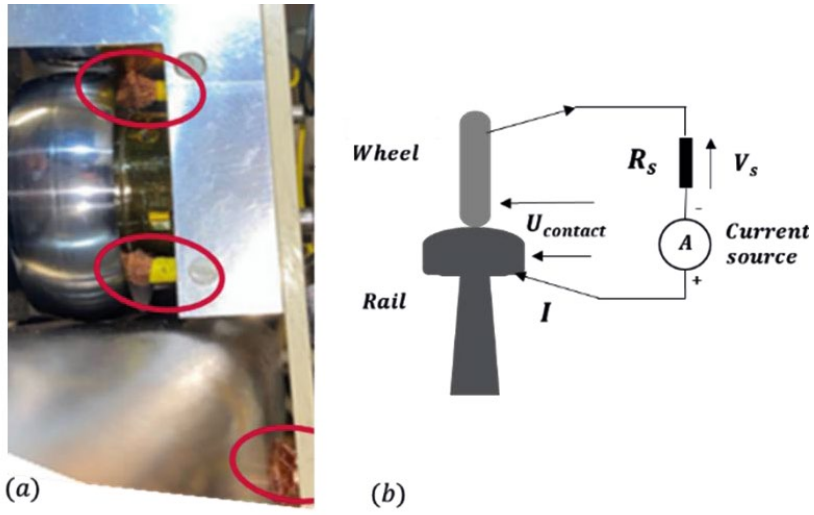


Figure 3: Electrical measurement system based on the four-point method: (a) photograph of the copper thread brushes (circled) (b) schematic of the electrical measurement setup on the bench.

2.4 Surfaces preparation

2.4.1 Reference surfaces

To approach the conditions required by Hertz's theory, where surfaces are assumed to be perfectly smooth, efforts were made to improve the roughness of both the wheel and rail surfaces. In order to obtain a smoother surface, the wheel was polished using different grades of polishing paper. Evaluation of the overall surface quality (surface defects) was performed using a binocular observation, as shown in

. Additionally, a profilometer was then employed to measure the surface roughness. Based on more than 30 measurements, we found that the average and peak-to-peak roughness values were respectively $R_a = 0.4\ \mu m$ and $R_t = 4.5\ \mu m$.

As for the rail, the same polishing process was applied. However, given the complexity of assessing rail surface quality with binocular or profilometer observations, considering its size, a roughness tester from Mitutoyo ('SurfTest SJ301' model) was used. This device can evaluate arithmetic roughness (Ra) and other parameters associated with surface profile parameters. Based on more than 30 measurements within an arbitrary rail zone, the roughness values obtained were $R_a = 0.8\ \mu m$ for average roughness and $R_t = 8.2\ \mu m$ for peak-to-peak roughness.

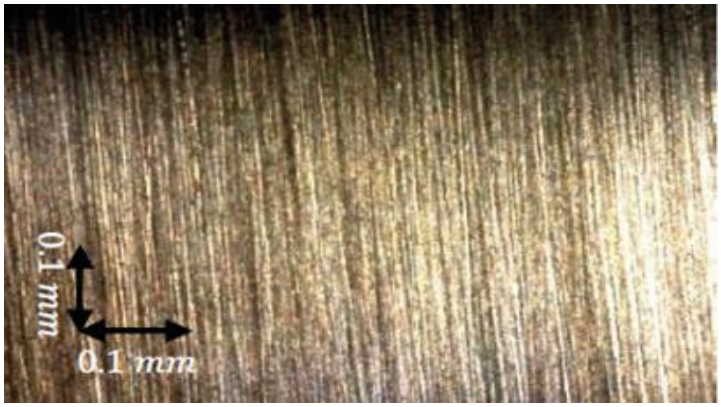


Figure 4: Improved wheel surface quality observed through a binocular lens.

Following this work, six distinct reference zones, shown in Figure 5, were delimited on the wheel where the visual aspect was observed and the roughness measured before and after the experiments, presented in section 3.

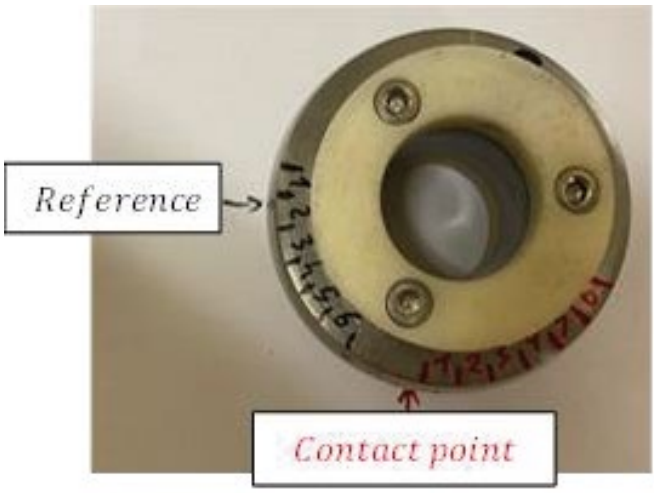


Figure 5: Six reference zones defined on the wheel after an improvement in polishing quality.

2.4.2 Oxidation protocol

To achieve severe, accelerated and controlled oxidation of the rails, we employed a homemade salt spray system. The principle of this system consists of spraying a saline solution with a NaCl concentration of 0.6 mol/l, similar to seawater, into a testing chamber, creating a favorable environment for oxidation. The saline solution is applied

to the rail using misting nozzles and a watering programmer. The duration of misting and drying is adjusted according to the desired oxide thickness.

After each oxidation process, the thickness of the oxide layer was measured using a Fischer Deltascope FMP30 probe. This equipment operates on the principle of magnetic induction and is adapted to rough surfaces, with a precision of approximately $\pm 0.2\ \mu m$ for oxide thicknesses of up to $100\ \mu m$.

Figure 6: Appearance of the rail compared to its initial state after a salt spray oxidation protocol.

Figure 6 shows a preliminary oxidation performed on one rail using this system, resulting in severe oxidation, and creating a case with a heavily oxidized zone showcasing an extreme example of an abandoned track. The average oxide thickness, based on more than 30 measurements, is $57\ \mu m$ and a standard deviation of $17\ \mu m$. This oxide thickness exceeds what is typically observed on low-traffic tracks, where oxide thickness varies from 1 to 2 μm on the rail tread and 5 to 6 μm on the peripheral zone. For the first try, the oxide thickness was intentionally exaggerated since it was difficult to evaluate its influence. Consequently, we aimed at realizing severe rust conditions to ensure deshunting occurrences.

3 Experimental tests: Results and discussion

The tests presented in parts 3.1 to 3.3 were carried out under static conditions (no rolling) and in direct current, using a Keithley 2400 sourcemeter in 4-probe mode to inject current and measure contact resistance.

3.1 Dependence of the resistance on the applied force

This section focuses on the effect of applied force on the contact resistance. In Hertz's theory, the contact resistance as a function of force is predicted to follow a power-law behavior $R_c \sim F^{-\frac{1}{3}}$.

The contact resistance was evaluated with a constant DC current of 0.1 A. The applied load was progressively increased from 30 N to 430 N (maximum force as explained in section 2.2.2), then decreased to 30 N.

Initially the tests were conducted on three zones under normal conditions, in ambient air. In Figure 7, we present the $R_c - F$ characteristics obtained from one of these zones.

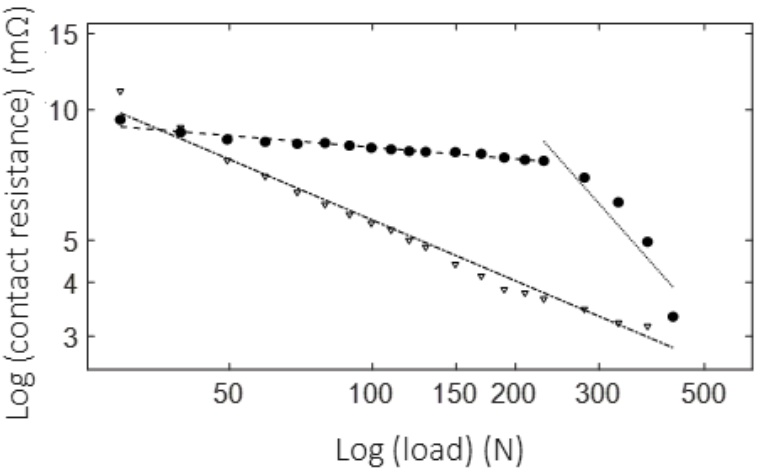


Figure 7: In air - $Log - log\ R_c - F$ characteristics at imposed DC current I=0.1 A when increasing the load (•) from 30 N to 430 N then decreasing it (▽) from 430N to 30N. (- -) shows $F^{-0,09}$ fit of the experimental resistance when increasing force from 30N to 230 N, (..) shows fit $F^{-1.24}$ when increasing force from 230 N to 430 N and (−.) shows fit $F^{-0,47}$ when decreasing force from 430 N to 30 N.

These force tests conducted in ambient air reveal unexpected contact resistance behaviours far from those predicted by Hertz. At lower forces (< 230 N), the resistance decreases very slowly, following a power-law $R_c \sim F^{-0.09}$. Beyond 230 N, the resistance exhibits a much more pronounced decrease, following a power-law $R_c \sim F^{-1.24}$ with an exponent greater than one. These observations may reflect the extreme difficulty of obtaining perfectly smooth, clean surfaces on both wheel and rail. Surface roughness, contamination and possible oxidation make it impossible to achieve ideal Hertz's conditions.

3.2 Dependence of the resistance on the applied current

The main objective of this experiment was to explore the impact of the applied current on contact resistance. To this end, contact resistance measurements were carried out on different areas of the rail under static conditions. Increasing and decreasing currents were applied, from 100 mA to 1 A and vice versa, with 100 mA steps every 60 seconds The evolution of the applied current intensity is shown in Figure 8. Contact voltage was measured every second.

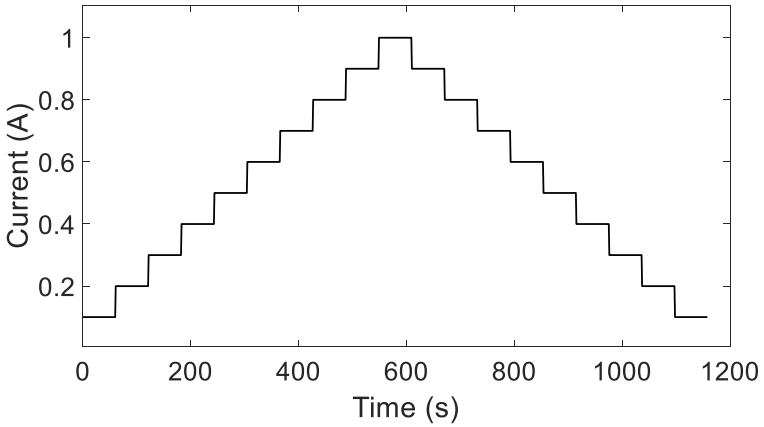


Figure 8: Current I (A) versus time t (s). The current was increased from 0.1 A to 1 A, then decreased from 1 A to 0.1 A by 0.1 A every 60 s.

These tests were conducted on both a clean and an oxidized contact area (oxide thickness=57 μm).

3.2.1. Clean contact: $R_c(I)$

For a clean contact, Figure 9 shows the variation of current and voltage over time. The corresponding *U-I* characteristic is shown in Figure 10. It presents a linear-ohmic and reversible behaviour. In this case, the increasing and decreasing *U-I* characteristics are perfectly superposable on each other. $R_c(I)$ was evaluated at 10 $m\Omega$ which is consistent with a contact on the bare metal.

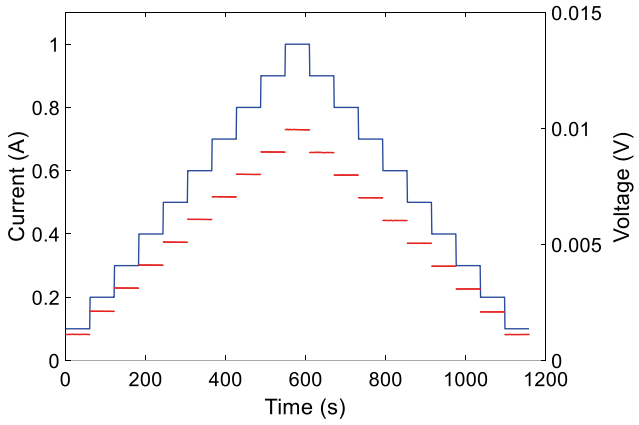


Figure 9: Evolution of the current intensity in the contact (–) and the contact voltage (–) over time for a clean contact between wheel and rail.

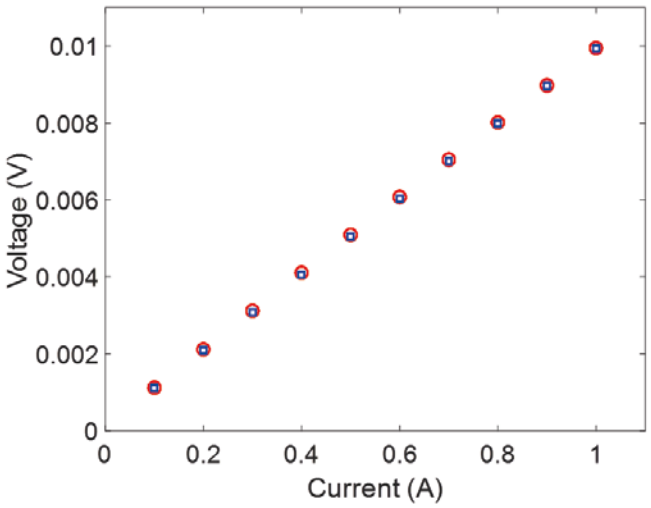


Figure 10: $U-I$ characteristics of a clean contact between wheel and rail when increasing the current I (O) from 0.1 A to 1 A, then decreasing I (□) from 0.1 A to 1 A, for F = 400 N

3.2.2 Oxidized contact: $R_c(I)$

Figure 11 shows the evolution of the current imposed on the contact (similar to the previous case) as a function of time, and the corresponding evolution of the contact voltage in the case of an oxidized surface. Figure 12 and Figure 13 show respectively the evolution of the contact resistance and the *U-I* characteristics during this experiment.

For an oxidized contact, the results reveal a very different behaviour compared to the one observed on the clean contact. Initially, as the current flows, a rapid evolution of the contact occurs, observed as sudden drops in contact resistance with steps of increasing current. This can be observed at the beginning of the curves in Figure 11 and Figure 12: up to 300 seconds and indicates a transition to a less insulating state. This behaviour could be the result of an improved contact due to the flattening of surface asperities under the effect of mechanical stress and the heating generated by the current. As the current continues to increase, the contact resistance gradually stabilizes, indicating a slower evolution of the contact, as shown in Figure 13 after current increase from 0.6 A to 1 A. As the current decreases, $U - I$ characteristics become more linear, and the resistance tends to stabilize at a lower level (approximately 9.8 mΩ) than its previous values. This behaviour is similar to that of a clean contact, as shown Figure 9 and Figure 10, where the voltage is proportional to the current. Overall, the results indicate progressive changes in contact resistance, underlining the influence of current on the electrical properties of an oxidized contact.

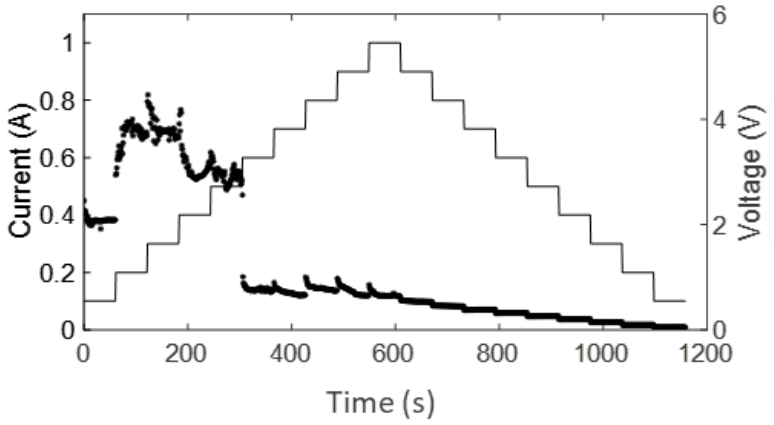


Figure 11: Evolution of the current intensity in the contact (∗ left axis) and the contact voltage (− right axis) over time for an oxidized contact.

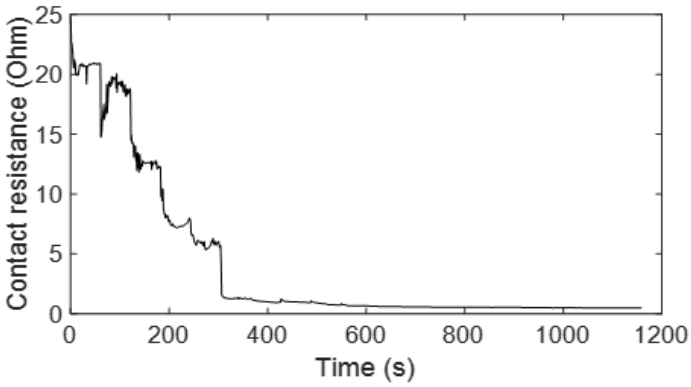


Figure 12: Evolution of the contact resistance over time for an oxidized contact, applying successive steps of increasing and then decreasing current.

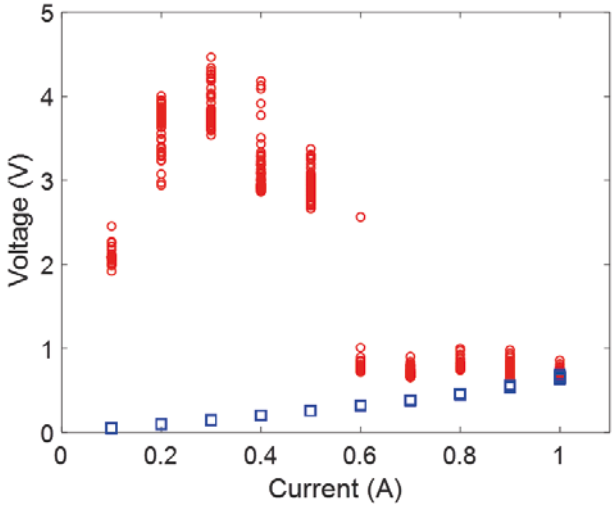


Figure 13: $U - I$ characteristics of an oxidized contact when increasing the current I (O) from 0.1 A to 1 A, then decreasing I (□) from 0.1 A to 1 A, for F = 400 N.

4 Conclusion

In this study we designed a scaled-down versatile bench for the study of the wheel-rail electrical contact at a laboratory scale that is able to mimic the wheel rail electrical contact of a train at the laboratory scale. Through a series of preliminary carefully controlled tests, measurements were focused on the influence of contact force, surface roughness, variations in load and oxidation state on the electrical contact. They demonstrated the bench's ability to reproduce phenomena observed on a full scale.

Literature

[1] Wybo J.L, "Track circuit reliability assessment for preventing railway accidents", Safety Science 1, December 2018. Volume 110, Part B, Pages 268-275

[2] S. Descartes et al., "Presence and role of the third body in a wheel–rail contact", 2005, Wear, 258, pp. 1081-1090

[3] Suzumura Ja et al. "In situ X-ray analytical study on the alteration process of iron oxide layers at the railhead surface while under railway traffic". Wear 18 may 2011. Vol. 271, n°1, p. 47 53.

[4] T. Nakahara et al., "Relationship between surface oxide layer and transient traction characteristics for two steel rollers under unlubricated and water lubricated conditions", 8th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems (CM2009), Firenze, Italia, September 15-18, 2009.

[5] S. Descartes *et al.*, "A new mechanical-electrical approach to the wheel-rail contact", Wear, vol. 265, pp. 1408-1416, 2008.

[6] M. Fukuda et al., "Study of quantifying and reducing electrical resistance between wheels and rails", QR of RTRI, vol. 49, n°3, pp. 158-162, 2008.

[7] H. Chollet et al., "Observation of Branly's effect during shunting experiments on scaled wheel-rail contacts", Proceedings of the 9th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems (CM2012), Chengdu, China, pp. 111-114, 2012.

[8] F. Houzé et al., "Electrical behaviour of the wheel-rail contact", Proceedings of the 26th Inernational Conference on Electrical Contacts (ICEC-ICREPEC2012), Beijing, China, pp. 67-72, 2012.

[9] Johnson.KL. Contact Mechanics: Cambridge University Press; 1985.

[10] M. Toumi., "Modélisation numérique du contact roue-rail pour l'étude des paramètres influençant les coefficients de Kalker : Application à la dynamique ferroviaire ", PhD Thesis, Université Paris-Est, 2016.

[11] Timsit R. "Electrical Contact Resistance: Properties of Stationary Interfaces", IEEE transactions on components and packaging technology, vol. 22, no. 1, March 1999.

[12] Creyssels M. et al., "Experiments and theory of the electrical conductivity of a compressed granular metal", *AIP Conference Proceedings* 1145, 123–126 ,2009.

[13] Nicodeme C., " Evaluation de l'adhérence au contact roue-rail par analyse d'images spectrales ", PhD Thesis, Université Paris sciences et lettres, 2018

Session 6
Jan Vrba

Reduction of wheel and rail wear by application of actuators in the primary suspension of an articulated tram

Vrba, Jan[1]

[1]Czech Technical University in Prague, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Automotive, Combustion Engine and Railway Engineering

Summary

The paper presents the concept of using active wheelset steering technology for modern articulated low-floor trams with non-pivoting bogies. The contribution also presents and discusses the results of MBS calculations simulating the travel of a vehicle equipped with active wheelset steering technology through individual curves and on a specific line within the Prague tram network under different boundary condition. In a comparison of passive and active wheelset guidance, a reduction in wear index of 73% on average was achieved. Moreover, this contribution presents a practical interpretation of the results obtained.

Keywords: actuator, active steering, bogie, tram, wear, rail-wheel contact, wheelset

1 Introduction

Routes for urban rolling stock, especially trams, usually run through city centres, where directional curves with very small radii (less than 25 metres) are often used for historical reasons. Curves with even smaller radii (around 15 meters) can often be found in depots. When a vehicle passes through such a sharp curve, the lateral clearance of the wheelsets in the track is exhausted and large slip forces are generated at the wheel-rail contact. These longitudinal and lateral forces lead to undesirable phenomena in the form of high wheel and rail wear and noise and vibration emissions. The wear of wheels and rails results in high costs for both the infrastructure manager and the vehicle operator, who has to arrange for repairing of the worn wheel profile and subsequent replacement of the

wheel tread. Wheel reprofiling, which has to be carried out regularly due to the wear of the wheel profile, and the replacement of the wheel tread are the largest maintenance costs for tram vehicles and thus contribute substantially to the service part of the life cycle cost (LCC).

Lines with curves of very small radii also limit the deployment of certain concepts of modern vehicles on these lines, especially articulated trams with non-pivoting bogies. However, articulated trams with non-pivoting bogies have many advantages over tram concepts with pivot bogies, such as lower cost, higher capacity or more spacious interior above the bogies. If their major disadvantage of higher wear of wheels and rails when passing through curves can be reduced, a reduction in tram transport costs and an increase in passenger comfort can be expected.

Improving the passage of trams and rolling stock in general through small radius directional curves has received a great deal of attention from researchers and vehicle designers around the world for many decades. Whereas in the past the focus was mainly on mechanical adjustments, nowadays attention is turning to actively controlled elements in the running gear of the rolling stock, which can be used to positively influence its interaction with the track.

In recent years, several interesting new technologies of the use of active elements to turn wheelsets into curves have been introduced. Of particular note is Liebherr's LiCAS system, which uses hydraulic actuators (also called an active silentblock) located in the joint between swinging arm guiding the wheelset and bogie frame to turn the wheelset into a curve [1, 2]. According to the available information, this system, and most other research in this area, is oriented towards conventional railways. Exceptions are, for example, the research on active wheelset steering of a tram by Hyundai Rotem or the Swiss start-up Traila [3] with its concept of an actively guided single-axle tram bogie. A detailed overview of the use of active elements in the running gear of a rolling stock can be found in [4].

However, in the author's opinion, the potential for applying active wheelset technology to modern tram vehicles is considerable due to the small radii of the directional curves, that the vehicles must frequently negotiate, and the design of a large number of trams with non-pivoting bogies. It can also be assumed that, given the major advances in technology towards autonomous operation of trams, such as anti-collision systems or digital twin of the vehicle, it will be possible to reduce the ongoing concerns about the safety, robustness or cost of an active wheelset steering technology.

2 Concept of operation

For the active steering of the tram wheelsets, a forward control of the actuators in the bogie is considered. The input variables of the actuator control algorithm are the radius of curve *R* and the vehicle speed. The turning of the wheelset into the curve is given by the actuator stroke *ΔL*, which is determined based on the curve radius according to formula (1), where *2b* denotes the wheelbase of the bogie and *2a* represents the lateral distance of the actuators steering the wheelset, see Figure 1.

$$\Delta L = \frac{a \cdot b}{R} \tag{1}$$

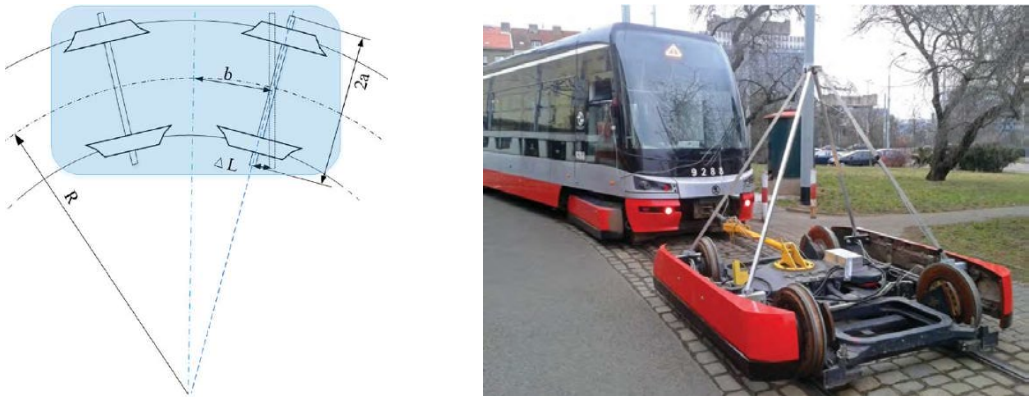


Figure 1 - Calculation of the actuator extension when passing through a curve [5] (left), creation of a digital map of the track [6] (right)

Vehicle speed is already measured with sufficient accuracy on today's vehicles. The radius of the curve is then obtained, based on the position of the vehicle on the track, from the track database, which is loaded on the vehicle control system. The track database contains information about the individual sections of the track driven and can be obtained, for example, by a special measuring device which is driven over the track, and the measured data is then processed in the database and uploaded to the vehicle. The digital track map is nowadays used in some tram operations, for example, for a flange lubrication, stop announcements or vehicle speed control. [6]

The radius of the curve is therefore obtained by locating the vehicle on the track. Determining the location of the vehicle on the track in an urban environment with sufficient accuracy can be problematic. However, it can be assumed that nowadays the technology has advanced sufficiently to achieve the necessary accuracy. For example, positioning based on high definition (HD) maps combined with global navigation satellite system GNSS and odometry can be used. These sources can then be combined through a Kalman filter to achieve higher accuracy and robustness of localisation. Another option may be the use of odometry and radio frequency identification (RFID) technology. [7]

Due to the safety risks and the risk of increased wear of wheels and rails in case of a wrong value of the input variable (radius of a curve) to the wheelset steering control algorithm, it is advisable to verify this variable from several independent sources. This approach has long been applied, for example, in the aerospace industry. For this reason, it seems appropriate that the radius of the upcoming curve is verified using sensors on the front of the vehicle (LiDAR, camera). The control system will be able to detect the rail tracks and calculate the radius of the curve from the data obtained from the front-mounted sensors. This technology is already available nowadays [8]. The radius of curve thus obtained will then be compared with the value in the track database and if the values do not match significantly, the wheelset will not be rotated and the vehicle will drive the section at a reduced speed with the actuators in the nominal position. It can be assumed that the aforementioned sensors on the front of the vehicle will be placed on the vehicle primarily for another purpose (e.g., anti-collision system) and thus will not increase the cost of the active steering system.

3 MBS calculations

To validate the proposed active wheelset steering concept, a model of an articulated tram with non-pivoting bogies with active steering of the wheelsets was created in MBS software Simpack and linked to the actuator control model in Matlab Simulink. These two programs thus transfer the necessary information to each other at each time step of the calculation. Information about the vehicle position on the track and the vehicle speed is passed from Simpack at each time step, and the actuator extension value is passed from Simulink back to Simpack. The principle of cosimulation is shown in Figure 2.

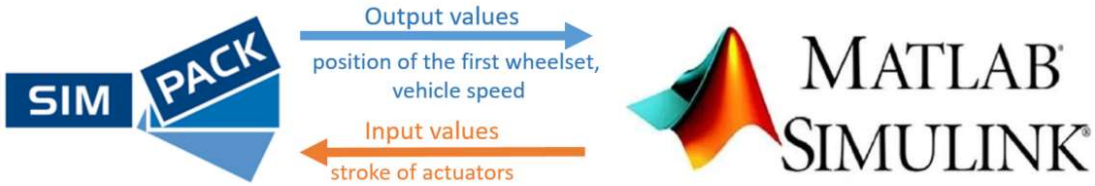


Figure 2 - The principle of cosimulation used for MBS calculations

The wear index defined by (2) was used to evaluate the effect of active wheelset steering.

$$\boldsymbol{W = T_x \cdot v_x + T_y \cdot v_y} \tag{2}$$

Where T_x is the longitudinal slip force, T_y is the transverse slip force, v_x is the longitudinal relative slip and v_y is the lateral relative slip. By integrating the wear index over the length of the track, the energy dissipated at the wheel - rail contact can be obtained.

3.1 Vehicle MBS model

For the development of the active steering system, a vehicle of the "multigelenk" concept was selected, i.e. a vehicle with five articles and three non-pivoting bogies. This tram concept is the most common for modern articulated low-floor trams in the world. This tram design also appears to be the most advantageous for the application of active steering technology, as the radial curve alignment of the wheelsets can significantly improve the problems of this vehicle when negotiating small radius curves, such as large transverse wheel-rail contact forces or noise and vibration emissions. On the other hand, the advantages of the vehicle, which are in particular high capacity, wider aisle over the bogies or lower cost compared to vehicles with pivot bogies will remain unchanged.

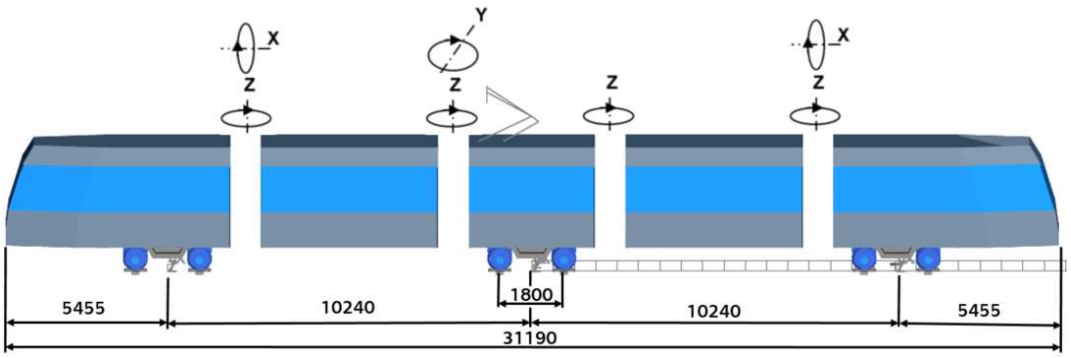


Figure 3 –MBS model of the vehicle

The basic tram parameters for the creation of the multi-body dynamics simulation (MBS) vehicle model are summarized in Table 1 and shown in the Figure 3. The tram parameters were determined on the basis of basic conceptual calculations, the author's experience and from publicly available sources [9].

The bogie is designed as non-pivoting, however, by using stops with progressive characteristic it is possible to rotate the bogie relative to the carbody by ± 2 deg. The wheelsets are guided by a swing arms. An actuator actively turning the wheelset into a curve is located in the joint connecting the swing arm to the bogie frame. This technical concept of an active silentblock for the active wheelset steering was introduced by Liebherr in its LiCAS and eCAS active steering systems for classic rolling stocks [1, 2]. Primary suspension is considered using rubber-metal springs. The basic suspension parameters of the individual parts of the bogie are summarized in Table 1.

Table 1 - Basic parameters of the MBS vehicle model

MBS vehicle model parameter	Value
Vehicle weight (ELE / EL4)	44,8 / 56,8 t
Vertical stiffness of the secondary suspension spring	500 N/mm
Lateral and longitudinal spring stiffness of the sec. sus.	300 N/mm
Lateral and longitudinal damping of secondary suspension	29 kNs/mm
Total torsional stiffness of the anti-roll bar	600 kNm/rad
Vertical spring stiffness of the primary suspension	2 200 N/mm
Longitudinal spring stiffness of the primary suspension	200 N/mm
Lateral spring stiffness of the primary suspension	60 N/mm
Longitudinal and vertical stiffness of the swing arm silentblock	25 kN/mm
Lateral stiffness of the swing arm silentblock	5 kN/mm
Torsional stiffness of the swing arm silent block	60 Nm/deg
Primary suspension spring damping	5000 Ns/m
Lateral damping of the primary suspension spring	300 Ns/mm
Longitudinal spring damping primary suspension	600 Ns/mm
Bogie wheelbase (*2b* according to Fig. 1)	1 800 mm
Lateral base of actuators (*2a* according to Fig. 1)	1 170 mm

The actuator extension speed is considered to be 7 mm/s according to [2]. Within the simulations presented in this paper the maximum stroke of the actuator was not limited. The actuator model has not been further developed for the simulations presented hereafter and will be improved in the next phases of the research.

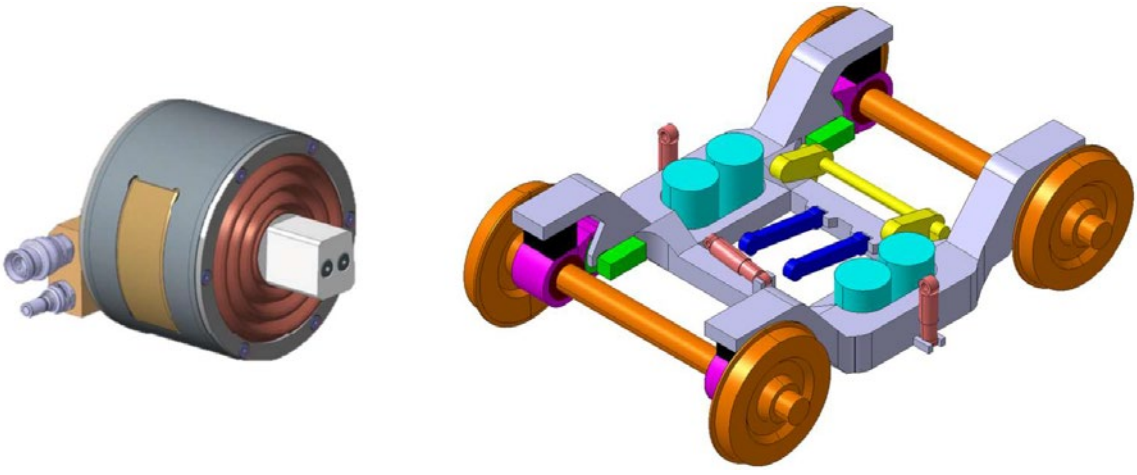


Figure 4 - Active silentblock Liebherr [2] (left), simplified bogie model for MBS calculations (right)

3.2 Track model

In order to achieve the most accurate tuning and setting of the algorithm controlling active elements in the tram running gear, a tram track was created for the dynamic simulations. The created track corresponds to the real tram track in its horizontal and vertical profile. As a suitable track for testing of the active wheelset steering technology, the Prague tramline Václavské náměstí – Národní divadlo - Újezd - Sídliště Řepy was chosen. The track layout is shown in Figure 5 and in Table 2. This line can be considered as a representative of a typical tramline that connects the periphery and the city centre and has a high traffic demand. The majority of the line is made up of straight sections or sections with large-radii curves, however, especially in the city centre there are curves with very small radii (R20). It is for such a line that the use of a vehicle of the chosen 'multigelenk' concept seems appropriate, if such a vehicle would be able to negotiate the small radius curves without increased wear on the wheels and rails. The horizontal and vertical profile of the line was created in Simpack software on the basis of track drawings obtained from the Prague City Transport Company (DPP). The length of the section transferred to Simpack is 10 641 m.

Table 2 - Horizontal profile of the line - distribution of curves and transitions

Line section	Number of sections	Total length of curves [m]	Total length of transitions [m]
R(20; 30⟩	4	103	0
R(30; 50⟩	9	67	30
R(50; 80⟩	4	183	53
R(80; 150⟩	8	318	188
R(150; 300⟩	12	798	363
R(300; 600⟩	13	798	363
R(600; 1000⟩	6	331	92
>R1000	12	590	11
Straight track	58	6 035 m	
Total length		10 641 m	

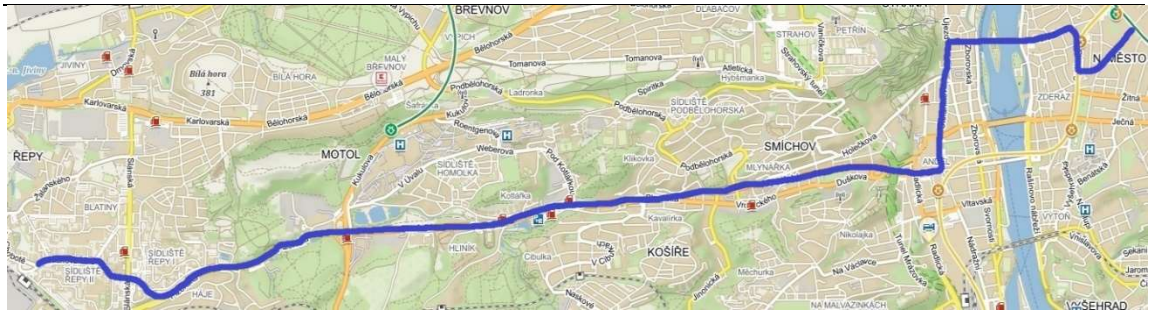


Figure 5 – Tramline Václavské náměstí – Sídliště Řepy used for MBS calculations (source: mapy.cz)

3.3 Boundary conditions of MBS calculations

Simulations of vehicle passage through the test track or individual curves were always performed multiple times with different boundary conditions, which make 8 different scenarios, to determine their effect on the reduction of wheel wear when comparing passive and active wheelset guidance. Thus, the simulation of the vehicle running through a given section was always performed 16 times in total. The vehicle was simulated travelling through the section under different combinations of boundary conditions for both passive and active wheelset guidance. The changed boundary conditions were:

- vehicle speed - simulated vehicle passage at a constant speed of 15 kph and then at a speed corresponding to uncompensated lateral acceleration of 1 m/s^2 or maximum vehicle speed of 70 kph,
- coefficient of friction in wheel-rail contact - limit values of 0.15 and 0.4 were used,
- vehicle loading - empty vehicle (ELE), operationally occupied vehicle considering 4 standing passengers per m^2 (EL4).

The simulations were performed with a grooved rail with profile NT1 and wheel profile corresponding to the profile used by DPP. Track irregularities have not been considered for calculations as well as the effect of the vehicle's drive.

4 Calculations results

4.1 Passage through individual curves

On the basis of the analysis of the horizontal profile conditions on the line Sídliště Řepy - Václavské náměstí described above, it was found that except for the curves that represent the turning of the line at junctions in the city centre and the curves with a large radius (over 500 m), all other curves are formed by a transition with an average length of 15 metres. No correlation was found between the length of the transition and the radius of the curve. On the basis of these findings, the benefits of active wheelset steering technology were investigated on a series of sections consisting of a straight track, a 15 metres long transition, a curve of length corresponding to a 90 degree change in direction of travel, a transition and a straight track, see Figure 7 left. The summary results comparing the wear index at wheel-rail contact for passive suspension and actively guided wheelsets under different boundary conditions are shown in the graph in Figure 6. Each column of the graph represents the sum of the wheel-rail contact wear index on the first vehicle bogie for the 8 simulations of curve passage under different boundary conditions described in Section 3.3.

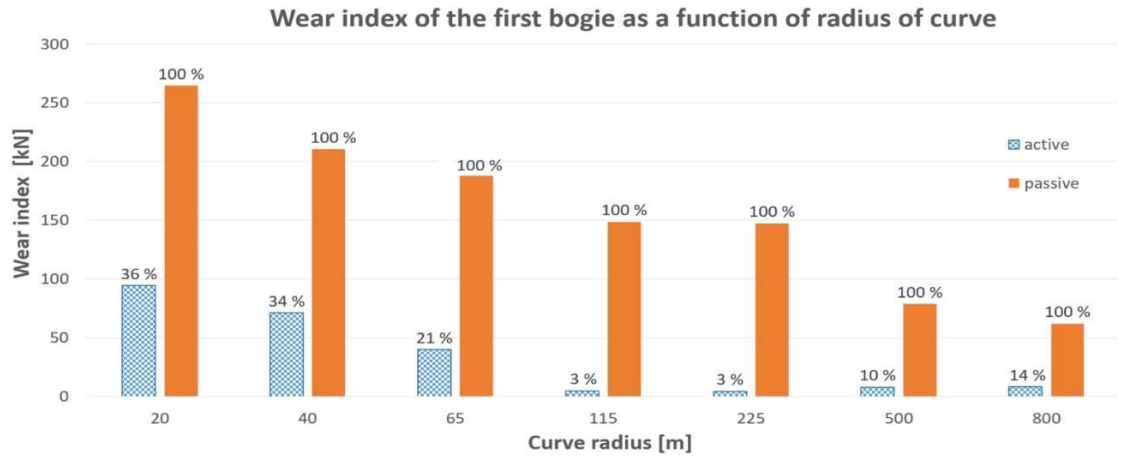


Figure 6 - Wear index at wheel-rail contacts on the first bogie under various boundary conditions

4.2 Turning at the junctions

Special attention was paid to the tram's passage through the curves at the junctions, which are composed of short sections (around 5 m) of the R50 curve with an inserted R20 curve (see Figure 7, right), and which have the greatest influence on wheel wear on the selected test track.

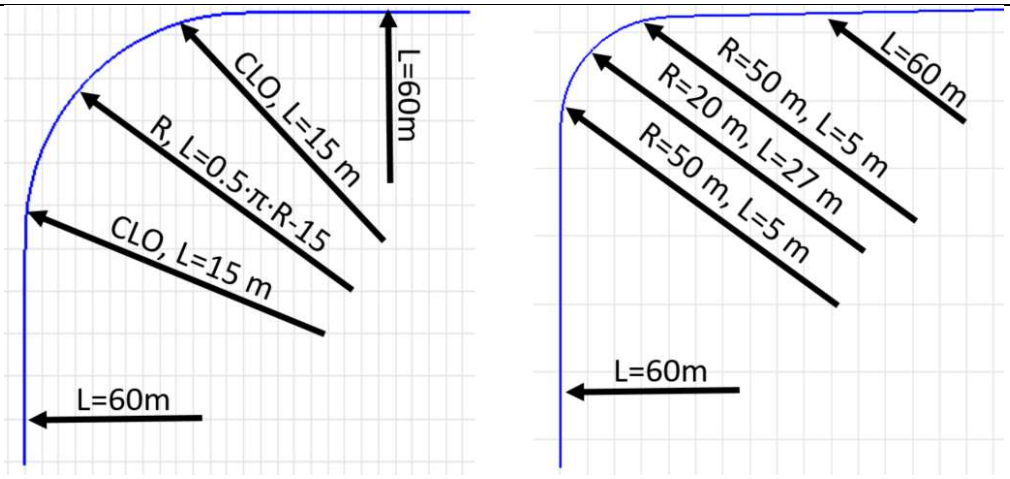


Figure 7 - Horizontal profile of individual curves (left), horizontal profile of a curve at the junctions (right)

Due to the relatively low actuator speed and the need for a large wheelset rotation to achieve a radial position on a small radius curve, the wheelset was tested already rotating before entering the curve and straightening the wheelset partially or completely after exiting the curve. If the wheelset is turned too much in a straight line, the lateral force in the wheel-rail contact and the wear index increase significantly, as well as if the wheelset comes out of the curve too much turned in a straight line. On the other hand, if the actuator starts to turn the wheelset as it enters the curve, the radial position of the wheelset is only achieved for a short moment and the actuator again starts to turn the wheelset back to the unturned position as it exits the curve. In order to determine the optimum point of rotation of the wheelset when entering and exiting the curve respectively, the parameters Φ_E and Φ_L were chosen. The parameter Φ_E represents the angle of rotation of the wheelset when entering the curve and Φ_L represents the angular difference between the rotation of the wheelset in the radial position and the rotation of the wheelset when entering the straight line. Thus, the start of rotation at the entrance to the curve and the exit from the curve in the unrotated position is represented by the values $\Phi_E = 0°$ and $\Phi_L = 1°$, while the entrance and exit to and from the curve in the radial position of the wheelset correspond to the angles $\Phi_E = 1°$ and $\Phi_L = 0°$. The angle values apply to the R50 curves at intersections described above.

Table 3 - Percentage reduction of dissipated energy in wheel-rail contact on the first bogie of the vehicle when passing through a R50-R20-R50 curve compared to passive wheelset guidance

ΦL [deg] \ ΦE [deg]	1.0	0.8	0.6	0.4	0.2	0
0	59.5	59.7	59.2	58.0	55.9	53.2
0.2	62.2	62.6	62.0	60.9	58.8	56.1
0.4	63.2	63.4	63.0	61.7	59.7	57.0
0.6	62.5	62.7	62.2	61.0	58.9	56.3
0.8	59.3	59.6	59.1	57.9	55.8	53.2
1.0	55.0	55.2	54.7	53.5	51.6	48.9

The vehicle speed was set to 15 kph, which corresponds to the maximum allowed speed in the Prague tram network for curves with very small radii. The coefficient of friction between the wheel and the rail was set to 0.4 and the simulations were performed with the loaded vehicle. Table 3 then presents the percentage reduction of dissipated energy in wheel - rail contact on the first vehicle bogie compared to the passive suspension vehicle passage depending on the values of Φ_E and Φ_L. As can be seen from the table, the best results were obtained for the values of angles Φ_E =0.8°, Φ_L =0.4°. At these angles, the best results were achieved for both wheelsets of the bogie, with a 72.8 % reduction in dissipated energy for the first wheelset and a 51 % reduction for the second wheelset. For further simulations of the vehicle running through the whole track described in chapter 3.2, the wheelset steering algorithm was set to steer the wheelset to these parameters when negotiating these sharpest curves before entering and when exiting the curve.

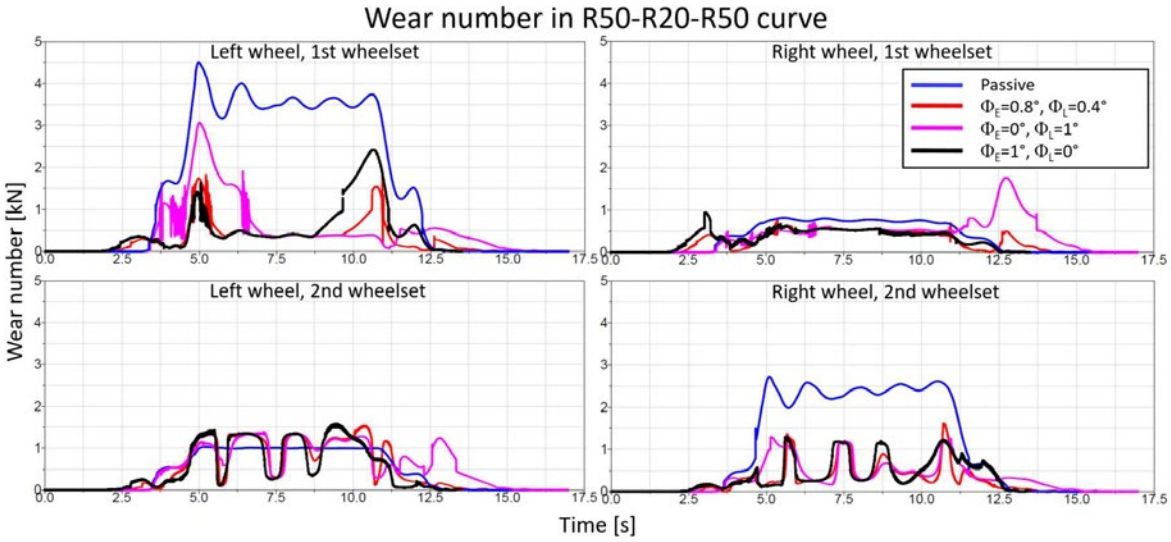


Figure 8 - Time course of the wear index on the wheels of the first bogie when passing through the R50-R20-R50 curve at different active steering settings

Moreover, it can also be concluded from the values in Table 3 that even if the position of the vehicle is inaccurately determined and therefore the actuators start to turn or straighten wheelsets earlier or later than the optimum moment, there is no significant decrease in the benefit of active steering to wheel wear. The selected step of 0.2 degree for the steering angles of the wheelsets in Table 3**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** corresponds to approximately 1.25 metres of vehicle travel at the selected vehicle speed and speed of actuator extension. A more detailed investigation of the effect of vehicle positioning accuracy on track positioning will be carried out in future phases of the research, however, these results already suggest that even at the values of positioning error achievable with conventional positioning methods, the benefit in terms of reducing wheel wear will still be significant.

The extension of the Liebherr's active silentblock ΔL is about ±15mm [2], which allows according (2) radial alignment of the wheelset to a curve with minimum radius 35 metres. For curves with a smaller radius, a larger actuator stroke is required. For the R20, the actuator stroke is 26.3 mm to allow radial alignment of the wheelset in the track. Figure 9 shows a comparison of the wear index when passing through the R50-R20-R50 curve described above with passive steering of the wheelset and for an active steering with maximum actuator extension of 15 mm and for steering the wheelset to the radial position. For further simulations, the actuator extension limitation was not used.

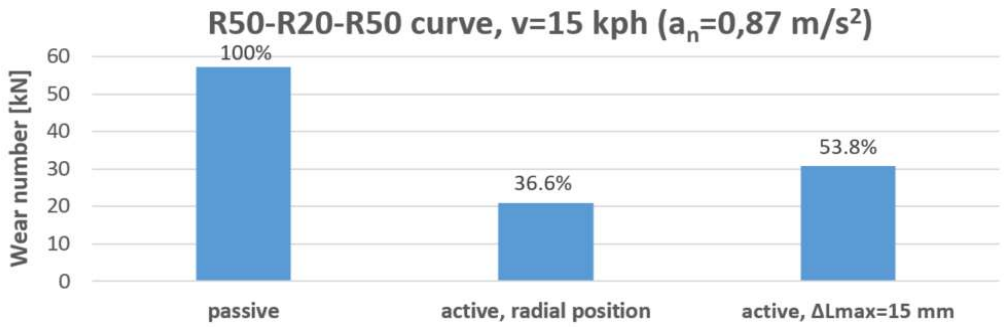


Figure 9 - Wear index of the first bogie as a function of actuator extension in R50-R20-R50 curve, speed 15 kph

4.3 Passage through the whole line

After analysing the passage through the individual curves and optimising the passage through the turnings at the junctions, simulations of the passage of the vehicle along the entire line Václavské námáměstí - Sídliště Řepy described above were carried out. The results obtained in the form of the wear index and dissipated energy in the contact between the wheels and the rail for all wheels of the vehicle are shown in Table 4.

Table 4 - Wear index on all wheels of the vehicle when simulating the passage of the test track under different boundary conditions

Wheelset guidance	Speed [kph]	Loading	Friction coeficient	Wear index [N]	Reduction of wear index [%]	Disipated energy [J]	Reduction of disipated energy [%]
passive	max	EL4	0.4	1 124 368		7 460 732	
passive	max	EL4	0.15	342 539		2 517 519	
passive	max	ELE	0.4	886 817		5 922 422	
passive	max	ELE	0.15	266 268		1 937 006	
passive	15	EL4	0.4	1 512 409		6 301 704	
passive	15	EL4	0.15	617 168		2 571 533	
passive	15	ELE	0.4	1 525 949		6 358 121	
passive	15	ELE	0.15	496 158		2 067 325	
active	max	EL4	0.4	338 534	70	1 601 659	79
active	max	EL4	0.15	141 621	59	1 055 892	58
active	max	ELE	0.4	270 397	70	1 055 203	82
active	max	ELE	0.15	111 156	58	812 322	58
active	15	EL4	0.4	381 586	75	1 589 942	75
active	15	EL4	0.15	167 917	73	699 654	73
active	15	ELE	0.4	304 153	80	1 267 304	80
active	15	ELE	0.15	134 726	73	561 358	73
passive wheelset guidance in total				6 771 676		35 136 362	
active wheelset guidance in total				1 850 090	73	8 643 334	75

From the obtained values it is evident that according to the assumptions the greatest reduction of the wear index and therefore also the wear of wheels and rails occurs at high coefficient of friction. A more significant percentage reduction was achieved when running at a constant speed of 15 km/h, which can be explained mainly by sufficient time for the actuators to rotate wheelsets into each curve as well as a longer time of passing through the curves and therefore a longer action of lateral and longitudinal slip forces in the wheel - rail contact. Even for boundary conditions at the other end of the operating spectrum, the technology has brought significant benefits. On average, the wear index on all wheels of the tram was reduced by 73 % and dissipated energy in rail-wheel contact by 75 % when running with active wheelset steering compared to running with conventional suspension.

4.4 Practical view of the results achieved

During the operation of rolling stock, the running surfaces of the wheels are worn and it is necessary to reprofile them. During wheel reprofiling, material is removed and the

wheel diameter is reduced. When the minimum wheel diameter limit is reached, the wheel or just the wheel tread is replaced. Wheel tread lifetime is highly dependent on the concept and design of the vehicle or the city in which the vehicles are operated. According to the available information [10] current vehicles with non-pivoting bogies are capable of covering around 270,000 kilometres before the wheel treads need to be replaced. [10] summarises the mileage in 6 different cities of vehicles with independently rotating wheels, however, based on the author's experience, these values are very similar for vehicles with classic wheelsets.

Wheel wear is influenced by other factors besides passing through curves, such as running on the flange, running over switches, sanding etc., so it cannot be assumed that the achieved wear index reduction values represent an increase in service intervals or mileage to wheel tread replacement. [1] states that a 50 % reduction in dissipated energy in wheel-rail contact leads to an increase in service intervals of approximately 30 %. Using this correlation, an achieved 75 % reduction in dissipated energy will result in a roughly 45 % increase in service intervals and vehicle mileage on same wheel treads. Considering this value of mileage increase, the vehicles would be able to travel around 390 thousand kilometres on one wheel tread.

Given the assumed annual target mileage of 70 thousand kilometres and a vehicle lifetime of 30 years, it can be assumed that the treads will be replaced eight times over the lifetime of the vehicle. With active wheelset steering the treads will be replaced only five times over the lifetime of the vehicle. If we consider a vehicle with three bogies, a total of 36 wheel treads and their replacement costs will be saved. Wheel treads change involves removing the bogies from the vehicle and removing the wheelsets from the bogie. This results in a long shutdown of the vehicle and the cost of this service is not negligible. Another significant saving will be the extended intervals between wheel profile renewal. Further savings are represented by a reduction in track maintenance costs.

Another major benefit is the saving of traction energy. Based on the average reduction in the value of dissipated energy and the assumptions about the annual mileage 70 thousand kilometres, there is a saving of 6 MWh of traction energy per year.

On the other hand, a slight increase in service costs for the maintenance of the actuators can be expected and it is also necessary to consider the energy consumption of the actuators. However, it can be assumed that these factors can only be quantified more accurately after the deployment of active wheelset steering technology in normal operation.

5 Conclusion

This paper presents research into the benefits of applying actively controlled elements to the bogie of a low-floor articulated tram for the purpose of active wheelset steering. Sufficient robustness of the proposed system is aided by the fact that only variables that can be safely measured with sufficient accuracy and without increasing the cost of the vehicle's sensor equipment are input to the active element control algorithm. It is then proposed to retrieve the variable influencing the steering of the wheelset, i.e. the radius of the curve, from the track database and to verify its value using the sensors at the front of the vehicle. The concept of an active silentblock inspired by Liebherr's solution for heavy rail vehicles was used for the active wheelset steering. In the author's opinion, it is realistic to build this kind of actuator into a space-constrained structure such as the current low-floor tram bogie.

The presented system was applied to a model of an articulated tram of the "multigelenk" concept and the passage of the vehicle with active and passive suspension through individual curves and along the line Václavské námětí - Sídliště Řepy was simulated. Comparison of active and passive wheelset guidance achieved very good results under different boundary conditions of the calculation. For individual curves, a reduction of the wear index in the range of 67 - 97 % was achieved depending on the curve radius. When simulating the vehicle running the entire track section under different boundary conditions, the wear index in wheel-rail contact was reduced by an average of 73 % compared to a vehicle with conventional suspension.

The active steering model itself and its control will be further refined and improved, but the presented results clearly show that the active steering technology is very suitable for modern articulated trams and can contribute to the further development of tram transport. The main benefits of the technology are the reduction of wear and tear on wheels and rails, which will bring significant savings to transport companies and thus have a major impact on the life cycle costs of the vehicle. Other major benefits are the savings in traction energy or the reduction in noise and vibration emissions when passing through curves. The possibility of further expanding the number of vehicles with non-pivoting bogies, which are cheaper, higher capacity and more comfortable for passengers in terms of vehicle interior, can be seen as additional benefits.

Further research will be focused mainly on refinement of the actuator model, research of the influence and operational safety risks of inaccurate vehicle localization and testing of the proposed control algorithm on an experimental roller rig [11] in the laboratories of the Faculty of Mechanical Engineering, CTU in Prague.

Acknowledgment

This work was supported by the Grant Agency of the Czech Technical University in Prague, grant No. SGS23/161/OHK2/3T/12.

Literature

[1] LiCAS passes test successfully [online]. Avaliable from: https://www.liebherr.com/en/can/latest-news/news-press-releases/detail/licas-passes-test-successfully.html.

[2] Electrohydraulic Controlled Axle Steering (eCAS) [online]. Avaliable from: https://www.liebherr.com/shared/media/aerospace-and-transportation/transportation/downloads/products/liebherr-electrohydraulic-controlled-axle-steering-ecas.pdf

[3] Traila [online]. [cit. 2023-06-21]. Avaliable from: https://www.traila.ch/en/

[4] VRBA, J. and KOLÁŘ, J.. Možnosti aplikace aktivních prvků v kolejových vozidlech. Nová železniční technika. 2022, 2022(4), 24-32. ISSN 1210-3942.

[5] FU, Bin a Stefano BRUNI. Fault-tolerant design and evaluation for a railway bogie active steering system. Vehicle System Dynamics [online]. 2022, 60(3), 810-834. doi:10.1080/00423114.2020.1838563

[6] HORŇÁK, R. EMA umí mazat či omezit rychlost. DP Kontakt. 2018(1), 12-14.

[7] KUUTTI, Sampo, Saber FALLAH, Konstantinos KATSAROS, Mehrdad DIANATI, Francis MCCULLOUGH a Alexandros MOUZAKITIS. A Survey of the State-of-the-Art Localization Techniques and Their Potentials for Autonomous Vehicle Applications. IEEE Internet of Things Journal [online]. 2018, 5(2), 829-846. ISSN 2327-4662.

[8] RISTIĆ-DURRANT, Danijela, Marten FRANKE a Kai MICHELS. A Review of Vision-Based On-Board Obstacle Detection and Distance Estimation in Railways. Sensors [online]. 2021, 21(10) [cit. 2023-06-21]. ISSN 1424-8220. doi:10.3390/s21103452

[9] ČIHÁK, Stanislav. Optimalizace parametrů článkové nízkopodlažní tramvaje. Praha, 2022. Diplomová práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Jan Kalivoda.

[10] MAYER, Arnd. Wheel sets or independently rotating wheels – from theory to practice [online]. 12 [cit. 2023-04-17]. Avaliable from: https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:2dbbe04aeb88674e9b6c332c43d452456b59019e/wheel-sets-independent-en.pdf

[11] KALIVODA, Jan, Petr BAUER a Zdeněk NOVÁK. Assessment of Active Wheelset Steering System Using Computer Simulations and Roller Rig Tests. *Applied Sciences* [online]. 2021, **11**(24) [cit. 2023-07-14]. ISSN 2076-3417. doi:10.3390/app112411727

Authors

Vrba, Jan

PhD. student of faculty of Mechanical Engineering at CTU in Prague, Czech Republic. His research focuses on reducing wheel and rail wear by applying actively controlled elements to the tram bogie. Contact: vrba@fs.cvut.cz

IRSA 2023

SESSION 7

RAD SCHIENE II

WHEEL RAIL II

Session 7
Dani Bechev, Erik Uhlein, Jannik Mayer, Pascal Vogel, Roland Weinhart

Untersuchungen des Reibwertverhaltens im Rad-Schiene-Kontakt beim Einsatz von Schienenkopfkonditionierungsmitteln

Bechev, Dani[1], Uhlein, Erik[1], Mayer Jannik[1], Vogel, Pascal[1], Weinhart, Roland[1]

[1]Lubricant Consult GmbH (LUBCON)

Zusammenfassung

Die Bahntechnik hat sich in den letzten Jahrzehnten rasant weiterentwickelt. Die Auswahl des richtigen Schmierstoffs ist hierbei von zentraler Bedeutung, um die Effizienz im Schienenverkehr zu steigern. Eine große Anzahl von Komponenten in der Bahntechnik erfordert Schmierung, um die Reibung und den Verschleiß dieser beweglichen Teile zu optimieren und ihre Lebensdauer zu erhöhen. Hierbei stellt die geeignete Konditionierung und Schmiertechnik des Rad-Schiene-Kontakts die Königsdisziplin in der Tribologie dar. Die Herausforderung für diese spezielle Art von Schmierstoffen, den sogenannten Friction Modifiern (FM), liegt in der Optimierung von Reibung und Verschleiß, sowie der Geräuschreduktion bei gleichzeitiger Gewährleistung eines konstanten Reibungskoeffizienten, um das Anfahren und das Abbremsen der Züge zu ermöglichen. Dieser Konflikt zwischen Reibungs- und Verschließminimierung auf der einen Seite und der Bremsleistung auf der anderen Seite wird durch Umwelteinflüsse wie Temperatur, Feuchtigkeit, Regen, Schnee, Eis, Laub und Verschmutzungen verstärkt. Technisch und wissenschaftlich sind noch nicht alle Aspekte zum Thema Schienenkopfkonditionierung abschließend geklärt. Eine große Problematik stellt vor allem das Fehlen einheitlicher Standards und Prüfbedingungen zur Charakterisierung der Eigenschaften von Schienenkopfkonditionierungsmitteln dar. So hat z. B. die Menge als auch das Auftragen des FM einen erheblichen Einfluss auf die Messung, was zu erheblichen Fehlinterpretationen der Ergebnisse führen kann, falls nicht alle Parameter bekannt sind.

Die Lubricant Consult GmbH (LUBCON) besitzt als Hersteller von Spezial- und Hochleistungsschmierstoffen eine langjährige Erfahrung und Expertise im Bereich der

Entwicklung von Schienenkopfkonditionierungsmitteln. Das entwickelte Konzept sieht dabei vor, aufgestellte Hypothesen zunächst durch Simulationen, Berechnungen sowie Labortests zu prüfen und die gewonnenen Erkenntnisse schließlich in Feldversuchen zu bestätigen.

In diesem Beitrag werden Ergebnisse aus Reibwertuntersuchungen im Linienkontakt an einem Zweischeibenprüfstand präsentiert und diskutiert. Hierbei werden unterschiedliche Prüfbedingungen simuliert, wobei die empirische Bestimmung von unterschiedlichen Zwischenstoffen (Schmierstoff, Wasser, Laub etc.) im Fokus steht. So werden im Folgenden die Messergebnisse von trockenen und geschmierten als auch mit Wasser benetzten Scheiben präsentiert. Weiterhin wird anhand des beschriebenen Prüfstandes der Einfluss von Laub, welcher stark reibungsmindernde Eigenschaften aufweist, dargestellt und diskutiert. Um die Vorteile und die Nachteile von verschiedenen Kopfkonditionierungsmitteln darzustellen, werden Ergebnisse aus den Reibwertmessungen miteinander verglichen.

Die im Zuge unserer Messungen generierten Daten zeigen, dass durch den Einsatz von Schienenkopfkonditionierungsmitteln eine Stabilisierung der Reibwerte deutlich zu beobachten ist. Aus diesem Grund ist die Auswahl des richtigen Friction Modifier unerlässlich für einen optimalen und sicheren Schienenverkehr.

Keywords: Schienenkopfkonditionierungsmittel, Friction modifier, COF, Reibung

1 Einleitung

Die Tendenzen im Eisenbahnpassagierverkehr und im Eisenbahngüterverkehr zeigen eine rasante Entwicklung und Steigerung der Anzahl der Passagiere, als auch der Züge in den letzten Jahren. Parallel zu dieser Entwicklung ist das Bewusstsein für Sicherheits- und Umweltaspekte stark gewachsen. Darüber hinaus spielen wirtschaftliche Faktoren eine zunehmend wichtige Rolle in der Branche, wodurch der Druck auf einen störungsfreien und effizienten Betrieb weiter steigt. Der Verkehr soll problemlos und ohne Ausfälle funktionieren. [1]

Dabei spielt der Reibwert zwischen Rad und Schiene eine entscheidende Rolle. Die Reibung und der Verschleiß sollen nach Möglichkeit minimiert werden. Dabei sollen die Reibwerte nicht unter 0,15 sinken, ansonsten könnte es zu Brems- und Traktionsprobleme kommen. Ebenso sollte der Reibungskoeffizient nicht über 0,4 oder 0,5 steigen, um übermäßigen Verschleiß zu vermeiden. Allgemein kann der Reibungskoeffizient zwischen Rad und Schiene von einer Reihe von Faktoren beeinflusst werden, wie etwa Verunreinigungen auf der Schiene und Witterungsbedingungen wie Regen, Laub, Staub,

Schnee oder Eis. Trotz dieser schwankenden Bedingungen ist es von zentraler Bedeutung, stabile und optimale Betriebsverhältnisse zu gewährleisten. [1], [2]

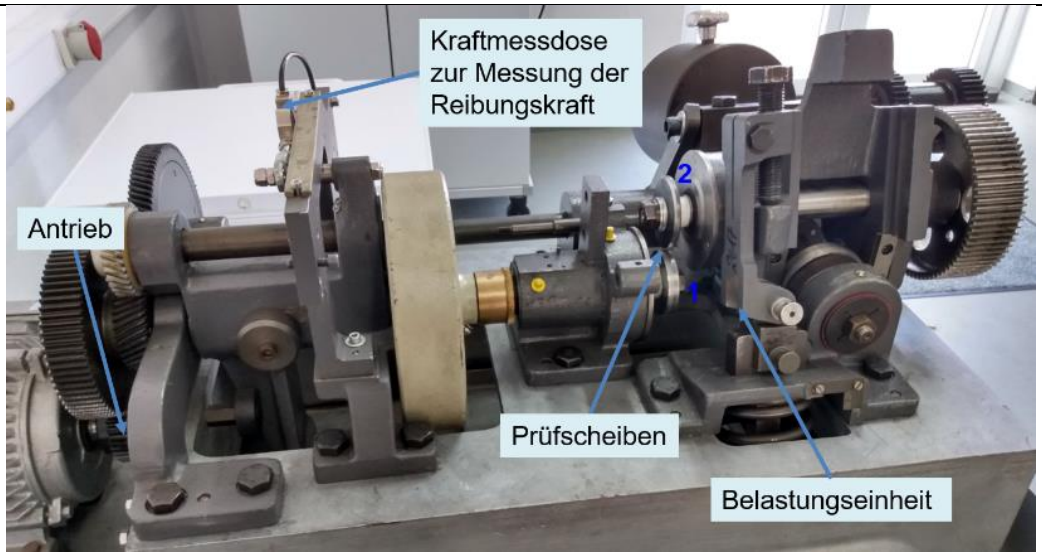
Durch das Aufbringen von Schienenkopfkonditionierungsmitteln, auch Friction Modifier (FM) genannt, sollen mehrere Wirkungen erzielt werden. An erster Stelle soll durch FMs der Reibungskoeffizient stabil im Bereich von 0,15 und 0,5 gehalten werden. Dadurch soll Verschleiß reduziert werden und die Bremswirkung erhalten bleiben. Darüber hinaus können FM dazu beitragen, die Geräuschentwicklung zwischen Rad und Schiene stark zu minimieren. [2], [3]

Um die Effektivität eines FM zu bewerten, können sowohl Laborversuche als auch reale Tests auf Schienen durchgeführt werden. Die Versuche im Labor werden oft auf Tribometer durchgeführt, bei denen der Reibwert zwischen zwei Prüfkörpern bestimmt wird. Mit realen Streckentests hingegen können Bremswege, -verhalten, -verzögerungen, das Anfahrverhalten, sowie die Beschleunigungen analysiert werden.

Im Rahmen dieser Veröffentlichung werden Ergebnisse aus Laboruntersuchungen von Schienenkopfkonditionierungsmitteln an einem Zweischeibenprüfstand präsentiert und diskutiert.

2 Verwendete Prüftechnik und Prüfkörper

Zur Durchführung der Experimente wurde ein modernisierter Zweischeibenprüfstand „Amsler 135“ verwendet. Der Prüfstand ist in Abbildung 1 dargestellt. Mit Hilfe eines Antriebsmotors werden zwei Prüfscheiben angetrieben und in Rotation versetzt. Die Scheiben können in die gleiche Richtung oder in entgegengesetzte Richtung zueinander rotieren. Innerhalb der Belastungseinheit des Prüfstands befindet sich eine Vorspannfeder. Diese Feder erzeugt eine mechanische Belastung an der Kontaktstelle zwischen den beiden Prüfscheiben. Mit Hilfe einer Kraftmessdose wird die Vorspannkraft der Belastungsfeder gemessen. Aus dieser Messung lässt sich die Hertz'sche Pressung, d.h. die Kontaktpressung zwischen den beiden Scheiben, berechnen. Zur weiteren Charakterisierung der Interaktion zwischen den beiden Scheiben wird eine zweite Kraftmessdose eingesetzt, um die während der Rotation entstehende Reibkraft zu erfassen. Nach der Messung der Reibkraft wird das Reibmoment berechnet. Aus dem Reibmoment lässt sich der Reibungskoeffizient (COF, Coefficient of Friction) bestimmen.



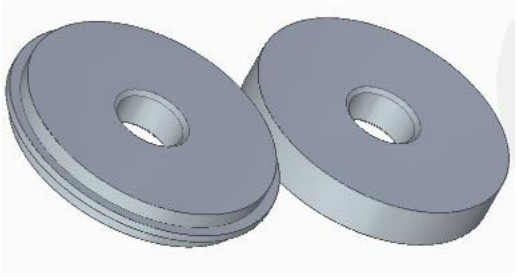


Abbildung 1: Zweischeiben-Prüfstand (oben) und Prüfscheiben (unten)

Zur Durchführung der Untersuchungen werden zylindrische Prüfscheiben verwendet. Die technischen Daten der Scheiben sind aus Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1: Technische Daten der Prüfscheiben

Parameter	Wert
Form der Prüfscheiben:	Zylindrisch
Art des Kontaktes:	Linienkontakt
Durchmesser Scheibe 1:	60,5 mm
Durchmesser Scheibe 2:	65 mm
Kontaktbreite:	4 mm
Oberflächenbeschaffenheit R_a:	6 µm
Werkstoff:	C45

3 Prüfablauf und Prüfbedingungen

Vor dem Beginn jedes Experiments werden die Prüfscheiben einer gründlichen Reinigungsprozedur unterzogen und anschließend präzise gewogen, um deren Ausgangsmasse zu bestimmen. Im Anschluss werden die Prüfscheiben sorgfältig auf dem Prüfstand montiert.

Die spezifischen Parameter und Bedingungen, unter denen die Experimente durchgeführt werden, sind in Tabelle 2 detailliert aufgeführt. Alle Versuchsreihen werden stets mit trockenen, also nicht geschmierten, Prüfscheiben initiiert. Diese Vorgehensweise stellt sicher, dass die Ausgangsbedingungen für jeden Versuch konsistent sind und somit valide und vergleichbare Ergebnisse generiert werden können.

Tabelle 2: Prüfbedingungen

Parameter	Wert
Kraft:	2 kN
Hertz'sche Pressung:	1,5 GPa
Drehzahl:	70 rpm
Temperatur:	Raumtemperatur 20-25 °C
Schlupf:	2 %
Menge des Frictionmodifiers	0,002 g bei Ø60,5
Masse von 1 Tropfen Wasser	0,042 g

4 Ausgewählte Ergebnisse

Um eine umfassende Untersuchung der Einflussparameter auf den Reibungskoeffizienten durchzuführen, werden zunächst grundlegende Messergebnisse von trockenen Prüfscheiben, die nicht mit Friction Modifiers (FM) behandelt wurden, vorgestellt. Durch die Analyse dieses Ausgangszustandes, der den unmodifizierten tribologischen Kontakt repräsentiert, soll ein fundiertes Verständnis für das Basisverhalten des Systems entwickelt werden. In Abbildung 2 sind die Ergebnisse aus den einführenden Messungen dargestellt. Beim Start des Versuches, mit trockenen Prüfscheiben, gibt zunächst keinen Kontakt zwischen den beiden Prüfscheiben. Nachdem die Kraft langsam aufgebracht ist, steigt der Reibungskoeffizient bis ca. 0,85. Nachdem sich ein stabiler Wert eingestellt

hat, wird ein Tropfen Wasser dem tribologischen System hinzugegeben. Beobachtbar ist daraufhin ein deutlicher Abfall des Reibungskoeffizienten, welcher sich in einem Bereich zwischen 0,2 und 0,4 einstellt. Durch die Charakterisierung des trockenen, ungeschmierten Kontakts werden hohe Reibwerte identifiziert, die sukzessiv zu erhöhtem Verschleiß führen werden. Durch die Zugabe von Wasser werden die Reibwerte reduziert. Nach bestimmter Zeit ist das Wasser aus dem Schmierspalt verdrängt und der Reibwert steigt wieder rasant auf den Maximalwert von ca. 0,85.

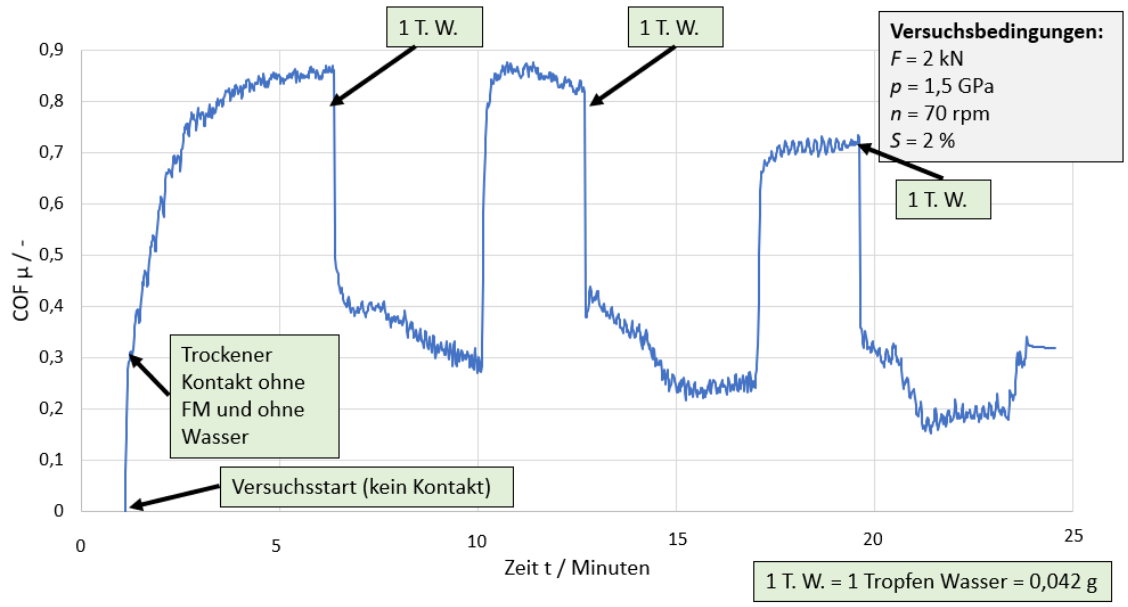


Abbildung 2: Untersuchung des Reibverhalten von trockenen und mit Wasser benetzten Prüfscheiben ohne FM

Bei weiteren Untersuchungen wird der Effekt des FM untersucht. Es ist zu beachten, dass ein einzelner Tropfen Wasser in diesem Messsetup ca. 0,042 g wiegt. Das ist ca. 21-mal höher, als die Menge an FM, die benötigt wird, um stabile Reibwerte zu erzeugen.

In Abbildung 3 sind die Ergebnisse aus einem Versuch dargestellt, bei dem die Prüfscheiben zuerst mit dem FM benetzt wurden. Der Reibwert liegt nach dem Auftragen des FM bei ca. 0,3. Jede Minute wird ein Tropfen Wasser auf die Scheiben getropft. Nach ca. 7 Minuten (d.h. nach 7 Tropfen Wasser) ist zu beobachten, dass die Wirkung des FM nachlässt und dass eine Nachschmierung des Kontaktes notwendig wird. Auffällig ist, dass der Reibungskoeffizient (COF) selbst bei der Zugabe von Wasser auf die mit FM behandelte Oberfläche der Prüfscheibe nicht unter 0,16 fällt. Diese Beobachtung ist von

erheblicher Bedeutung, da ein Mindestreibwert von 0,15 zur Gewährleistung einer effektiven Bremsleistung entscheidend ist.

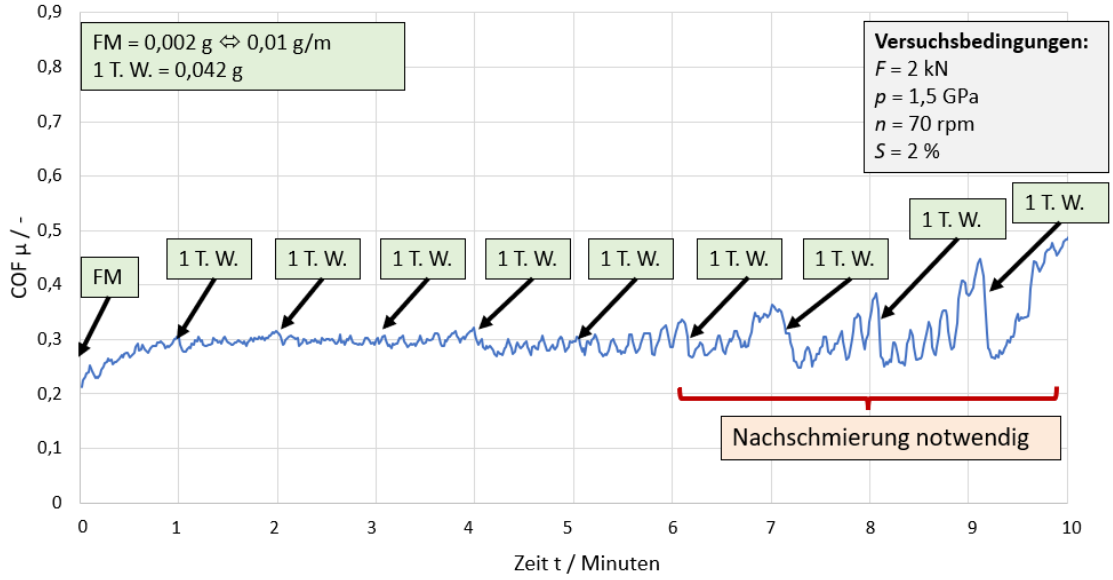


Abbildung 3: Untersuchung des Reibungskoeffizienten von Prüfscheiben, benetzt mit FM bei tropfendem Wasser (Regensimulation)

In dem vorliegenden Experiment, welches in Abbildung 4 dargestellt wird, wurde der Versuch von einem trockenen Zustand der Prüfscheiben ausgehend gestartet. Nach ungefähr 3 Minuten wurde kontinuierlich Wasser während des laufenden Versuches hinzugefügt. Nachdem die Scheiben vollständig benetzt worden sind, wurde der FM aufgetragen. Es ist zu beobachten, dass der Reibwert zu Beginn bei ca. 0,18 liegt und erreicht gegen Ende des Versuchs einen Wert von etwa 0,22.

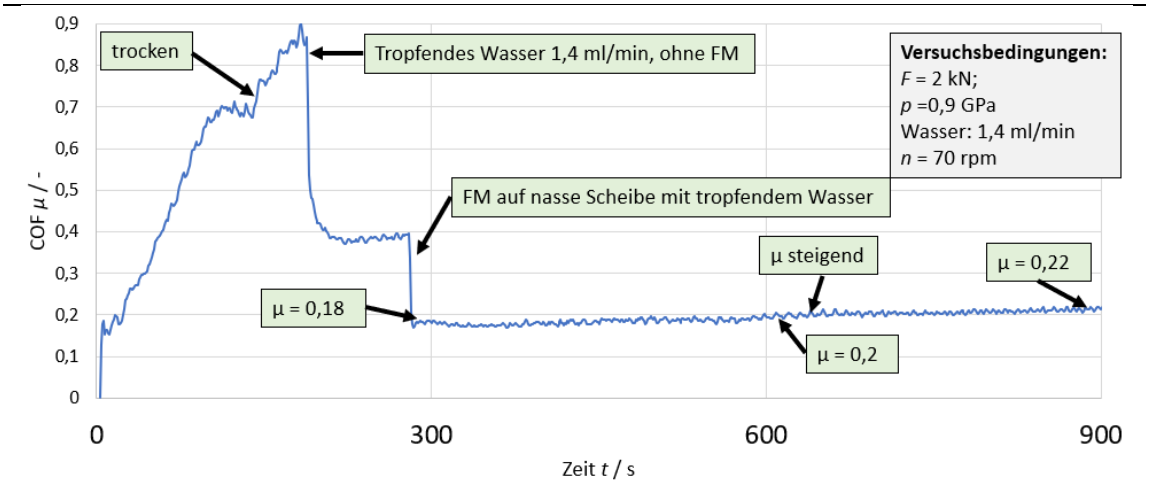


Abbildung 4: Untersuchung des Reibungskoeffizienten von nassen Prüfscheiben die nachträglich mit FM beschmiert wurden

Im Rahmen der vorliegenden Thematik stellt die Untersuchung des Reibverhaltens unter Verwendung von Seifenwasser eine bedeutende Relevanz dar. Dieser Test wird häufig durchgeführt, um kritische Reibwerte zu erfassen, die für das Verständnis und die Anwendung der zugrunde liegenden Materialien von besonderer Bedeutung sind. Die Probenvorbereitung, wie sie in Abbildung 5 dargestellt ist, bildet die Grundlage für die Durchführung des Tests, und die erzielten Ergebnisse sind in Abbildung 6 dargestellt.

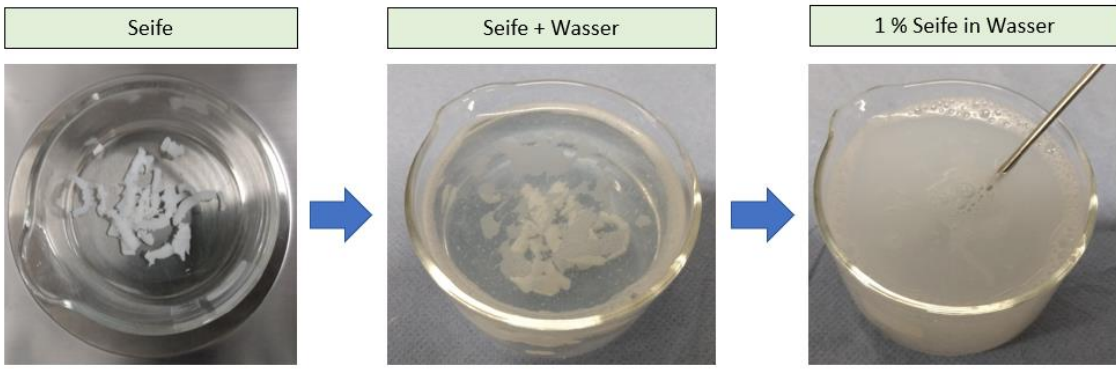


Abbildung 5: Probenvorbereitung von 1% (w/w) Seifenwasserlösung

Die vorliegende Abbildung 6 zeigt den Versuchsverlauf bei der Interaktion mit einer 1% (w/w) Seifenlösung. In den ersten 3 Minuten des Experiments laufen die Prüfscheiben

ohne Zugabe eines Schmierstoffes und befinden sich in einem trockenen Zustand. Nach Ablauf dieser Zeitspanne wird ein FM aufgetragen. Der beobachtete Reibwert beträgt zu diesem Zeitpunkt etwa 0,2. Bei der Zugabe von 1% (w/w) Seifenlösung kurz nach der fünften Minute kann beobachtet werden, dass der Gesamtreibwert nicht unter 0,2 fällt. Dies weist darauf hin, dass die Schmierung durch das aufgetragene FM den Reibwert stabilisiert und verhindert, dass durch die Zugabe von Seifenlösung der COF weiter abfällt. Der Schmiervorgang mit FM und das Auftragen von Seifenwasser wurde 3 Mal wiederholt, wobei der Reibungswert immer oberhalb von 0,15 bleibt.

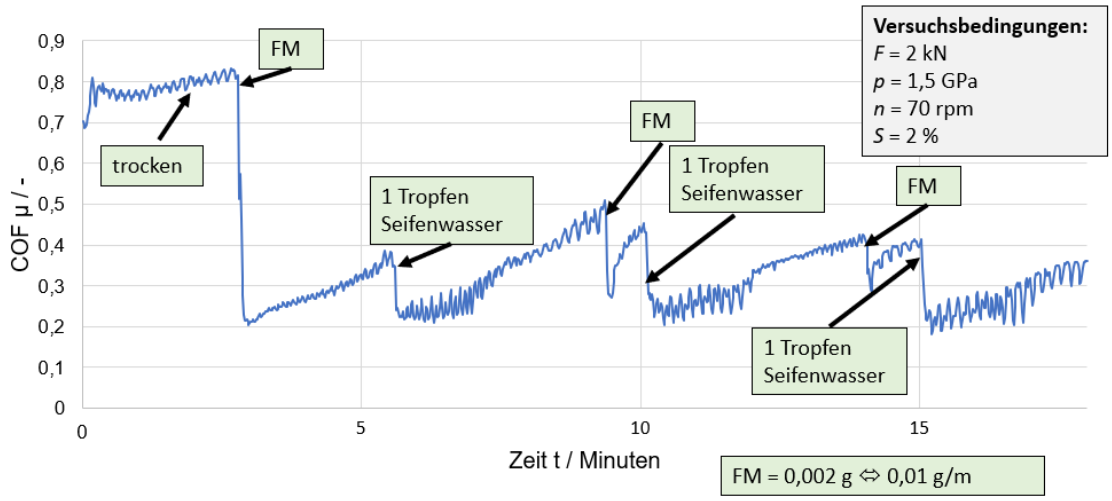


Abbildung 6: Untersuchungen des Reibverhaltens bei Verwendung von 1% (w/w) Seifenwasserlösung

Ein weiterer wichtiger und interessanter Punkt ist die Bestimmung des Reibungskoeffizienten bei Verwendung von Laub. In Gebieten mit starker Laubbedeckung auf den Schienen besteht die Gefahr, dass der zur Bremsung notwendige Reibwert von mindestens 0,15 nicht realisierbar ist.

Im Rahmen dieser wissenschaftlichen Untersuchung wurde daher Reibverhalten am Zweischeibenprüfstand unter Verwendung von Laub als verschärfte Testvariante untersucht. Der Versuch begann mit einem trockenen Kontakt der Prüfscheiben und einem anfänglichen Reibwert von etwa 0,8. Nach etwa 8 Minuten wurde tropfendes Wasser in den Versuch eingeführt, und nach ungefähr 11 Minuten wurde Laub zwischen die Prüfscheiben eingebracht. Dies sollte simulieren, dass ein Zug während eines

Regenschauers durch Laub fährt. Im Rahmen dieser reibungstechnisch sehr anspruchsvollen Bedingungen werden niedrige Reibwerte erwartet.

In der Folge kann ein Absenken des Reibungskoeffizienten auf einen Wert unterhalb von 0,1 beobachtet werden. Auch zeigt sich, dass die Reibwerte sehr instabil sind und daher stark schwanken. Ab der Minute 20 wurde der FM auf die Prüfscheiben aufgetragen. Die Ergebnisse zeigen, dass der Reibwert nach der Zugabe vom FM steigt und sich oberhalb der kritischen Grenze (rote Linie) befindet. Jede weitere Zugabe von Laub führt zu einer Reduzierung der Reibwerte, während jede Zugabe von FM diese erhöht und stabilisiert.

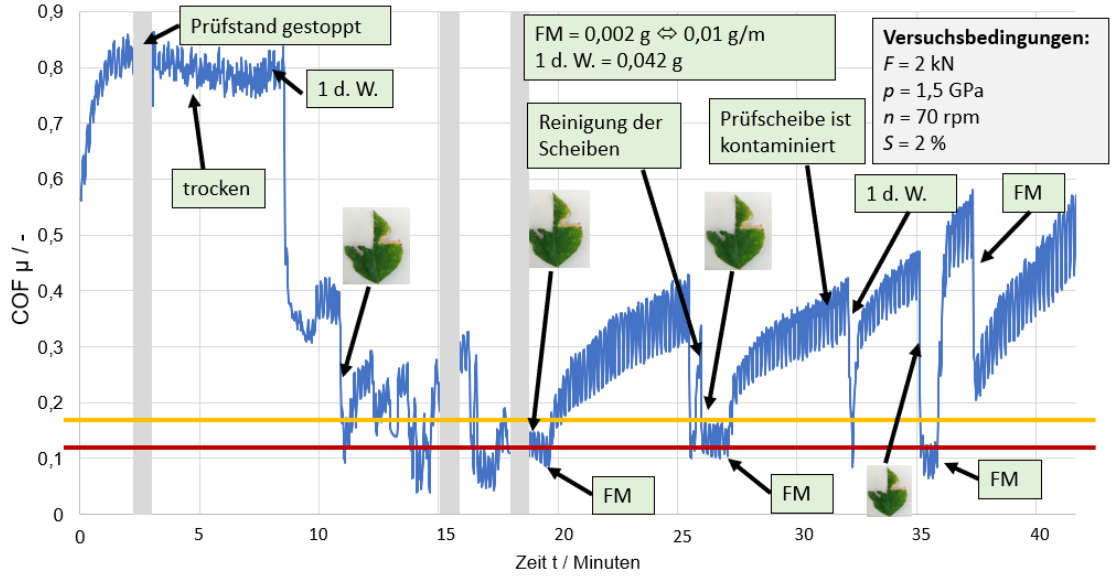


Abbildung 7: Untersuchungen der Reibwerte bei nassen Prüfscheiben und bei Verwendung von Laub

5 Zusammenfassung

Die im Zuge unserer Messungen generierten Daten zeigen, dass durch den Einsatz von Schienenkopfkonditionierungsmitteln eine Stabilisierung der Reibwerte deutlich zu beobachten ist. Die Wahl des richtigen FM ist daher von entscheidender Bedeutung, um einen optimalen und sicheren Schienenverkehr zu gewährleisten.

Die Verwendung von Schienenkopfkonditionierungsmitteln (FM) führt dazu, dass ein stabiler Reibwert sowohl bei nassen Bedingungen als auch bei Laub erreicht werden kann. Dies ist von zentraler Bedeutung, da der Schienenverkehr oft mit schwierigen Witterungsbedingungen konfrontiert ist, die die Reibung zwischen den Schienen und den Rädern beeinflussen können.

Diese Aussagen wurden auch bei Feldversuchen bestätigt, was die Relevanz und Anwendbarkeit der Erkenntnisse unter realen Bedingungen unterstreicht. Die Ergebnisse aus den Feldversuchen werden im Rahmen anderer Veröffentlichungen präsentiert.

Literatur

[1] Stuhr, Helge; Schneider, Philipp; Karch, Stefan: *Schienengüterverkehr Marktumfeld, Produktion, Technik und Innovation*, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2023.

[2] Czichos, H.; Habig, K.-H.: *Tribologie-Handbuch: Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik;* 4. Auflage, Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2015.

[3] ISO CEN-TS 15427-2-3 Bahnanwendungen – Reibungsmanagement zwischen Rad und Schiene Teil 2-3: Eigenschaften und Merkmale–Kraftschlusserhöhende Materialien; Deutsche Fassung CEN/TS 15427-2-3:2021.

Session 7

Dani Bechev, Erik Uhlein, Jannik Mayer, Pascal Vogel, Roland Weinhart

Autoren

Bechev, Dani

Von 2007 bis 2014: Studium an der TU Ilmenau, Fahrzeugtechnik

Von 2014 bis 2020: Promotion an der TU Kaiserslautern am Lehrstuhl für Maschinenelemente und Getriebetechnik

Seit 2020 bei LUBCON

Position: Leiter Entwicklung und Konstruktion im Bereich Schmiertechnik

Uhlein, Erik

Von 2016 bis 2022 Promotion an der TU Darmstadt am Institut für makromolekulare Chemie

Seit 2020 bei LUBCON

Position: Stellvertretender Forschungs- und Entwicklungsleiter

Mayer, Jannik

Bis 2019: Studium an der TU Darmstadt, Chemie

Bis 2022: Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF im Forschungsbereich Kunststoffe

Seit 2023 bei LUBCON

Position: Chemiker in der Forschung & Entwicklung

Session 7
Sebastian Wilbrecht, Martin Ruscher, Michael Beitelschmidt, Arnd Stephan

Praxistaugliche Radverschleißprognose der BR 423 - Der Digitale Zwilling als Ansatz zur Informationswertschöpfung

Wilbrecht, Sebastian[1]; Ruscher, Martin[2], Prof. Dr.-Ing. Beitelschmidt, Michael[1], Prof. Dr.-Ing. Stephan, Arnd[2]

[1]Technische Universität Dresden, Professur für Dynamik und Mechanismentechnik, 01062 Dresden
[2]Technische Universität Dresden, Professur für Elektrische Bahnen, 01062 Dresden

Kurzfassung

Radverschleißprognosen sind für die Einführung vorausschauender Instandhaltungsstrategien unabdingbar. Als Berechnungswerkzeug ist die Mehrkörpersimulation (MKS) in Kombination mit Verschleißmodellen Stand der Technik. Der hohe Aufwand während der Modellerstellung und Parametrierung sowie die langen Simulationszeiten sind jedoch ein Hemmnis, um MKS-basierten Radverschleißprognosewerkzeuge auf ganze Fahrzeugflotten anzuwenden. In diesem Beitrag wird daher das Konzept des Digitalen Zwillings als möglicher Lösungsansatz vorgestellt. Dabei werden mittels Kontextualisierung, Synthetisierung und sensorischer Datenerhebung wertvolle Informationen für vorausschauende Instandhaltungsmaßnahmen generiert. Die Kombination eines Datenmodells mit physikalischen Minimalmodellen, welche nur die sensitivsten Eingangsgrößen verarbeiten, hat sich dabei als überaus geeignet erwiesen, um Radverschleißprognosen mit praxistauglicher Genauigkeit zu erzeugen. Die Ergebnisse des Projekts sollen in das bereits existierende Radsatz-Management-System der DB AG einfließen.

Keywords: Digitaler Zwilling; Digital Twin; Radverschleiß; Vorausschauende Instandhaltung; Predictive Maintenance

1 Einführung

Wartungsarbeiten beeinflussen die Lebenszykluskosten und die Fahrzeugverfügbarkeit von Eisenbahnfahrzeugen signifikant [1]. Es besteht daher ein übergeordnetes Interesse an vorausschauenden und bedarfsgerechten Instandhaltungsmaßnahmen, um die Lebenszykluskosten zur reduzieren und die Fahrzeugverfügbarkeit zu erhöhen. Wesentlicher Bestandteil der Arbeiten stellt die Instandhaltung der Radsätze dar, die aufgrund von Radverschleiß regelmäßig reprofiliert oder ausgetauscht werden müssen. Für die Optimierung der Instandhaltungsprozesse sind integrierte Prognosewerkzeuge für zahlreiche Drehgestellkomponenten erforderlich, da Radsätze häufig nur in Gruppen gedreht bzw. getauscht werden dürfen und z. B. auch Bremsen, Getriebe und Fahrmotoren turnusmäßigen Wartungen unterliegen. Da der zeitliche und finanzielle Aufwand der Radsatzinstandhaltung im Rahmen der Wartungshandlungen dominant ist [2], soll im vorliegenden Beitrag die Radverschleißprognose als ein initialer Schritt hin zu einer optimalen, vorausschauenden Instandhaltungsstrategie beschrieben werden. Der Fokus liegt dabei auf einem praxistauglichen Prognosewerkzeug für große Fahrzeugflotten.

In den letzten Jahren wurden zahlreiche Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten unternommen, um Radverschleiß mittels Berechnungswerkzeugen zu prognostizieren [3]. In Abschnitt 5 wird auf diese Berechnungswerkzeuge näher eingegangen. Nachteilig an rein modellbasierten Prognosen ist die im Allgemeinen hohe Rechenzeit und die hohe Sensitivität der Parameter. Für eine valide Prädiktion müssen Umgebungs-, Fahrzeug-, Strecken- und Betriebsparameter für den Prognosezeitraum a priori bekannt sein. Insbesondere Umgebungs- und Betriebsparameter, wie z. B. das Wetter, das spezifische Fahrprofil des jeweiligen Triebfahrzeugführers oder die Disposition, lassen sich nicht oder nur mit einem sehr hohen Aufwand für einen Zeitraum in der Zukunft bestimmen. Auch viele Fahrzeug-, und Streckenparameter sind nur schwer zu ermitteln, wenn ganze Fahrzeugflotten und Streckennetze betrachtet werden. Als Beispiele sollen der Alterungszustand von Federn bzw. Dämpfern sowie die Gleislage genannt werden. Selbst beim besten Modell führen diese Unsicherheiten vieler Eingangsparameter dazu, dass das Vertrauensniveau der Berechnungsergebnisse eingeschränkt ist.

Angesichts dieser Herausforderungen bei der Anwendung rein modellbasierter Berechnungs- und Diagnosewerkzeuge setzen sich vermehrt automatisierte Radsatzdiagnosesysteme durch [4, 5]. Diese Systeme sind in der Lage, bei der Überfahrt u. a. Radprofilkennwerte zu erfassen und Betriebsgrenzmaße zu überwachen. Grundsätzlich erlauben die erfassten Informationen eine Extrapolation in die Zukunft. Da allerdings die Lastkollektive, die zu dem gemessenen Radverschleiß geführt haben, nicht miterfasst werden, ist eine

Extrapolation mit sehr großen Unsicherheiten behaftet. Des Weiteren ergeben sich daraus keine direkten Informationen, wie der Radverschleißvorrat durch eine optimierte Disposition intelligent genutzt werden kann.

Am Beispiel der BR 423, die von der Deutschen Bahn AG (DB AG) als S-Bahn-Fahrzeug in München eingesetzt wird, soll in diesem Beitrag ein Ansatz vorgestellt werden, bei dem einfache, modellbasierte Werkezuge mit Daten aus einem Radsatzdiagnose-Systeme zu einem Digitalen Zwilling kombiniert werden. Ziel ist es, eine effiziente und praxistaugliche Prognose von Radverschleiß zu ermöglichen. Das Konzept des Digitalen Zwillings schafft dabei den Rahmen, um für den konkreten Use-Case *Radverschleißprognose* eine flexible Synthese von Methoden zu ermöglichen und gleichzeitig eine Nutzerzentrierung für die Mitarbeiter der Fahrzeugdisposition und Instandhaltung zu ermöglichen. Als maßgebliche Verschleißursachen werden Adhäsion und die Abrasion infolge des rollende Eisenbahnrads adressiert. Rollkontaktermüdung, Unrundheiten, Flachstellen und Korrosion werden nicht betrachtet.

In der S-Bahn-Region München werden bereits umfassende Instandhaltungsdaten erhoben, indem Radprofilkennwerte automatisiert über ein Radsatzdiagnose-System erfasst und zusammen mit Instandhaltungshandlungen in einer Datenbank gespeichert werden. Ein von der DB entwickeltes Tool, der Radsatzlebenszyklusmanager (RLM), erlaubt eine Visualisierung dieser Daten. Ziel ist es, den RLM um einen Blick in die Zukunft zu erweitern. Dazu sollen mit Hilfe eines Digitalen Zwillings zu erwartende Dispositionsdaten und zukünftige Lastannahmen verwendet werden, um Radverschleißprognosen und Handlungsempfehlungen zu generieren (siehe Abb. 1).

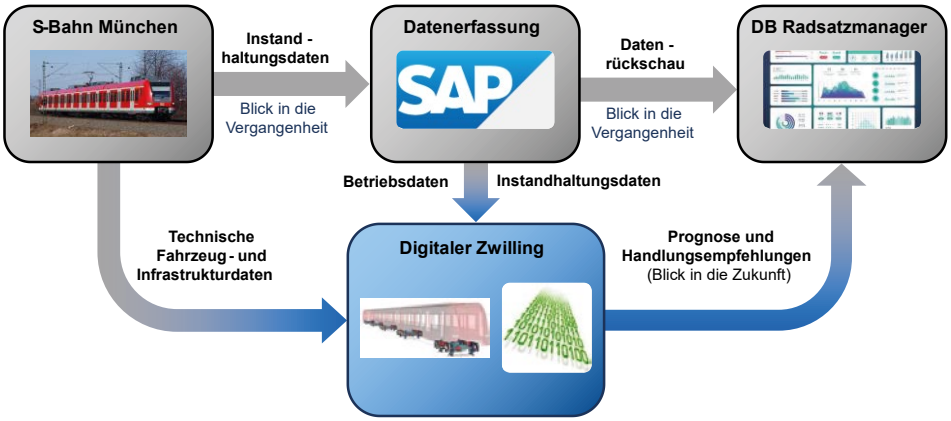


Abb. 1: Datenerfassung in der S-Bahn-Region München (grau) und Erweiterung um einen Digitalen Zwilling (blau)[1]

[1] Das Foto der BR 423 stammt vom Nutzer MdE aus der deutschsprachigen Wikipedia, CC BY-SA 3.0 de, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=9858236

Der Beitrag ist wie folgt aufgebaut. Abschnitt 2 definiert das Prinzip des Digitalen Zwillings. Anschließend wird in Abschnitt 3 die Konzeptionierung des Digitalen Zwillings zur Radverschleißberechnung dargestellt. In Abschnitt 0 wird die pragmatische Erhebung von fehlenden Informationen beispielhaft erläutert. Die praxistaugliche Modellbildung wird in Abschnitt 5 sowohl allgemein als auch für den Use-Case *Radverschleißprognose* aufgezeigt. Eine Evaluierung des Digitalen Zwillings wird in Abschnitt 6 beschrieben. Der Beitrag schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick in Abschnitt 7 ab.

2 Der Digitale Zwilling zur Informationswertschöpfung

Der Digitale Zwilling ist ein Konzept, bei dem mithilfe digitaler Methoden eine virtuelle Repräsentation eines realen physischen Objekts, Produkts, Prozesses oder Systems erstellt wird. Die Eigenschaften, das Verhalten und die Funktionen des realen Objekts oder Systems werden partiell oder vollständig abbildet. Im digitalen Objekt werden dazu Modelle, Datenverarbeitung und Algorithmen eingesetzt. Über Schnittstellen werden kontinuierlich Daten, die durch Sensoren, Messungen oder Simulationen gesammelt werden, vom realen Objekt zum Digitale Zwilling übertragen. Diese Daten ermöglichen es dem Digitale Zwilling, den aktuellen Zustand und das Verhalten des realen Gegenstücks widerzuspiegeln und Szenarien und Handlungsempfehlungen für die reale Welt zu generieren, siehe Abb. 2.

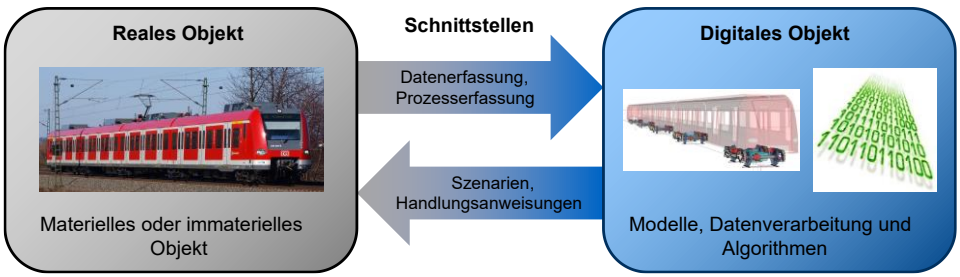


Abb. 2: Allgemeine Struktur eines Digitalen Zwillings[2]

Im Gegensatz zu klassischen Simulationsmodellen, die in der Regel von Berechnungsingenieuren erstellt und bedient werden, wird der Digitale Zwilling für einen Anwender entwickelt, der am realen Objekt arbeitet. Der Digitale Zwilling zur Radverschleißprognose wird daher für Anwender in der Instandhaltung oder Disposition von Schienenfahrzeugen entwickelt.

[2] Das Foto der BR 423 stammt vom Nutzer MdE aus der deutschsprachigen Wikipedia, CC BY-SA 3.0 de, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=9858236

In Abgrenzung zu anderen Definitionen verstehen die Autoren dieses Beitrags den Digitalen Zwilling als ein Konzept, das etablierte Methoden aus den Bereichen Berechnungsingenieurwesen, Datenwissenschaft und Algorithmenentwicklung so einsetzt, dass ein Use-Case für eine definierte Anwendergruppe bedient werden kann. Der Use-Case setzt dabei höherwertige Informationen voraus, die als vorhandene Informationsbasis nicht zur Verfügung stehen. Mittels Kontextualisierung (Datenverarbeitung) und Synthetisierung (Modelle) betreibt der Digitalen Zwilling Informationswertschöpfung auf Basis der vorhandenen Informationen. Für eine möglichst hohe Effizienz sollte der Digitale Zwilling auf die Informationsbasis und den Use-Case optimiert werden (siehe Abb. 3).

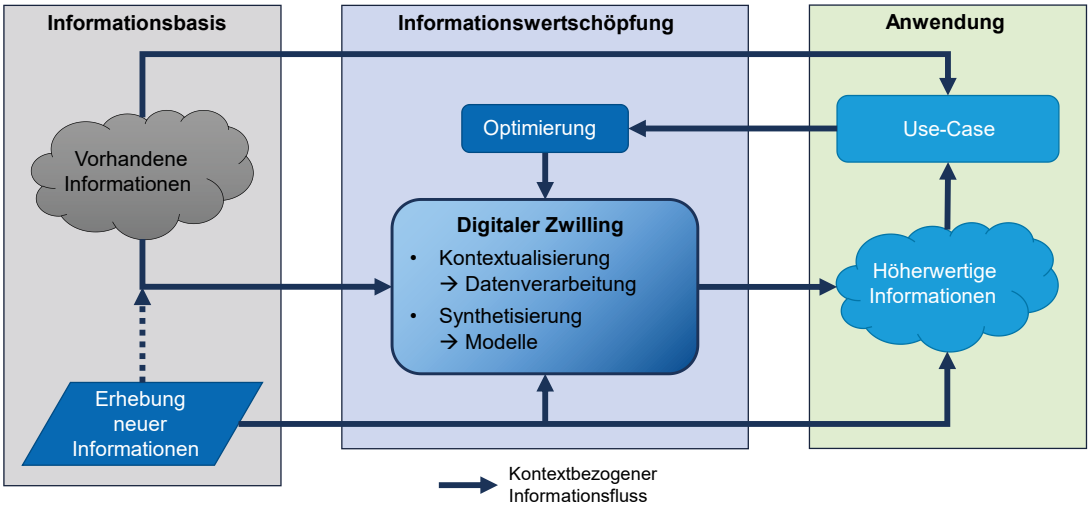


Abb. 3: Informationsfluss und -wertschöpfung mit dem Digitalen Zwilling

Da es nicht möglich ist, aus einer beliebig schlechten Informationsbasis eine beliebig hohe Information zu erzeugen, müssen ggf. zusätzliche Informationen erhoben werden. Ein großer Vorteil ist, dass nicht zwingend die benötigte höherwertige Information erhoben werden muss, sondern die messtechnische Erhebung von Prozessdaten im Feld durch die Informationswertschöpfung dort ergänzt werden kann, wo sie nicht oder nur mit hohem Aufwand umsetzbar ist.

3 Konzeptionierung des Digitalen Zwillings zur Radverschleißprognose

Der Digitale Zwilling zur Radverschleißprognose wird am Beispiel der BR 423 der S-Bahn in München konzeptioniert. Dieser besteht grundsätzlich aus einem Digitalen Master und einem Digitalen Schatten (siehe Abb. 4) [6]. Dabei umfasst der Digitale Master alle verhaltensbeschreibenden Modelle des realen Objektes, welche sowohl mathematisch-physikalische als auch rein datenbasierte Charakteristiken aufweisen können. So werden beispielsweise Fahrzeuge, Strecken und der Verschleißvorgang mathematisch-physikalisch beschrieben, das S-Bahn-Netz hingegen semantisch. Um den Digitalen Master zu parametrieren, kommen hauptsächlich Stammdaten zur Anwendung, die in der Regel eine geringe Dynamik aufweisen. Das heißt, dass sich die zugrundeliegenden Informationen der realen Objekte nicht bzw. nur selten ändern. Aus dem Digitalen Master lassen sich individuelle Instanzen generieren. Dabei handelt es sich um die eigentlichen virtuellen Repräsentationen realer Objekte, wie beispielsweise der Radsätze, Drehgestelle, Strecken und Gleiselemente. Mithilfe von Instanzverknüpfungen werden diese Instanzen unter Berücksichtigung einer geeigneten Logik miteinander in Beziehung gesetzt. Exemplarisch seien an dieser Stelle die Zuordnung Radsatz-Drehgestell-Fahrzeug-Zug sowie die sich stetig ändernde Zuordnung Zug-Streckenabschnitt genannt.

Einen weiteren wesentlichen Bestandteil des Digitalen Zwillings bildet der Digitale Schatten. Dieser besteht aus Daten, deren zugrundeliegenden Informationen einer hohen Dynamik unterworfen sind und entsprechend häufig aktualisiert oder kontinuierlich fortgeschrieben werden. Hierbei beschreiben Zustandsdaten die gegenwärtigen oder vergangenen Momentaufnahmen konkreter Zustände. Prozessdaten hingegen bilden gegenwärtige, vergangene und zukünftige Veränderungsprozesse der entsprechenden Zustände ab. Die Daten des Digitalen Schattens dienen einerseits dazu, Instanzen zu parametrieren, andererseits bilden sie die Grundlage dafür, mithilfe von Simulationen, statistischen Verfahren sowie anderen kontextualisierenden Methoden höherwertige Informationen zu erzeugen. Bezogen auf den Use-Case der Radverschleißprognose entspricht dies Informationen über den perspektivischen Zustand konkreter Radsatzinstanzen. Diese können mit Radsatzzustandsdaten aus dem realen Betrieb abgeglichen werden, um die Modelle des Digitalen Masters zu validieren und sich so sukzessiv möglichst präzisen Radverschleißprognosen anzunähern.

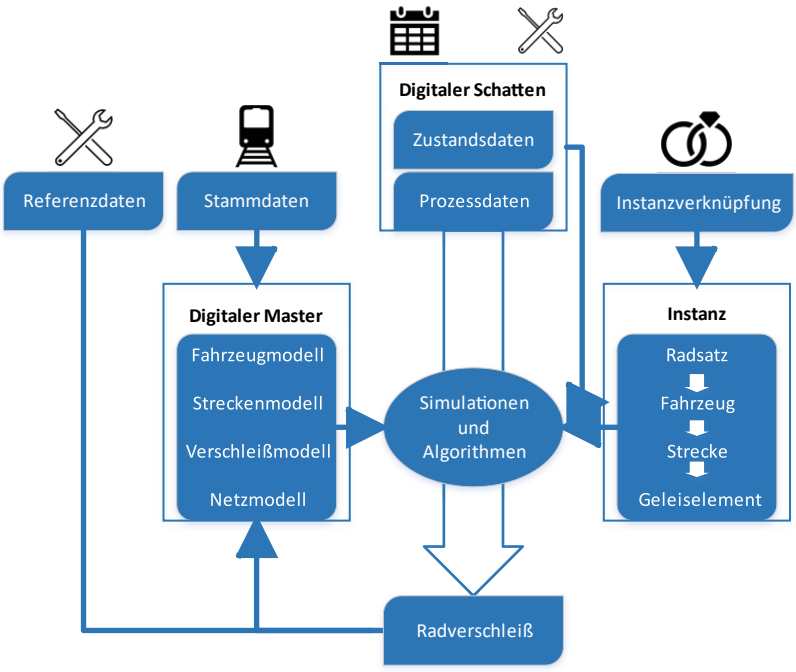


Abb. 4: Konzeptskizze des Digitalen Zwillings zur Radverschleißprognose

Um eine stabile Anwendung des Digitalen Zwillings zu gewährleisten, besteht die Notwendigkeit, eine IT-Struktur zu schaffen, die es ermöglicht, die Menge aller Daten gesamtheitlich zu erfassen, aufwandsarm zu verarbeiten, redundanzarm zu speichern und zuverlässig bereitzustellen. Da die bestehende Informationsbasis häufig aus diversen Quellen gespeist wird und diese ursprünglich nicht für den betrachteten Use-Case modelliert wurden, müssen die enthaltenen Informationen meist von ihrer Datenstruktur getrennt werden, was abhängig von der Größe der Informationsbasis mit einem hohen Modellierungsaufwand einhergehen kann. Die anwendungsabhängige Struktur gewährleistet jedoch eine einfache Skalierbarkeit und redundanzarme Speicherung. Dementsprechend resultiert die Anforderung, ein Datenmodell zu konzipieren, welches eine geeignete Kompromisslösung zwischen Abstraktion und Konkretisierung darstellt.

Im Projekt hat sich gezeigt, dass sich eine grundlegende Unterteilung in Stamm-, Prozess- und Zustandsdaten sowie Instanzverknüpfungen als Grundlage für Prognosezwillinge anbietet (siehe Abb. 4). Die grob aufgeschlüsselte Informationsbasis sowie die Zuordnung der jeweiligen Daten in die entsprechenden Kategorien des Digitalen Zwillings ist in Abb. 5 schematisch dargestellt. Dazu gehören u. a. Infrastruktur-, Dispositions-, und Fahrverlaufsinformationen sowie Informationen über Komponentenzustände und durchgeführte Instandhaltungsmaßnahmen. Die Modellierung und der Aufbau einer geeigneten Datenbasis ist im Allgemeinen eine signifikante Herausforderung bei der Entwicklung eines Digitalen Zwillings. Dies ist im Wesentlichen darauf zurückzuführen, dass Bestandsdaten

häufig eine geringe Informationsqualität aufweisen. So sind die historischen Daten teilweise inhomogen, unvollständig, unpräzise oder können der produktiven Nutzung nicht oder nur schwer zugänglich gemacht werden. Dies betrifft insbesondere strecken- und fahrzeugseitige Zustandsdaten sowie Betriebsdaten realer Fahrverläufe. So werden z. B. die Zustandsdaten der Radsätze mithilfe diverser Messmittel erhoben, die einen unterschiedlichen Detaillierungsgrad aufweisen und deshalb aufwendig synchronisiert werden müssen. Weitere verwendete Informationsquellen sind kartographische Streckendaten, Daten der Dispositionsplanung, detaillierte Fahrzeug-Vollmodelle, diverse SAP-Daten sowie eigens durchgeführte Prozessdaten-Messungen. Zur Verarbeitung von Streckeninformationen müssen z. B. Streckenelemente, welche lediglich durch streckenspezifische Anfangs- und Endparameter (Krümmung, Längsneigung, Überhöhung, …) beschrieben werden, in ein diskretes Format hoher Auflösung überführt werden. Dies ermöglicht es, Prozess- und Zustandsdaten, wie z. B. messtechnisch erfasste Fahrprofile in der gewünschten Auflösung auf die Strecke abzubilden. Um eine hohe Informationsqualität zu gewährleisten und somit den Datenaufbereitungsaufwand gering zu halten, sollten Digitale Zwillinge sowie damit einhergehende IT-Infrastruktur dementsprechend parallel zum realen Objekt entwickelt werden. Dies setzt jedoch eine umfassende und gesamtsystemische Anforderungsanalyse zu Beginn des Lebenszyklus des abgebildeten Objektes voraus, um wirtschaftlich relevante Use-Cases zu identifizieren und klar zu definieren.

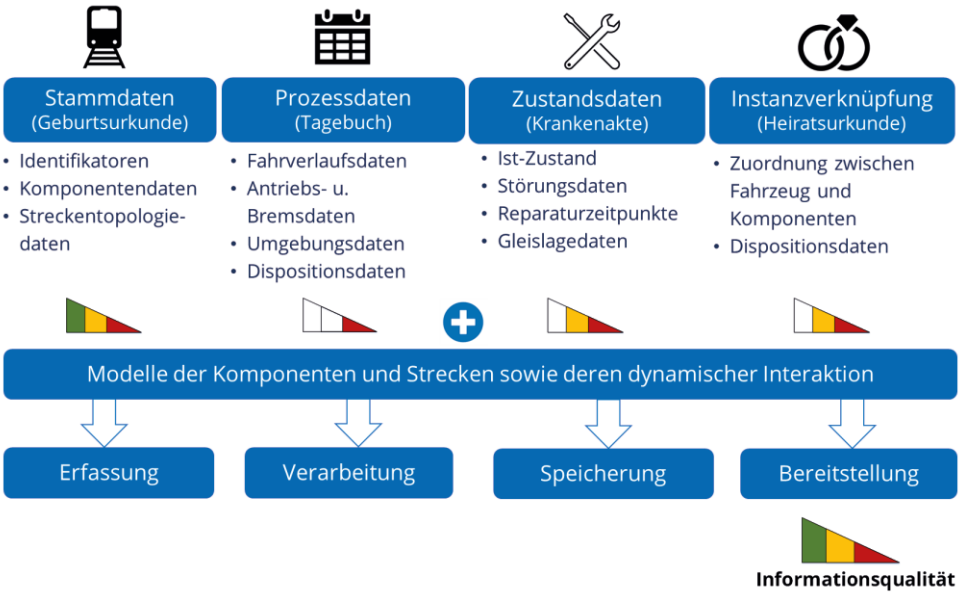


Abb. 5: Kategorisierte Informationsbasis des Digitalen Zwillings zur Radverschleißprognose

4 Messtechnische Erhebung von Fahrprofilen

Für die Prognose des Radverschleißes werden realistische Fahrprofile in Form von örtlich aufgelösten Geschwindigkeitsprofilen als Lastannahme benötigt. Da das Auslesen des Datenbusses der Fahrzeugleittechnik der BR 423 zur kontinuierlichen Erfassung und Übertragung der erforderlichen Daten mit hohem technischem Aufwand verbunden ist [7] und Messmittel aufgrund zulassungsbedingter Hürden nicht installiert werden konnten, bestand die Notwendigkeit, die erforderlichen Prozessdaten mithilfe praxistauglicher Sensorlösungen in hinreichender Qualität zu erheben.

Mit guter Näherung ist im S-Bahn Betrieb von einem repräsentativen, sich wiederholenden Geschwindigkeitsprofil zwischen benachbarten Haltestellen auszugehen. Somit können Informationen des dispositiven Fahrzeugeinsatzes sowie Streckennetzinformationen mit repräsentativen Geschwindigkeitsinformationen kontextualisiert werden, um die historischen Fahrprofile bestimmter Fahrzeuge in ausgewählten Betrachtungseiträumen zu rekonstruieren. Zu diesem Zweck wurden streckenbezogene Geschwindigkeitsinformationen der BR 423 mit einer Messkampagne als Momentaufnahme erhoben (siehe Abb. 6). Hierbei kamen Smartphones aus dem Consumer-Bereich mit hinreichend präziser Bewegungs-Sensorik und hoher Datenaufzeichnungsrate zum Einsatz. Die Open-Source App *phyphox* [8] ermöglichte es, die verbauten Sensoren für manuell konfigurierbare Messungen zu nutzen und die aufgezeichneten Daten zu exportieren. Neben GNSS-basierten Geoinformationen wurden zusätzlich Daten der Beschleunigungs-, der Magnetfeld- und der Drehratensensoren im gesamten Netz der S-Bahn München erfasst.

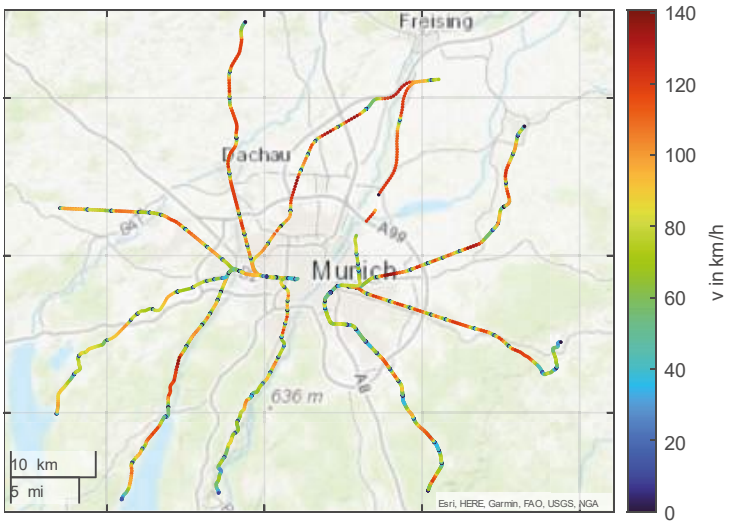


Abb. 6: Rohdaten der GNSS-Geschwindigkeit im S-Bahn-Netz München

Da auf einigen Streckenabschnitten, insbesondere im zentral gelegenen Stammstreckentunnel kein GNSS-Signal empfangen werden konnte, wurden resultierende Informationslücken mithilfe parallel erhobener Längsbeschleunigungsdaten über eine Sensordatenfusion kompensiert. Dieses Verfahren wurde zuvor anhand einer Referenzmessung auf Strecken mit durchgängigem GNSS-Signal verifiziert. Abb. 7 zeigt dieses Verfahren am Beispiel der Linie S1 vom Münchener Flughafen bis zur Haltestelle Donnersbergerbrücke. Dabei entspricht v_{GNSS} der GNSS-Referenzgeschwindigkeit und v_x dem zeitlich integrierten Längsbeschleunigungsverlauf. Wie zu erkennen ist, gibt es eine Abweichung des integrierten Beschleunigungsverlaufes v_x von der Geschwindigkeitsmessung v_{GNSS}. Integrationsbedingt summieren sich Abweichungen der Beschleunigungen entlang der Strecke bzw. Fahrzeit auf und resultieren so in einem Abdriften des Geschwindigkeitssignals. Durch eine forcierte Nullung des integrierten Beschleunigungsverlaufes kann jedoch eine gute Übereinstimmung zwischen den beiden Verläufen $\hat{v}_x$ und v_{GNSS} erreicht werden. Somit kann verifiziert werden, dass sich dieses Verfahren zur Informations-Kompensation von Bereichen ohne durchgängigen GNSS-Empfang eignet.

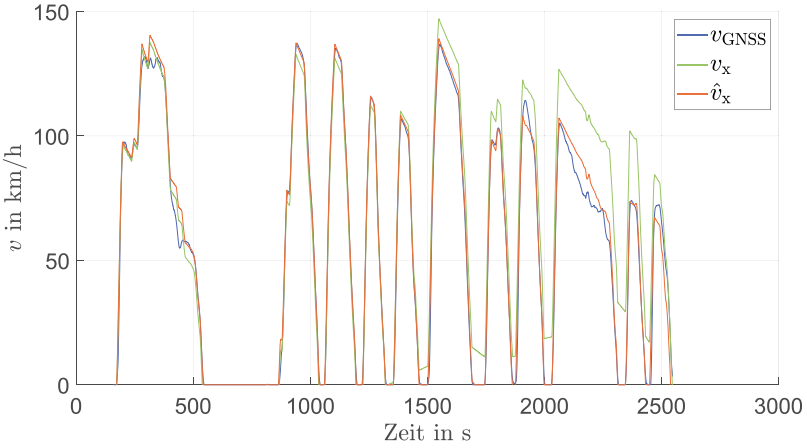


Abb. 7: Messdatenverarbeitung am Beispiel der Münchner S-Bahn-Linie S1 Flughafen-Donnersbergerbrücke

Die so ermittelten Geschwindigkeitsverläufe bilden das Referenzfahrprofil. Hierbei ist jedoch anzumerken, dass es sich bei den erfassten Fahrprofilen um Momentaufnahmen handelt, welche nicht zwangsläufig für jede Fahrt entlang der entsprechenden Linie repräsentativ sind und somit nur eine moderate Informationsqualität aufweisen. Für einen skalierbaren Digitalen Zwilling zur Radverschleißprognose sollte demzufolge bei der Neubeschaffung von Fahrzeugen darauf geachtet werden, dass zugängliche Kommunikationsschnittstellen mit der Fahrzeugleittechnik vorhanden sind, aus welchen Prozessdaten kontinuierlich ausgelesen und übertragen werden können. Um Unsicherheiten, wie z. B.

Abweichungen vom definierten Referenzfahrprofil, zu quantifizieren, wird zu jeder Prognose ein Vertrauensbereich angegeben. In Abschnitt 6 wird darauf detaillierter eingegangen.

Bereits mit dem einfachen Messaufbau konnte gezeigt werden, dass die Schnittstellen zwischen virtuellem und realem Objekt von großer Bedeutung für die Anwendung Digitaler Zwillinge sind. Insbesondere können so strecken-, fahrzeug- und betriebsspezifische Einflüsse, die nicht in den vorliegenden Zustands- und Prozessdaten enthalten sind, erfasst werden und die Prognosefähigkeit des Digitalen Zwillings entscheidend verbessern.

5 Modellbildung für den Digitalen Zwilling

Die Aufgabe des mathematisch-physikalischen Modells ist es, auf Basis perspektivischer Lastannahmen eine Prognose für den Radverschleiß zu generieren. Aus Betreibersicht müssen insbesondere die Betriebsgrenzmaße der Radsätze überwacht werden. Grenzmaße existieren unter anderem für den Durchmesser, die Spurkranzbreite sowie das Spurmaß. Im Rahmen der Radverschleißprognose müssen daher die Verschleißtiefe und die Verschleißposition auf dem Rad bestimmt werden. Gemäß dem Stand der Technik werden dazu etablierte Verschleißmodelle z. B. nach KRAUSE UND POLL oder nach ARCHARD verwendet [3, 9, 10], um das Verschleißvolumen zu berechnen. Als Eingangsgrößen benötigen diese tribologischen Verschleißmodelle die Zeitfolge der auftretenden Kräfte und den zugehörigen Schlupf im Rad-Schiene-Kontakt. Zur Bestimmung dieser Größen, aber auch zur Berechnung der Verschleißposition, werden wiederum fahrzeugdynamische Modelle eingesetzt. Diese bilden die gesamte Längs, - Quer- und Lateraldynamik des Schienenfahrzeugs sowie die komplexen Vorgänge im Rad-Schiene-Kontakt unter Berücksichtigung der auftretenden Lasten ab. Stand der Technik ist dabei die Mehrkörpersimulation (MKS) [3, 11]. Diese ermöglicht es, das dynamische Verhalten eines Systems bestehend aus mehreren Einzelkörpern, wie zum Beispiel Fahrzeugen oder mechanischen Strukturen, unter Berücksichtigung von physikalischen Gesetzen und Bindungen zwischen den Einzelkörpern zu analysieren und zu simulieren.

Häufig wird die MKS auch für Methoden zur Radverschleißoptimierung eingesetzt [9, 12]. Der hohe Aufwand während der Modellerstellung und Parametrierung sowie die langen Simulationszeiten sind jedoch ein Hemmnis, um MKS-basierte Radverschleißprognosewerkzeuge auf ganze Fahrzeugflotten anzuwenden. Zusätzlich erschwert das für die Anwendung und Beurteilung solcher Simulationen erforderliche Fachwissen den anwendungsorientierten Einsatz von MKS zur Prognose des Radverschleißes.

Da die Praxisanwendung des Digitalen Zwillings eine schnelle Prognosefähigkeit erfordert, muss das mathematisch-physikalische Modell möglichst recheneffizient ausgeführt sein. Daher wurden neben der üblichen MKS auch Modellvereinfachungen und Minimalmodelle hinsichtlich ihrer Tauglichkeit für Digitale Zwillinge untersucht. Hierzu wird der Double-Loop Ansatz gemäß Abb. 8 verwendet. Dabei wird ausgehend von einer Anforderungs- und Systemanalyse eine detaillierte physikalische Modellbildung als Referenz eingesetzt, um Systemwissen zu generieren. Das relevante Systemverhalten soll dann identifiziert und mit möglichst einfachen Modellansätzen beschrieben werden. Als Use-Case-spezifische Ausgabe wurden die Radprofilkennwerte (Durchmesser, Spurkranzbreite, Spurmaß, ...) festgelegt, die zur Überwachung der Betriebsgrenzmaße erforderlich sind.

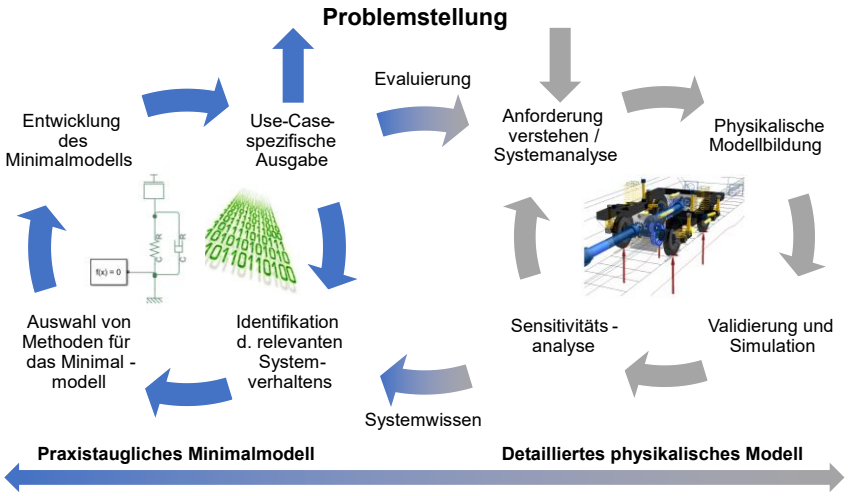


Abb. 8: Double-Loop Ansatz für die Minimalmodellentwicklung

Als Ergebnis mehrerer Iterationen mit dem Double-Loop-Ansatz hat sich die Verwendung von zwei Modulen als zweckmäßig erwiesen. Im ersten Modul berechnet ein Minimalmodell das Verschleißvolumen am Rad. Auf dieser Basis werden im zweiten Modul der zugehörige Verschleißort und damit die Radprofilkennwerte bestimmt.

Die Verschleißvolumen-Prognose ist mathematisch-physikalisch motiviert und berechnet das Verschleißvolumen V_w auf Basis eines etablierten Verschleißmodells nach KRAUSE UND POLL. Eingangsgröße für das Verschleißmodell ist im Wesentlichen die Reibleistung im Rad-Schiene-Kontakt, aus der die Reibarbeit W_r und die Reibleistung pro Flächeneinheit p_r berechnet wird [10]:

$$V_\mathrm{w} = I_\mathrm{w}(p_\mathrm{r}) \cdot W_\mathrm{r}$$

Über den Proportionalitätsfaktor I_w wird ein temperaturinduzierter Übergang von mildem zu heftigem Verschleiß berücksichtigt, wobei die Grenze gemäß [10] bei $p_\mathrm{r} = 4\ \mathrm{W/mm^2}$ festgelegt ist.

Zur Berechnung von Reibleistung und Reibarbeit wird ein linearer Modellansatz verwendet, der jeweils 2 Radsätze, ein Drehgestell und einen Wagenkasten als ein Vier-Massen-Modell mit der linearen Kontakttheorie von KALKER kombiniert. Damit lassen sich Längs- und Querdynamik sowie die Vorgänge im Rad-Schiene-Kontakt abbilden. Im Vergleich zu üblichen fahrzeugdynamischen MKS-Modellen von Schienenfahrzeugen ist der Freiheitsgrad und damit die Komplexität des mathematischen Gleichungssystems signifikant reduziert, wodurch eine effiziente Berechnung, auch für große Flotten, ermöglicht wird.

Im Gegensatz zur mathematisch-physikalischen Verschleißvolumen-Prognose ist die Radprofilkennwert-Prognose datenbasiert, wobei im Wesentlich die aktuellen und historischen Radprofilkennwerte des Radsatzdiagnose-Systems verwendet werden. Für jeden Radprofilkennwert K_n wird dabei eine Funktion f erstellt, die die Änderung des Radprofilkennwerts ΔK_n in Abhängigkeit des zuvor ermittelten Verschleißvolumens V_w ausdrückt:

$$\Delta K_n = f(V_w)$$

Ausgehend von einem Referenzzustand, der einem neuen oder reprofilierten Radsatz entspricht, lassen sich bei bekanntem Verschleißvolumen beispielsweise die Änderungen des Messkreisdurchmessers ΔdM, die Änderung der Spurkranzdicke ΔSd oder die Änderung des Spurmaßes ΔSr berechnen.

Der Blick in die Zukunft wird ermöglicht, indem das Verschleißvolumen für einen perspektivischen Zustand mittels der Verschleißvolumen-Prognose ermittelt wird. Für einen Zeitraum in der Zukunft werden dazu die geplante Disposition und das zu erwartende Fahrprofil fahrzeugspezifisch festgelegt. Die Radprofilkennwert-Prognose gibt für diesen perspektiven Zustand die Radprofilkennwerte aus, die direkt mit den Betriebsgrenzmaßen abgeglichen werden können. Abb. 9 fasst die definierte Datengrundlage und die Modellinteraktion zusammen.

Mit dem beschriebenen Ansatz lassen sich zukünftige Radprofilkennwerte bestimmen, die für eine Optimierung der Instandhaltungsprozesse verwendet werden können. Durch Anpassung der Disposition kann zudem auch Einfluss auf den Zeitpunkt der Radsatzinstandhaltung genommen werden.

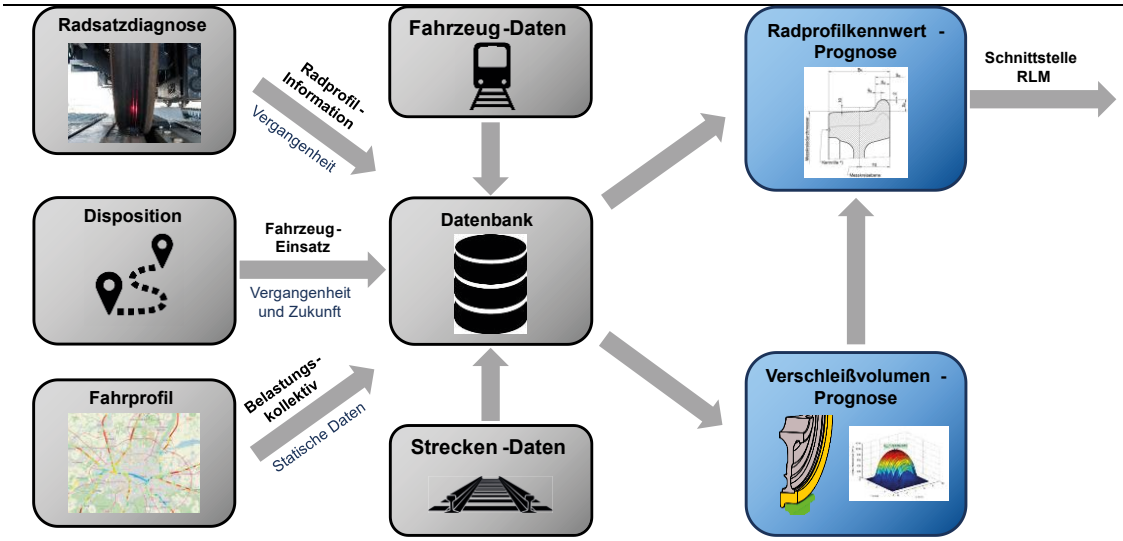


Abb. 9: Datengrundlage und Modellinteraktion des Digitalen Zwillings zur Radverschleißprognose

6 Implementierung und Evaluierung des Digitalen Zwillings

Für die praktische Anwendung des Digitalen Zwillings besteht die Anforderung, diesen in die bestehende IT-Infrastruktur der DB zu integrieren. Der Fokus aktueller Arbeiten besteht demzufolge in der Implementierung und Validierung eines Prototyps des Digitalen Zwillings an der Technischen Universität Dresden sowie der Ableitung grundlegender Handlungsempfehlungen für dessen produktive Integration und Skalierung auf Schwesterbaureihen. Dazu sind zunächst die bisher geschaffenen Ergebnisse zu evaluieren. Diese umfassen praxistaugliche Fahrzeug- und Verschleißmodelle, einen eingangsseitigen Datenpool sowie Eingangsdaten-spezifische Datenaufbereitungsprogramme und -algorithmen.

Eine besondere Herausforderung für alle Prognoseszenarien ist die Definition von zu erwartenden Lastannahmen. Für die Radverschleißprognose sind nicht nur die perspektivische Disposition und die Fahrprofile mit einer Unsicherheit behaftet, sondern unter anderem auch die Gleislage und der Kraftschlussbeiwert zwischen Rad und Schiene. Um diese Unsicherheiten im Rahmen der Prognose abzubilden, wird zu jedem perspektivischen Radprofilkennwert auch ein Vertrauensbereich angegeben.

Der Vertrauensbereich wird durch Worst- und Best-Case-Szenarien der Lastannahmen gebildet, die Eingang in die Verschleißvolumen-Prognose finden. Neben einem perspektivischen Erwartungswert für das Verschleißvolumen werden auch die Verschleißvolumina für die Worst- und Best-Case-Szenarien berechnet. Indem für alle drei Verschleiß-

volumina die zugehörigen Radprofilkennwerte berechnet werden, sind neben dem Erwartungswert auch die Worst- und Best-Case-Szenarien für die perspektivischen Radprofilkennwerte verfügbar.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Das Konzept des Digitalen Zwillings weist das Potenzial auf, über Kontextualisierung, Synthetisierung und sensorische Datenerhebung wertvolle Informationen für vorausschauende Instandhaltungsmaßnahmen zu generieren. Am Beispiel der Radverschleißprognose für die BR 423 im S-Bahn-Netz München kann gezeigt werden, dass Minimalmodelle, die mit dem Double-Loop-Ansatz erzeugt wurden, geeignet sind, um perspektivische Komponentenzustände für ganze Fahrzeugflotten zu berechnen.

Die Entwicklung Digitaler Zwillinge ist ein interdisziplinärer Prozess, der umfassende betriebliche und technologische Kompetenzen vereint. Es ist daher wichtig, klare Ziele und Anforderungen zu definieren, die sich am individuellen Ausgangsniveau orientieren. Insofern sollte die Zielsetzung eine evolutionäre Verbesserung der Ausgangslage herbeiführen. Dazu gehört unter anderem auch, die bestehende Informationsbasis bezüglich der zweckgebundenen Informationsqualität zu bewerten und etwaige Defizite zu identifizieren. Ein bestehendes Informationsdefizit lässt sich häufig mit einfachen, aber Use-Case-spezifischen Maßnahmen kompensieren. Dies wird am Beispiel der Smartphone-Messung zur Erhebung von Fahrprofilen deutlich. Die Kombination datengetriebener und physikalischer Modellbildung zur Radverschleißprognose unterstreicht zusätzlich die Flexibilität des Konzepts Digitaler Zwilling.

Im weiteren Verlauf der aktuellen Projektphase werden anhand der entwickelten Prototypen, verschiedene Varianten- und Sensitivitätsstudien durchgeführt, um so Empfehlungen für die Integration des Digitalen Zwillings zur Radverschleißprognose in den bestehenden RLM zu geben. Die systemseitige Implementierung wird auf Grundlage dieser Empfehlungen durch die DB AG erfolgen. Darüber hinaus werden Möglichkeiten und Anforderungen erarbeitet, diesen Ansatz perspektivisch auf andere Baureihen zu skalieren, für welche irregulärer Radverschleiß als verfügbarkeitseinschränkender Use-Case identifiziert wurde. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Lebensdauer von Radsätzen und ihrer Antriebsgruppen auch signifikant durch andere Einflussfaktoren wie bspw. Rollkontaktermüdung determiniert werden, welche in einem ganzheitlichen Digitalen Zwilling zu berücksichtigen sind. Insbesondere sind für ein umfassendes vorrausschauendes Instandhaltungsmanagement weiterer Use-Cases und ihre gegenseitigen Wechselwirkungen zu betrachten sowie die erforderliche Informationswertschöpfungskette hin zu

Informationen in geeigneter Qualität zu definieren. Es gibt einen Zielkonflikt zwischen dem Erreichen einer hohen Fahrzeugverfügbarkeit und dem Ausnutzen der individuellen Komponentenlebensdauer. Der Digitale Zwilling bietet eine praxistaugliche Möglichkeit, um für dieses Optimierungsproblem geeignete Kompromisslösungen als Handlungsempfehlungen zu generieren. Dies setzt eine umfassende, gesamtsystemische Anforderungsanalyse zu Beginn des Lebenszyklus des abgebildeten Objektes voraus, um wirtschaftlich relevante Use-Cases zu identifizieren und klar zu definieren.

Danksagung

Das Projekt wird im Rahmen einer wirtschaftlichen Forschungsdienstleistung seitens des Vorstandsressorts Digitalisierung und Technik der DB AG finanziert. Wir danken allen Beteiligten für die gute Zusammenarbeit im Projekt.

Literatur

[1] M. Szkoda und S. Magdalena, „Change in the maintenance strategy as a method of improving the efficiency of the process of operation of railway means of transport," in *MATEC Web Conf. Volume 234*, 2018.

[2] F. Braghin, S. Bruni und R. Lewis, „Railway wheel wear," in *Wheel–Rail Interface Handbook*, Woodhead Publishing, 2009, pp. 172-210.

[3] N. Bosso, M. Magelli und N. Zampieri, „Simulation of wheel and rail profile wear: a review of numerical models," in *Rail. Eng. Science 30*, 2022, p. 403–436.

[4] M. Z. Shaikh, Z. Ahmed, B. S. Chowdhry, E. N. Baro, T. Hussain, M. A. Uqaili, S. Mehran, D. Kumar und A. A. Shah, „State-of-the-Art Wayside Condition Monitoring Systems for Railway Wheels: A Comprehensive Review," in *IEEE Access, Vol. 11*, 2023, pp. 13257-13279.

[5] M. Palo, D. Galar, T. Nordmark, M. Asplund und D. Larsson, „Condition monitoring at the wheel/rail interface for decision-making support," in *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. 228(6)*, 2014, pp. 705-715.

[6] R. Stark, K.-D. Thoben, D. Gerhard, H. Hick und E. Kirchner, *WiGeP-Positionspapier: "Digitaler Zwlling",* 2020.

[7] DB Systemtechnik Fachabteilung TVE41, „MVB Testbericht Auslesen ET442 und 423," 2021.

[8] S. Staacks, S. Hütz, H. Heinke und C. Stampfer, „Advanced tools for ssmartphone-based experiments: phyphox," *Physics Education,* 2018.

[9] S. Hartmann, „Stochastische Optimierung von Eisenbahn-Radprofilen," Dissertation, 2019.

[10] H. Krause und G. Poll, „Wear of wheel-rail surfaces," in *Wear 113*, 1986, pp. 103-122.

[11] H. Schelle, „Radverschleißreduzierung für eine Güterzuglokomotive durch optimierte Spurführung," Dissertation, 2014.

[12] Y. Ye, Y. Sun, S. Dongfang, D. Shi und M. Hecht, „Optimizing wheel profiles and suspensions for railway vehicles operating on specific lines to reduce wheel wear: a case study," in *Multibody Syst Dyn 51*, 2021, p. 91–122.

Session 7

Sebastian Wilbrecht, Martin Ruscher, Michael Beitelschmidt, Arnd Stephan

Autoren

Wilbrecht, Sebastian

Seit 2015 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der TU Dresden, Professur Dynamik und Mechanismentechnik

Seit 2016 Dozent für Energiespeichersysteme in Schienenfahrzeugen an der Dresden International University

Seit 2019 Inhaber der Pioneta GmbH

2009 – 2015 Studium Maschinenbau, Kraftfahrzeug- und Schienenfahrzeugtechnik

Ruscher, Martin

Seit 2022 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der TU Dresden, Professur für Elektrische Bahnen

2014 – 2021 Studium Verkehrsingenieurwesen, Planung und Betrieb elektrischer Verkehrssysteme

IRSA 2023

SESSION 8

FAHRZEUGTECHNIK I

VEHICLE TECHNOLOGY I

Session 8
Christian Madritsch, Bertram Dumböck, Bernhard Kager

Intelligente Primärfederstufen - von der Zustandsüberwachung systemkritischer Bauteile hin zu Predictive Maintenance Konzepten

Madritsch, Christian[1], Dumböck, Bertram[1] und Kager, Bernhard[1]

[1]Engenium GmbH, Akkreditierte Prüfstelle nach EN ISO/IEC 17025, Bahnhofgürtel 59, 8020 Graz

Zusammenfassung

Die Engenium GmbH mit Sitz in Lieboch und Graz arbeitet seit 2019 an der Entwicklung und Umsetzung eines dreiachsigen Kraftsensors der einfach und auch nachträglich in einer Konusfeder der primären oder sekundären Federstufe integriert werden kann. Diese intelligente Feder ('smart component') ermöglicht es, Echtzeitdaten über Betriebskräfte sowie Alterungs- und Degradationserscheinungen zu erfassen und direkt weiterzuverarbeiten. Darüber hinaus können mit diesen Komponenten Untersuchungen zur Implementierung von Predictive Maintenance Konzepten durchgeführt werden.

Keywords: Primärfederstufe, Smart Components, Predictive Maintenance, Betriebslastkollektive, Smart Primary Spring, EIL-Engineering in the Loop , Digital Twin

1 Einleitung

Die Bestrebungen, das Schienenfahrzeug in seiner Gesamtheit digital zu erfassen (Digital Twin), haben in den letzten Jahren stark an Fahrt aufgenommen. Als sicherheitsrelevantes Bauteil wird die Primärfeder, speziell die primäre Konusfeder, bislang von der Zustandsüberwachung nicht erfasst. Neben den Aspekten der Entgleisungssicherheit, die in engem Zusammenhang mit der Varianz der Steifigkeiten über der Einsatzdauer steht, gibt es jedoch noch weitere wichtige Punkte, die mit einer smarten Primärfeder erfasst und bewertet werden könnten.

Die Engenium GmbH hat hier ein Konzept zur Umsetzung einer intelligenter Konusfeder entwickelt, mit der es möglich ist, die folgenden Fragestellungen zu untersuchen.

- Wie können realistische Betriebslastkollektive speziell für die primäre Federstufe ermittelt werden?
- Wie können festgestellte Änderungen in der Federcharakteristik für die jeweiligen Condition Monitoring Konzepte verwendet werden? - Steifigkeitsänderungen, Versagen, Degradation, chemische Alterungseffekte, Setzung ...
- Welche Extrapolationsverfahren sind für Predictive Maintenance Konzepte auf Realdatenbasis anwendbar?
- Wie können on-the-fly Belastungskenngrößen ermittelt werden, die in Zusammenhang mit dem Verschleiß gebracht werden? - track access charges
- Wie können Realdaten für Digital Twin Konzepte ermittelt werden?

Wesentlich an dem vorliegenden Konzept ist, dass eine Integration in fast alle gängigen Konusfederdesigns möglich ist, ohne das eine Änderung der Schnittstellen zu Drehgestell oder Achslagergehäuse erforderlich ist. Dem Schienenfahrzeugbetreiber oder auch -hersteller können damit Echtzeitdaten der Primärfedern einfach zur Verfügung gestellt werden.

2 Anforderungen an das Design von Primärfedern

Die Engenium GmbH entwickelt seit vielen Jahren Gummi-Metallbauteile für die Schienenfahrzeugindustrie, wobei unsere Designs weltweit bei allen namhaften Schienenfahr-

zeughersteller verbaut sind. Die hierfür von den Herstellern in den letzten Jahren erarbeiteten Spezifikationen sind sowohl hinsichtlich der Bauräume, als auch der Toleranzen der Kennlinien immer enger gefasst. Darüber hinaus gilt es, das Design neben diesen Randbedingungen so zu gestalten, dass die Bauteile die spezifizierten Lebensdauerprüfungen und vor allem die festgelegte betriebliche Einsatzdauer ertragen können.

2.1 Steifigkeiten

Die von der Lauftechnik vorgegebenen Zielwerte, z.B. für die vertikale Steifigkeit, sind teils in sehr engen Grenzen ($\pm 5 \, bis \, \pm 8\%$) gehalten. Durch Anwendung numerischer Verfahren in Kombination mit komplexen Materialmodellen, welche Besonderheiten wie den Mullin's Effekt oder viskoelastische Eigenschaften berücksichtigen, ist unser Unternehmen aktuell in der Lage, diese Produktanforderungen stets zu erfüllen.

Hier muss gesagt werden, dass sich die Steifigkeitswerte innerhalb der Betriebsdauer aufgrund unterschiedlicher Einflussfaktoren ändern und es hilfreich wäre, darüber exaktere Kenntnis zu haben, da die vertikale wie auch die radiale Steifigkeit einen großen Einfluss auf die Entgleisungssicherheit des Fahrzeuges hat. Mit den aktuellen Möglichkeiten ist die Erfassung solcher Daten nur mit erheblichem Aufwand möglich - die smarte Primärfeder stellt diese Daten in Echtzeit mit hoher Nutzbandbreite bereit.

2.2 Lebensdauer

Was die Lebensdauer der Gummi-Metall-Bauteile angeht, können vor allem kritische Bereiche durch entsprechende Optimierung und Designwahl sehr gut entschärft werden. Das Ziel unseres Unternehmens ist es, hier durch die Entwicklung und Anwendung neuer Schädigungshypothesen einen Beitrag zur Verbesserung der Lebensdauerprognose leisten zu können. Hierfür werden im Rahmen der Materialcharakterisierung Wöhlerlinien an speziellen Probekörpern ermittelt. Die so gewonnenen Haigh-Diagramme stellen die Grundlage für unsere Software DACA[1] dar, welche unterschiedliche Designs in relativ kurzer Rechenzeit hinsichtlich ihrer zu erwartenden Lebensdauer bewerten kann.

[1] DACA- Damage Calculation, ein von der Engenium GmbH entwickeltes Programm zur Schädigungsrechnung von mehraxial belasteten Elastomerbauteilen.

Die Lebensdauervorhersagen von metallischen Werkstoffen haben eine Aussagegüte erreicht, die vor einigen Jahrzehnten noch undenkbar schien. Im Bereich der elastomeren Werkstoffe ist die Vorhersagegüte weniger präzise, die Weiterentwicklung von entsprechenden Werkzeugen großteils nur im Bereich der Forschung angesiedelt. Für eine genauere Prognose der Lebensdauer sind aber vor allem Betriebslastdaten von höchster Bedeutung, speziell hinsichtlich mehrachsialer Schädigungsmechanismen. Die Ermittlung solcher Belastungsdaten war bislang nur durch sehr aufwändiger Messfahrten möglich - mit der instrumentierten Primärfeder können hier künftig mit geringstem Aufwand Lastkollektive ermittelt und für die Schädigungsrechnung zur Verfügung gestellt werden.

2.3 Dynamik

Ein weiterer Punkt, der in Zukunft sicherlich noch stärker im Zuge der Spezifikationen Berücksichtigung finden wird, ist das Thema des dynamischen Bauteilverhaltens. Im Hinblick auf die virtuelle Bauteilentwicklung ist hier noch ein gewisser Nachholbedarf erkennbar. Aktuell können, basierend auf Bauteilversuchen, die numerischen Modelle aber soweit angepasst werden, dass das Frequenzverhalten sehr gut getroffen wird.

Die hier vorgestellte intelligente Primärfeder ist in der Lage, die Datenbasis zur Ermittlung der dynamischen Steifigkeitswerte und weiterer relevanter Kenngrößen für die Fahrdynamik in Echtzeit zu liefern, beziehungsweise vorhandene Simulationsmodelle zu validieren.

Das Design und die Entwicklung dieser Bauteile beruht in den meisten Fällen auf Annahmen, Mehrkörpersimulationen (MKS) oder diverser Lastannahme-Modelle, in sehr seltenen Fällen auf Basis realer Messdaten. Hier setzt das vorliegende Projekt an. Ziel ist es, ohne großen Aufwand repräsentative Lastkollektive für primäre Konusfedern aber auch sekundäre Konusfedern (Zusatzfedern) zur Verfügung zu stellen, die in weiterer Folge den Schienenfahrzeugherstellern, -betreibern und Komponentenenherstellern und -entwicklern zu Gute kommen.

Konkretes Ziel unseres Unternehmens ist es, Bauteile künftig auf Basis realer Daten

auszulegen, treffsichere Schädigungshypothesen zur Verfügung zu stellen und dem Kunden die Datenbasis für die Ermittlung sicherheitskritischer Parameter, Wartungsintervalle und der Fahrzustandsdiagnose in die Hand zu geben.

3 Smart Primary Spring

Die oben dargestellten Punkte haben unser Unternehmen dazu veranlasst, ein Konzept für instrumentierte Federn zu entwickeln und erste Prototypen mit unserem Projektpartner Metalocaucho MTC (a Wabtec Company) herzustellen. Es handelt sich um ein bestehendes Bauteil, welches, mit einem nachträglich integrierten Sensorelement, die folgenden primären physikalischen Größen erfassen kann:

- Kräfte auf die Feder in drei Raumrichtungen $F_x(t)$, $F_y(t)$ und $F_z(t)$
- Federhöhe in vertikaler Richtung $d_z(t)$
- Temperatur $T_(t)$

Dadurch können in weiteren Schritten beispielsweise die folgenden sekundären Größen bestimmt werden:

- dynamische Federsteifigkeit $c_z(A, \omega)$
- interne und externe Kräfte,
- Lastkollektive, Laufzustände, ...

3.1 Prototypenserie

Für Messfahrten wurden die in Abbildung 1 dargestellten Primärfedern der Firma MTC in unserem Haus mit Sensorik ausgestattet. Die spezielle Auslegung der Sensorteile erfolgte mittels FEM-Berechnung und der Optimierungssoftware CUBE [2].

[2]CUBE, ein von der Engenium GmbH entwickelter Algorithmus für die Verschaltungsoptimierung von hochdynamischen Messradsätzen.

Abbildung 1: Instrumentierte Primärfedern vor der ersten Installation

Für die Prüfstandsversuche, die zur Kalibrierung der Federn notwendig sind, wurde zusätzlich zu den instrumentierten Federn eine Auswerteeinheit entwickelt, die es ermöglicht, die Sensordaten während der Kalibrierung auf sehr einfachen Wege aufzuzeichnen (plug and play).

3.2 Laborkalibrierung

MTC verfügt über einen leistungsfähigen Dreiachsprüfstand, der die erforderlichen Kräfte zur Kalibrierung der Federn aufbringen kann. In einem Vorläuferprojekt wurde bereits ein Programm definiert, welches im Laufe der aktuellen Kalibrierung an allen vier Versuchsfedern durchgeführt wurde. Die Kalibrierung umfasst die folgenden Schritte:

- Versuchsdurchführung
  - Messung der n Sensorsignale $\mathbf{S} \in \mathbb{R}^n$
  - Messung der m Maschinensignale (Kraft, Weg) $\mathbf{M} \in \mathbb{R}^m$
- Kompensation der Richtungsabweichung (bedingt durch die Montage)

- Festlegen der o Initial-Kalibrierparameter $\mathbf{P_o} \in \mathbb{R}^o$
- Optimierung der Kalibrierparameter durch Fehlerminimierung über die Kalibrierfunktion $\hat{\mathbf{M}} = \mathbf{F}(\mathbf{S}, \mathbf{P_i})$, sodass bei $\mathbf{P_{opt}}$ der Ausdruck $|\hat{\mathbf{M}} - \mathbf{M}| = |\mathbf{F}(\mathbf{S}, \mathbf{P_{opt}}) - \mathbf{M}|$ minimal wird.

Abbildung 2 zeigt eine Messfeder der ersten Prototypenserie auf dem Prüfstand.

Abbildung 2: Messfeder auf der Dreiachsprüfmaschine

Durch Anwendung der Kalibrierfunktion mit den zugehörigen Kalibrierparametern können nun die Sensorsignale zu Kraftgrößen verrechnet werden.

3.3 Messkampagne

Mit Hilfe unseres Projektpartner konnte ein Betreiber gefunden werden, der sich bereiterklärt hat, unsere Technologie im Feldversuch zu testen. Um neben den Messsignalen unserer Prototypen noch weitere Messgrößen zu deren Validierung zur Verfügung zu haben, wurde das Drehgestell mit zusätzlicher Sensorik ausgestattet (siehe Abbildung 3).

Diese zusätzliche Sensorik erlaubt die Messung von Beschleunigungen, Federwegen,

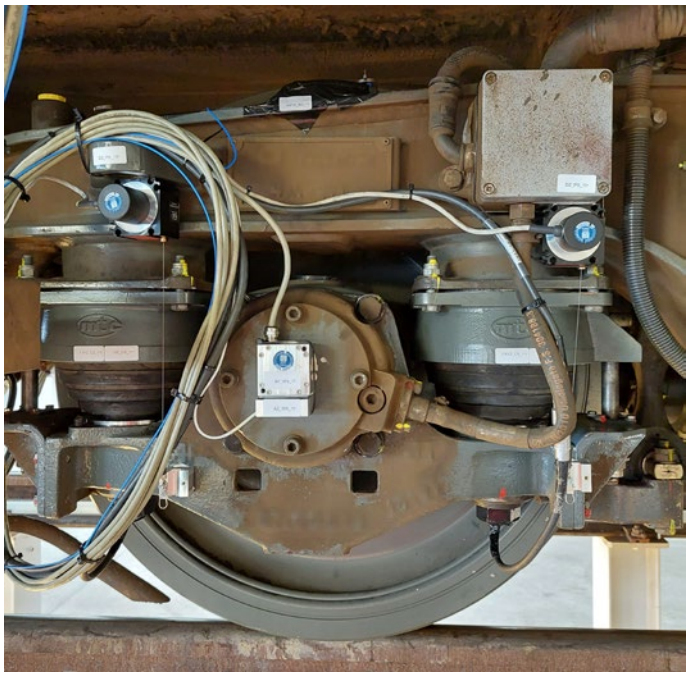


Abbildung 3: Zusätzliche Sensorik im Bereich der Messfedern

GPS-Positionen, Geschwindigkeit und Drehraten. Die befahrene Strecke hatte eine Vielzahl kleiner Bögen mit unterschiedlicher Überhöhung und stellt für unser Vorhaben eine sehr interessante Ausgangslage dar. Während der Testfahrten wurde die Strecke drei Mal in beide Richtungen befahren.

Abbildung 4 zeigt die Überwachung der Sensorsignale während der Messfahrten durch die in unserem Unternehmen entwickelte Messsoftware ACQUA [3].

3.4 Ergebnisse

Generell kann durch die Testfahrten gezeigt werden, dass die instrumentierten Federn ihren Anforderungen gerecht werden. Die Betriebsmessung liefert, unter Anwendung der zugehörigen Kalibrierparameter, Kraftgrößen, die mit den Daten der zusätzlich applizierten Sensoren validiert werden konnten.

[3] https://www.engenium.at/ingenieurbuero/messtechnik/software

Abbildung 4: Messprogramm ACQUA während der Messkampagne

3.5 Gemessene Kräfte

Die räumliche Kraftsituation kann mit ausreichend hoher Dynamik dargestellt werden, die Abbildungen 5 bis 7 zeigen neben Geschwindigkeit und Krümmung die normierten Kraftgrößen in der jeweiligen Raumrichtung für ein und denselben Streckenabschnitt.

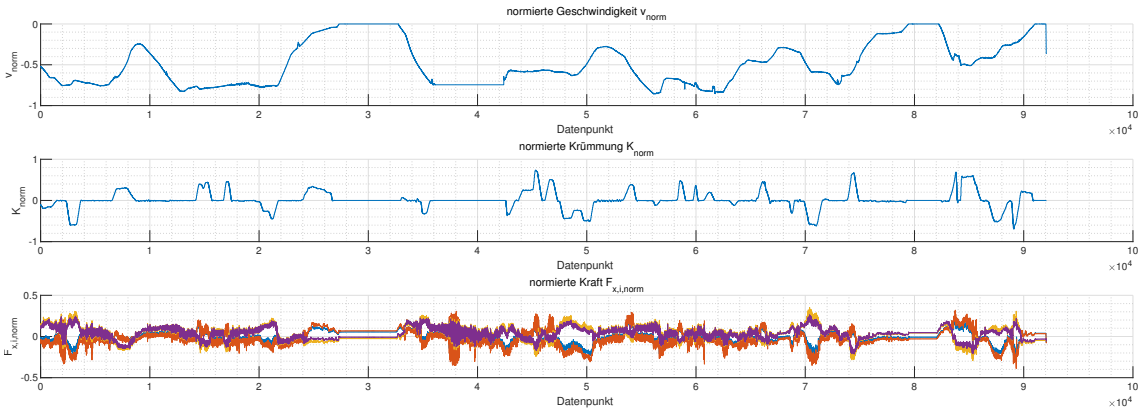


Abbildung 5: Normierte Kräfte F_x in einem Teilabschnitt der Messung

Beispielhaft ist die Belastungssituation auf die erste Feder bei der oben dargestellten Messung in der Abbildung 8 abgebildet. Es zeigt, dass Überlagerungen der maximalen Kräfte in allen Raumrichtungen, wie sie in den Spezifikationen häufig für die Bewertung gefordert ist, im Realbetrieb in der Regel nicht auftreten.

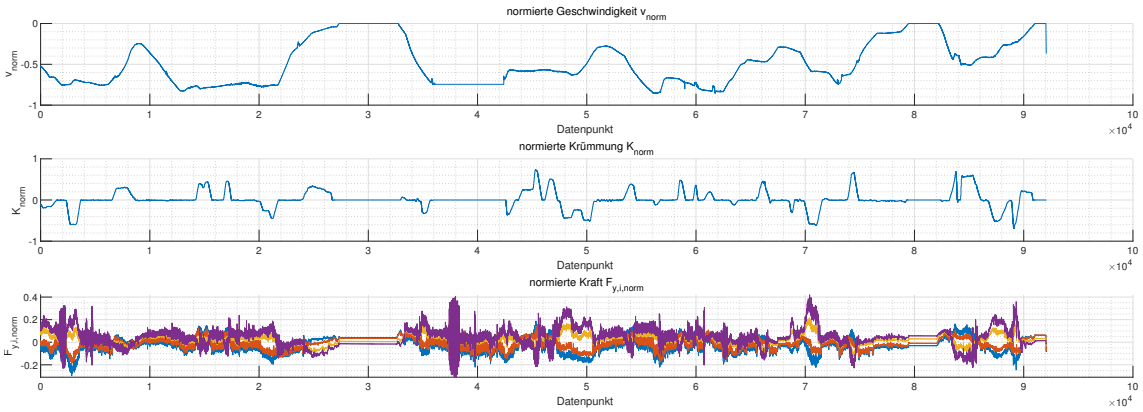


Abbildung 6: Normierte Kräfte F_y in einem Teilabschnitt der Messung

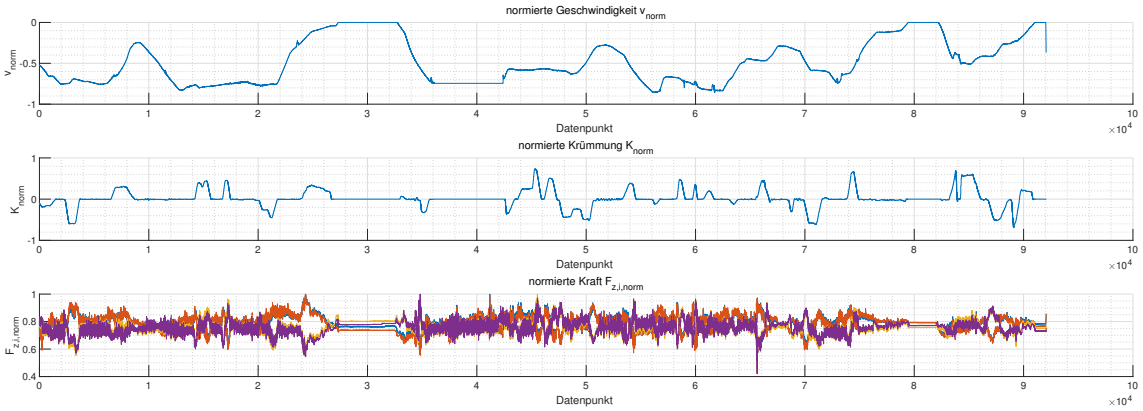


Abbildung 7: Normierte Kräfte F_z in einem Teilabschnitt der Messung

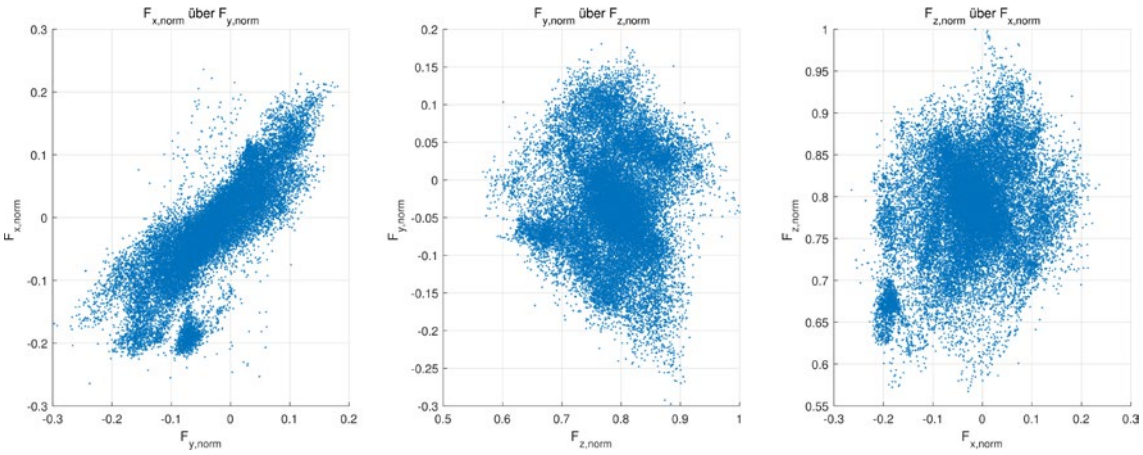


Abbildung 8: Normierte, räumliche Belastungssituation auf eine der Primärfedern

3.6 Dynamische Steifigkeit

Aus den Messdaten der instrumentierten Feder können die dynamischen Werte der Vertikalsteifigkeit sehr einfach berechnet werden. Dies ist vor allem für die fahrdynamische Auslegung von großem Interesse, zudem können hier die Simulationsmodelle der Mehrkörperdynamik noch deutlich verbessert werden.

Die Abbildung 9 zeigt den Anstieg der vertikalen Steifigkeiten über der Anregungsfrequenz.

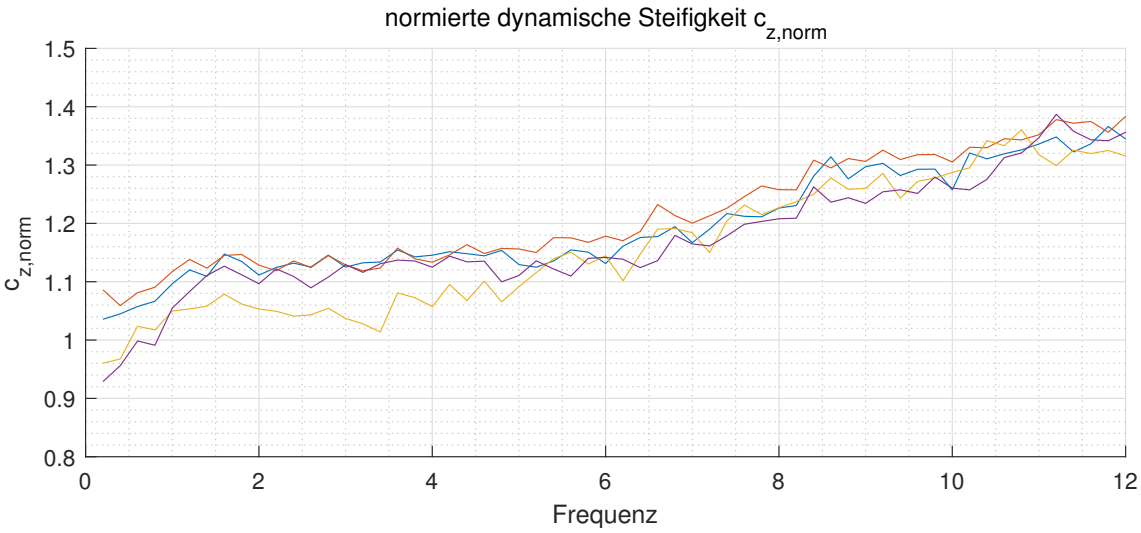


Abbildung 9: Normierte, dynamische Steifigkeiten der Primärfedern

3.7 Resonanzeffekte

Ein interessanter Aspekt der Messung war die Feststellung, dass mehrmals an neuralgischen Punkten, vermutlich aufgrund der Gleislage, Resonanzerscheinungen am Drehgestell festgestellt werden konnten, die aber von den Personen im Fahrgastraum nicht wahrnehmbar waren.

Abbildung 11 zeigt beispielsweise einen Streckenabschnitt mit höherer Geschwindigkeit bei Geradeausfahrt, wo ebendieser Resonanzeffekt auftritt. im unteren Bild ist ein Detailausschnitt des markierten Bereiches dargestellt.

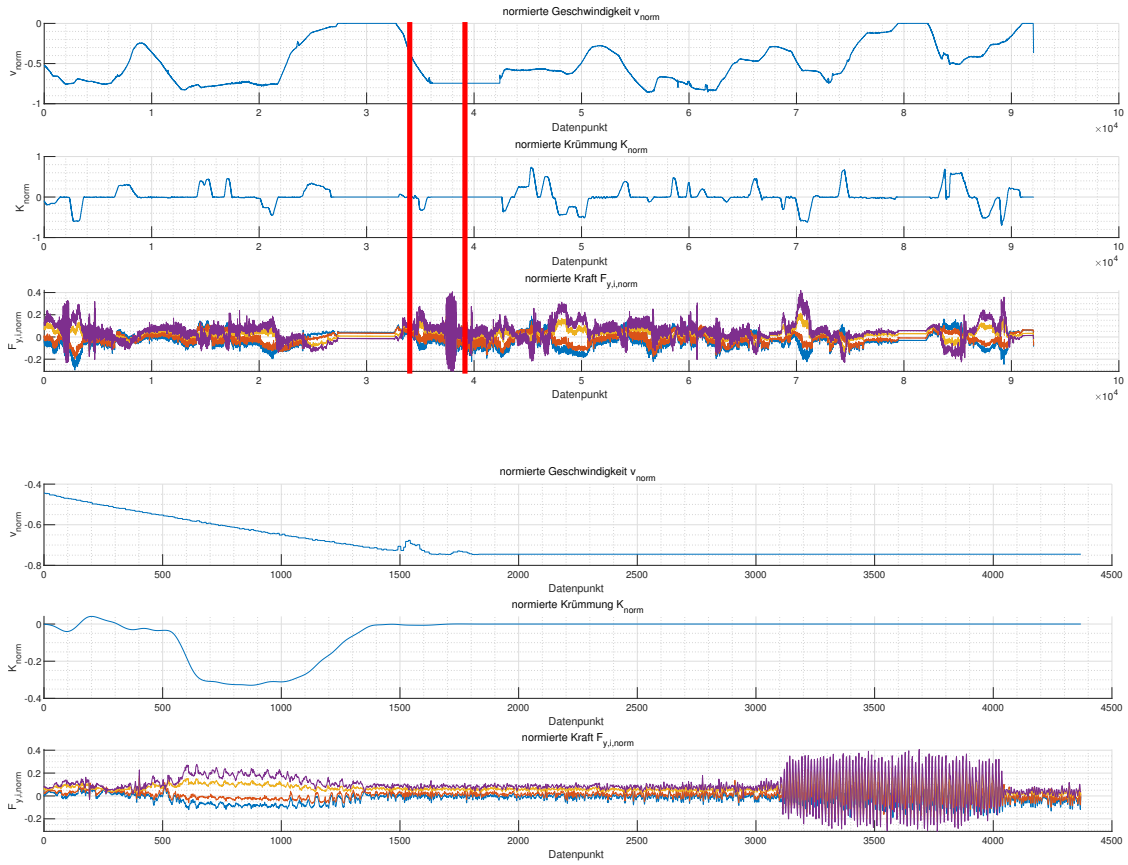


Abbildung 10: Normierte Kräfte F_y mit Detailausschnitt

4 Weiteres Vorgehen

Die ersten Ergebnisse zeigen, dass die Sensorfedern ihren Anforderungen gerecht werden und präzise Ergebnisse der in der Feder wirkenden Kräfte liefern. Durch die Messung wurde auch deutlich, dass, je nach angewandtem Messsystem, auch hochdynamische Effekte messbar sind, die dem Schienenfahrzeugbetreiber oder -hersteller für weitere Untersuchungen und Optimierungen zur Verfügung gestellt werden können.

Unser Unternehmen ist nun bemüht, das Konzept kontinuierlich zu verbessern und auch speziell bei autonomen Langzeitmessungen einzusetzen. Damit können in Zukunft auch zeitliche Effekte wie Degradation und Versteifung der elastomeren Federungselemente ermittelt und eventuelle Problemstellen hinsichtlich des dynamischen Laufverhaltens detektiert werden.

5 Künftige Anwendungsfelder

Unser Unternehmen wird mit den gewonnenen Daten in Zukunft in erster Linie neue Festigkeitshypothesen zur Beschreibung der Schädigungsmechanismen bei mehrachsial belasteten Elastomerbauteilen untersuchen und validieren. Für unsere Kunden ergibt sich aber eine Vielzahl von Möglichkeiten, diese Daten für ihre Zwecke zu nutzen.

5.1 Ermittlung von repräsentativen Lastkollektiven

Bei der Auslegung von neuen Komponenten kann mit dieser Technologie künftig auf repräsentative Daten für die Ermittlung von Lastkollektiven zurückgegriffen werden. Mitunter soll dies dazu führen, dass Bauräume optimal genutzt werden und Material ressourcenschonender zum Einsatz kommt.

5.2 Verbesserung von neuen Schädigungshypothesen

Unser Unternehmen verfolgt die Strategie des Engineering in the Loop (EIL). Wir verstehen darunter die kontinuierliche Validierung von Engineering Konzepten, speziell durch Messkampagnen, um gegebenenfalls auf Basis dieser Daten eine kontinuierliche Systemverbesserung zu erreichen.

Im Hinblick auf eine verbesserte Prognosegüte der Schädigungsrechnung von Gummi-Metall-Bauteilen ermöglichen uns die Daten der intelligenten Primärfeder die von uns angewandten Schädigungshypothesen auf Basis von realen Lastkollektive nachzuschärfen. Ziel hierbei ist es, die Prognosemodelle noch treffsicherer zu gestalten.

5.3 Systemkritische Parameter für die Fahrdynamik

Die Entgleisungssicherheit von Schienenfahrzeugen ist in einem hohen Maß von den Kennwerten der Federelemente abhängig. Hier spielen die zeitliche Versteifung und Degradation durch Umwelteinflüsse eine wesentliche Rolle. Mit dem vorgestellten Messsystem können diese Parameter erstmals während des Betriebs in Echtzeit ermittelt, kontrolliert und bewertet werden.

Die Datenbasis ermöglicht hier auch eine Überwachung von Zeiteffekten, die sonst nur zu bestimmten diskreten Wartungsintervallen ermittelt werden können. Darüberhinaus können die für die Fahrdynamiksimulation notwendigen relevanten Parameter künftig einfacher zur Verfügung gestellt werden.

5.4 Track Access Charges

Durch die ersten Feldversuche sind wir zuversichtlich, dass das System auch für die Beurteilung der vom Fahrzeug verursachten infrastrukturseitigen Schädigung zum Einsatz kommen wird. In Hinblick auf eine verursachensgerechte Zuteilung der Kosten wird hier noch stärker zu unterscheiden sein, welche Fahrzeugkonzepte hohen bzw. geringen Verschleiß an der Infrastruktur verursachen.

5.5 Infrastruktur / Planung von Sanierungen

Die Engenium GmbH bietet für die Kunden aus der Schienenfahrzeugbranche autonome Messungen im regulären Passagierbetrieb an, die es ermöglichen, Daten aus dem realen Betriebseinsatz zu ermitteln. Damit können beispielsweise Effekte wie die oben gezeigten Resonanzerscheinungen detektiert und verortet werden.

Auf Basis dieser Datenlage kann die Planung von notwendigen Infrastrukturmaßnahmen priorisiert und eine zeitnahe Umsetzung konkreter Sanierungsmaßnahmen ermöglicht werden. Das rollende Material und die Infrastruktur wird somit durch Predective Maintenance Konzepte proaktiv hinsichtlich ihrer Lebensdauer optimiert.

Abbildung 11 zeigt für einen Streckenausschnitt die oben beschriebenen Resonanzen nach der Intensität ihres Auftretens, Abbildung 12 zeigt einen Detailausschnitt.

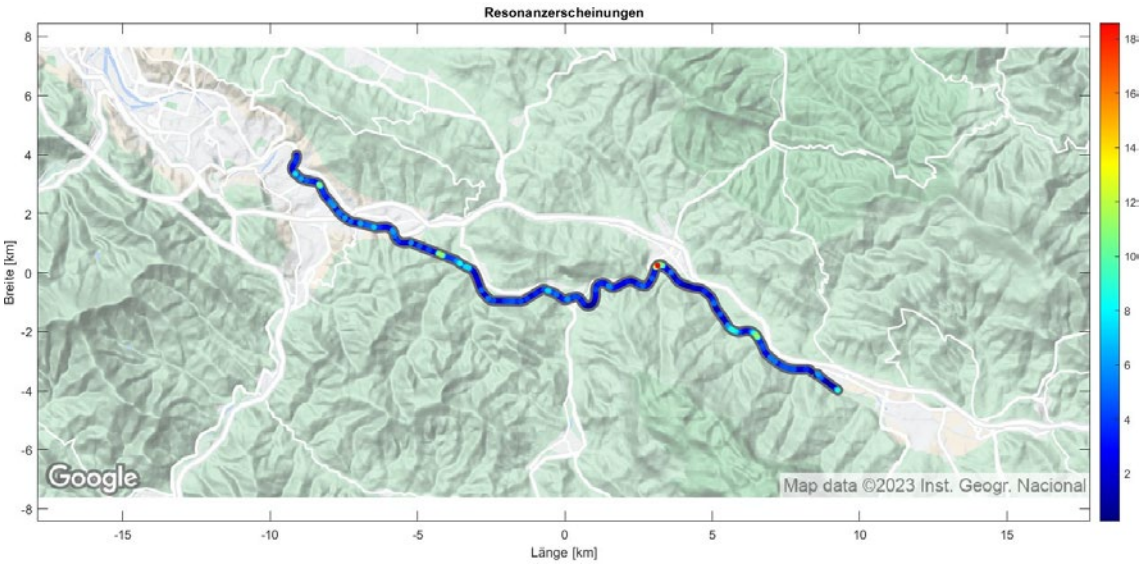


Abbildung 11: Resonanzbereiche nach Intensität und örtlichem Auftreten

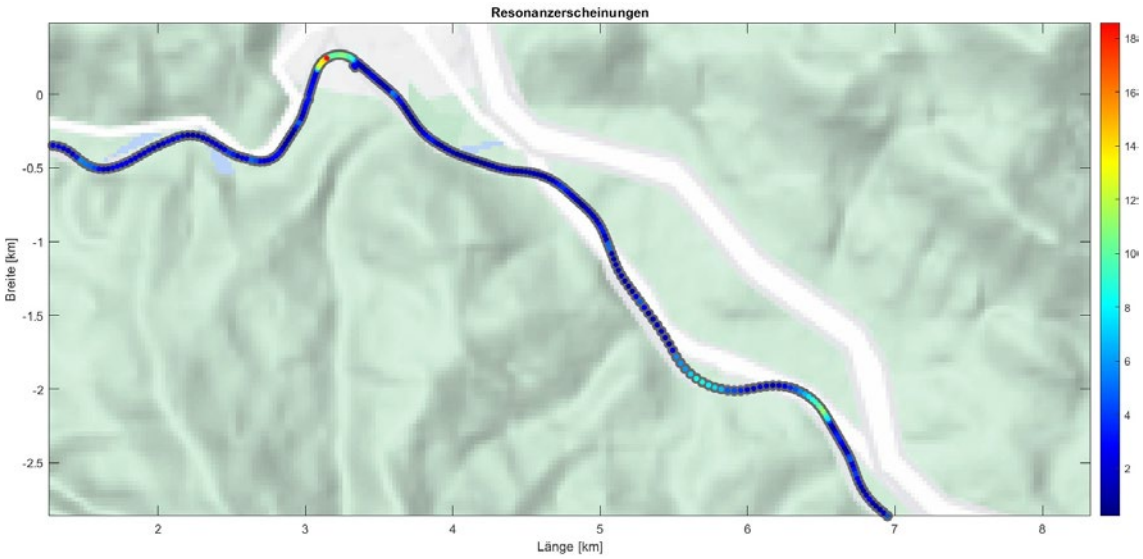


Abbildung 12: Resonanzbereiche nach Intensität und örtlichem Auftreten, Detail

5.6 Predictive Maintenance Konzepte

Die Bemühungen unseres Unternehmens zielen auf eine solide Auslegung von Gummi-Metall-Bauteilen ab, die für einen möglichst langen betrieblichen Einsatz im Schienenfahrzeug geeignet sind. Die smarte Primärfeder liefert hierfür die Datenlage über den aktuellen Zustand der Feder und die zugehörige Lastkollektive, somit wird in Hinkunft

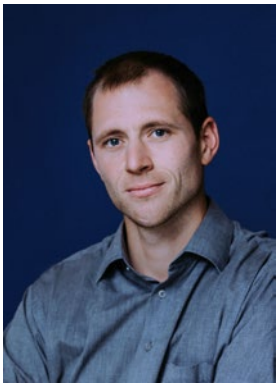
auch ein detaillierteres Extrapolations-Prognosemodell für die Festlegung von optimalen Tauschintervallen möglich sein.

Danksagung

Wir bedanken uns bei unseren Partner, die an diesem Projekt beteiligt waren, insbesondere bei Mikel Zubillaga und Yon Cabrera der Firma Metalocaucho MTC in Spanien.

Session 8
Christian Madritsch, Bertram Dumböck, Bernhard Kager

Madritsch, Christian
Christian Madritsch hat an der Technischen Universität Graz Maschinenbau-Wirtschaft studiert und ist Experte für das Thema Elastomersimulation und Entwicklung von Gummi-Metallbauteilen, wie sie in Schienenfahrzeugen zur Anwendung kommen. Als Geschäftsführer der Engenium GmbH, die neben dem Ingenieurbüro auch als Püfstelle nach ISO 17025 für die Messungen an Schienenfahrzeugen akkreditiert ist, koordiniert er die strategische Ausrichtung des Unternehmens.



Dumböck, Bertram
Bertram Dumböck hat an der Technischen Universität Graz Technische Physik studiert und hat sich hier speziell auf die Umsetzung messtechnisch herausfordernder Problemstellungen aus dem Bereich Schienenfahrzeugtechnik konzentriert. Unter seiner Führung wurde die in unserem Unternehmen verwendete Messsoftware ACQUA entwickelt, wie auch der Echtzeitalgorithmus zur Berechnung der Rad-Schiene-Kräfte von hochdynamischen Messradsätzen.

Kager, Bernhard
Bernhard Kager leitet den Bereich R&D der Engenium GmbH und hat an der Technischen Universität Graz Maschinenbau-Wirtschaft studiert und in weiterer Folge im Bereich Computational Mechanics promoviert. Eines seiner Fachgebiete ist die Simulation von komplexem Werkstoffverhalten. Darüber hinaus ist auch er als allgemein beeideter und gerichtlich zertifizierter Sachverständiger der Fachgebiete Finite Elemente und Mechatronik tätig.

Session 8
Bernhard Lichtberger

Gleis-Instandhaltungsmaschinen auf dem Weg zur Autonomie

Lichtberger, Bernhard

System7 railsupport GmbH

Zusammenfassung

Anhand des Stopfroboters 4.0 wird der derzeitige Stand der Automatisierung im Bereich von Gleisinstandhaltungsmaschinen dargestellt. Die Entwicklung des vollhydraulischen Stopfantriebes mit Sensoren zur Bestimmung der Schotterbettparameter ist eine der Voraussetzungen für autonome Stopfmaschinen. Fernbedienung, Selbstdiagnose, automatische Fehleranalyse und Vollautomatisierung sind weitere Bedingungen für autonom arbeitende Maschinen. Überwachtes und unüberwachtes Lernen ist ein bedeutendes Hilfsmittel zur Beurteilung der Arbeitsqualität und der präzisen Positionierung.

Keywords: Autonome Instandhaltungsmaschinen, Künstliche Intelligenz, Fernbedienung, Remote Control, Digitalisierung, RTK-GNSS, Vollhydraulischer Stopfantrieb

1 Gleisbaumaschinen

Zum Neubau und Instandhaltung von Gleisanlagen existiert eine Vielfalt mechanisierter und automatisierter Gleisbaumaschinen. Neben Stopfmaschinen, die die Gleislage berichtigen, gibt es Maschinen, die den Schotter reinigen, planieren oder stabilisieren. Für alle Aspekte des Gleises, den Umbau, die Planumsverbesserung oder die Schienenbearbeitung stehen weitere mechanisierte Verfahren zur Verfügung.

Der Fachkräftemangel sorgt zusehends bei Baufirmen zu Problemen geeignetes Personal zu finden und zu schulen. Diese Bedingungen begünstigen die Entwicklung automatisch und autonom arbeitender Oberbaumaschinen. Automatisch arbeitende Maschinen benötigen weniger Training und eine geringere Qualifikation des Maschinenpersonals. Autonome Maschinen bedürfen keiner menschlichen Führung. Von einem zentralen

Leitstand aus werden mehrere Maschinen überwacht. Intelligente Automationssysteme lösen Fehler und unbekannte Problemstellungen eigenständig. Die Zugsicherung und Zugführung mit ETCS ist einer der großen Bausteine für die Überstellung zur und von der Baustelle. Diese Technologie der Vollbahnen wird, sobald sie einsatzbereit ist, übernommen. Ab 2025 sollen die ersten autonomen Züge im Fernverkehr in Betrieb gehen [1].

Die vorliegende Arbeit gibt einen Überblick über die Ziele autonomer Gleisbaumaschinen, den Stand der Digitalisierung und Automatisierung sowie Ansätze der Anwendung maschineller Intelligenz. Detailliert wird auf die Automatisierung des Stopfvorgangs und den Einsatz Künstlicher Intelligenz zur automatisierten Qualitätsüberprüfung der Stopfarbeit eingegangen. Die absolute Führung der Maschinen, vollautomatische Vorfahrt und Steuerung der Arbeitsaggregate und umfassende Fernsteuerung und Fernkontrolle sind Voraussetzungen künftiger autonom arbeitender Maschinen.

2 Ziele autonomer Gleisinstandhaltungsmaschinen

Autonom bedeutet selbstverantwortlich, selbständig und unabhängig zu funktioniere. Das setzt intelligentes maschinelles Verhalten voraus: Maschinen reagieren auf neue unbekannte Probleme selbstständig und sinnvoll. Ziele autonomer Gleisinstandhaltungsmaschinen sind:

- Erhöhung der Effizienz und Leistungsfähigkeit
- Erhöhung der Arbeitsqualität
- Reduktion der Personal- und Lebensdauerkosten
- Reduktion der Investitionskosten
- Vermeidung menschlicher Fehler

Maschinen ermüden nicht, sind emotionslos und nicht durch widersprüchliche, menschliche Verhaltensweisen geprägt. Menschliche Fehler und Ungenauigkeiten sind ausgeschlossen. Autonome Maschinen arbeiten auf der Basis von Messwerten, von Regeln und von gelernten, sich selbst verbessernden Funktionen, die auf objektiven Messdaten basieren. Sie sind gegenüber Umweltbedingungen, wie Lärm, Staub, Hitze, Kälte und Luftfeuchtigkeit weniger anfällig als der Mensch. Für den Menschen spielen Ergonomie, einfache intuitive graphische Bedieneroberflächen eine entscheidende Rolle. Eine ungesunde Körperhaltung lässt den Menschen ermüden, mindert die Konzentrations- und Leistungsfähigkeit – einer Maschine sind diese Probleme unbekannt.

Eine autonome Maschine muss weder motiviert werden noch kommen abfallende Leistungskurven wegen belastender Konflikte vor. Die Arbeitsqualität bei autonomen Maschinen ist von konstanter Qualität und unabhängig von individuellen Fähigkeiten, Charakter oder emotionaler Stimmung. Maschinen kennen keinen Arbeitsschutz, keine Schichtwechsel. Gleisstopfmaschinen lernen durch Training ihre Entscheidungen zu verbessern. Durch die Korrektur der Maschinenentscheidungen, basierend auf menschlichem Wissen, Erfahrungen und Wertungen wird die Maschine kalibriert. Deep-Learning Netzwerke beschleunigen den Erfolg auf dem Weg zum autonomen Arbeiten. Die Spurführung der Eisenbahnfahrzeuge beschränkt die Entscheidungsmöglichkeiten und erleichtert dadurch die Entwicklung autonomer Maschinensysteme. Nachteilig an autonomen Maschinen ist die Unterlegenheit Intelligenz und Lösungskompentenz bei unerwarteten Problemen gegenüber Menschen.

3 Digitalisierung, Automatisierung und maschinelle Intelligenz

Zu den Technologien des Industriezeitalters 4.0 zählen das Internet der Dinge (IoT Internet of Things), Big Data Analysis (BDA Big Data Analytics), Cloud Computing (CC), Digitale Zwillinge (DT Digital Twins), Cyber-physische Systeme (CPS Cyber Physical Systems), Building Information Modeling (BIM) und Künstliche Intelligenzanwendungen (AI Artificial Intelligence) [2].

Abbildung 1: Stopfroboter 4.0; Quelle: Fa. System7 rail GmbH.

Parallel zu den kontinuierlichen Fortschritten in der KI setzten sich Breitband-Netze und allgegenwärtige Konnektivität, eingebettete Sensoren sowie Fortschritte bei Big-Data-Verarbeitungstechniken und Cloud Computing durch. Der Stopfroboter 4.0 ist voll digitalisiert. Abbildung 1 zeigt ein Foto der Maschine.

3.1 Die Automatisierung des Stopfvorgangs

Der 2014 erfolgreich in den Markt eingeführte vollhydraulische System7-Stopfantrieb revolutionierte das Stopfen [3]. Das mehr als 60 Jahre alte, mechanische Stopfen mit Exzentervibration wurde durch ein messbasiertes automatisch auf den Schotterzustand abgestimmtes Verdichten abgelöst. Vibration und Beistellen werden vollhydraulisch erzeugt, elektronisch geregelt und gesteuert. Druck und Verdichtweg werden kontinuierlich gemessen, woraus Schotterbetthärte, -steifigkeit, -dämpfung und Verdichtkraft ermittelt werden. Jeder einzelne Stopfzylinder wird unabhängig geregelt, optimiert auf die lokalen Schotterverhältnisse und begrenzt die Belastung des Schotters auf ein Mindestmaß.

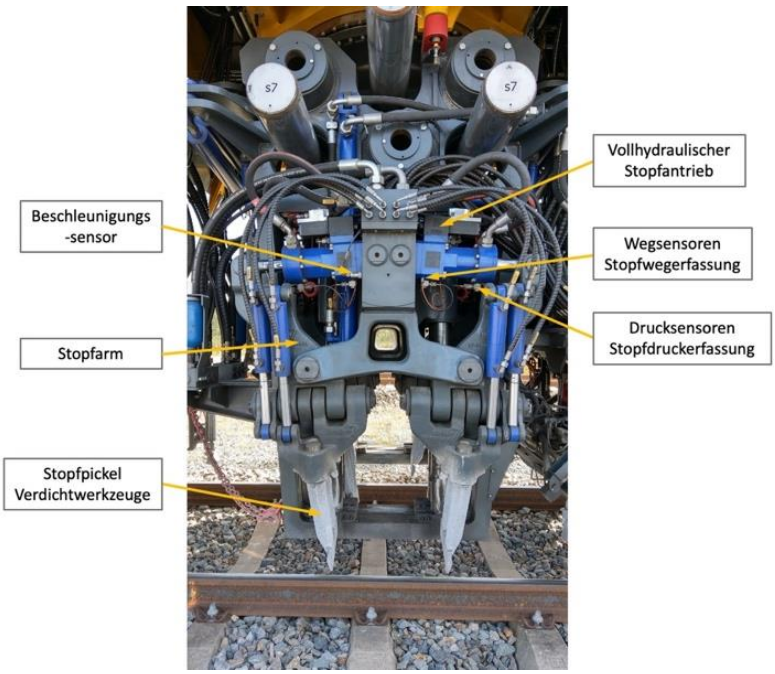


Abbildung 2: s7-Weichenstopfaggregat mit vollhydraulischem Stopfantrieb und Messsensorik

Abbildung 2 zeigt das Stopfaggregat mit vollhydraulischem Stopfantrieb und Sensorik. Aus dem reinen Arbeitsaggregat wird ein die Schottereigenschaften erfassendes Messgerät. Aus dem Verdichtkraftverlauf ermittelt die Maschine automatisch die optimale Verdichtung.

Dieses neue vollhydraulisch arbeitende Stopfsystem liefert die Grundlage für die Automatisierung der Stopfung. Aus dem Verdichtkraftverlauf wird die Bettungshärte (normierte Verdichtungsenergie) errechnet. Je höher die Bettungshärte ist, um so größer

ist die Verschmutzung. Dies gilt ebenfalls für die Schotterbettsteifigkeit. Sie wird aus der Tangente des Verdichtkraftanstiegs errechnet. Abhängig von den gemessenen Schotterbettverhältnissen wählt die Maschine die optimalen Stopfparameter. Dies betrifft die Tauch- und Beistellgeschwindigkeit und den Stopfdruck in verschiedenen Stopfmoden (Mehrfachstopfen, Design Stopfen etc.). Jeder Stopfantrieb beendet die Stopfung individuell, wenn die optimale Verdichtung erreicht ist und schaltet automatisch die Vibration ab.

Damit ist die Grundlage für eine automatische Stopfung gelegt. Umfangreiche Messungen beweisen, dass die System7 Automatikstopfung zu einer Verlängerung der Haltbarkeit der Gleislage um durchschnittlich 30% führt. Die Untersuchungen weisen optimale Stopfzeiten, statistisch um 0,7s verteilt, nach. Stopfmaschinen mit dieser Technologie erhöhen die Gleislagequalität, reduzieren die Stopfeinsätze und weisen eine höhere Arbeitsgeschwindigkeit auf.

3.2 Einsatz Künstlicher Intelligenz zur automatisierten Qualitätsprüfung der Stopfarbeit

Autonom arbeitende Maschinen benötigen die automatische Beurteilung der Qualität der durchgeführten Arbeit. Dazu wurde unüberwachtes Lernen eingesetzt.

Das Stopfergebnis wird durch das Deep Learning Programm dahingehend beurteilt, ob das Resultat der Arbeit innerhalb des vorhergesagten Ergebnisses mit Unschärfen des trainierten KI-Programms liegt. Damit wird die Arbeitsweise der Maschine überwacht und es werden Hinweise gegeben, wenn es sich verschlechtert oder ungenügend ist. Gründe können sein: Fehlfunktionen oder Störungen an Hydraulikventilen, Störungen des Maschinenmesssystems, sich veränderndes Regelverhalten der Hebe-Richt-Anlage etc.

Abbildung 3 zeigt das Prinzip des verwendeten unsupervised KI-Programms. Es nutzt den Höhenfehler eines bekannten Gleisabschnitts als Eingangssignal, bezeichnet als „Vor der Arbeit“ (1). Das Encoder-Netz (2) analysiert das Eingangssignal und unterteilt es in Signalbestandteile, gewichtet nach deren Relevanz für das Gesamtsignal (3). Dominante Wellenlängen erhalten eine höhere Gewichtung als Wellenlängen mit einem geringen Beitrag. Das durch mehrere Schichten des Encoder-Netzes encodierte Signal wird direkt an ein Decoder-Netz (4) und parallel dazu an ein weiteres, tiefes neuronales Netz (Deep Neural Network - DNN) (6) weitergeleitet.

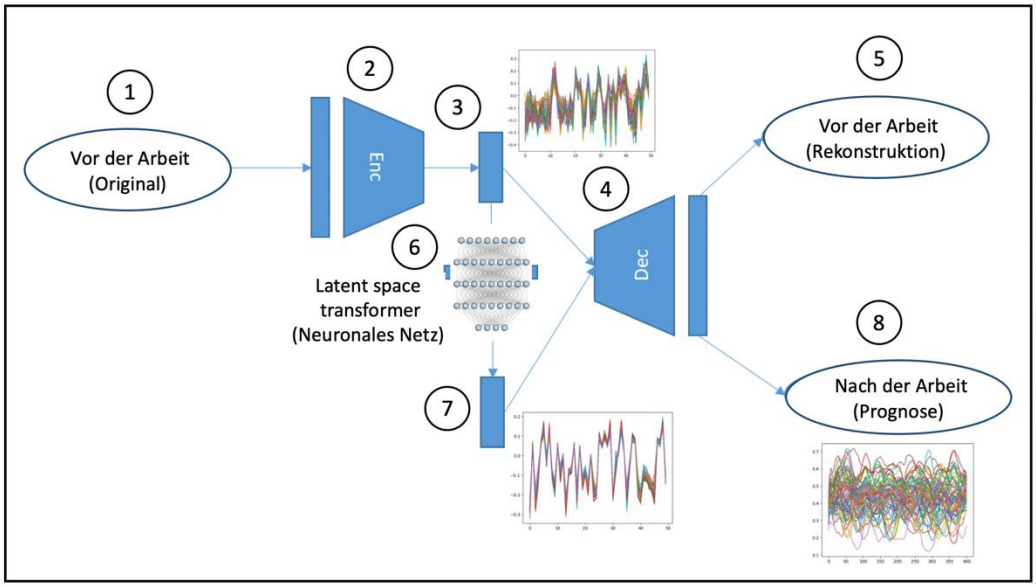


Abbildung 3: Unsupervised KI-Programm zur Vorhersage von Arbeitsergebnissen des Stopfroboters; Quelle: System7 rail GmbH.

Das Decoder-Netz (4) setzt die einzelnen Signalbestandteile nach deren Gewichtung wieder zusammen und errechnet ein Ausgabesignal. In Schritt (5) wird eine Ausgabe „vor der Arbeit“ generiert, die dem Eingangssignal „vor der Arbeit“ so gut wie möglich entsprechen soll. Je stärker diese Ausgabe von der ursprünglichen Eingabe abweicht, desto schlechter funktioniert die Encoder-Decoder-Pipeline (3). Dieser Vergleich wird durch eine Kostenfunktion bzw. Bewertungsfunktion abgebildet, die die Differenzen zwischen dem Eingangssignal „vor der Arbeit“ und dem Ausgangssignal „vor der Arbeit“ bildet. Mithilfe dieser Kostenfunktion und der vorab nicht bewerteten Trainingsdaten werden Encoder- und Decoder-Netz trainiert.

Um eine Prognose des zu erwartenden Höhenfehlers für den gewählten Gleisabschnitt „nach der Arbeit“ zu erhalten, wird das Signal durch das DNN (6) transformiert, bevor es dem Decoder-Netz übergeben wird. In Schritt (7) entsteht eine abgewandelte Repräsentation der Daten, die in Folge an das Decoder-Netz (4) übergeben werden. Das Decoder-Netz errechnet die Prognose des Höhenfehlers „nach der Arbeit“ als Ausgangssignal (8). Das DNN (6) wird ebenfalls unüberwacht trainiert. Der Trainingsdatensatz besteht neben dem Höhenfehler „vor der Arbeit“ noch aus den aufgezeichneten Ergebnissen, also den Resthöhenfehlern „nach der Arbeit“. Aus den gesamten zur Verfügung stehenden Trainingsdatensätzen wird ein Teil (5%-10%) zur Validierung des DNN verwendet.

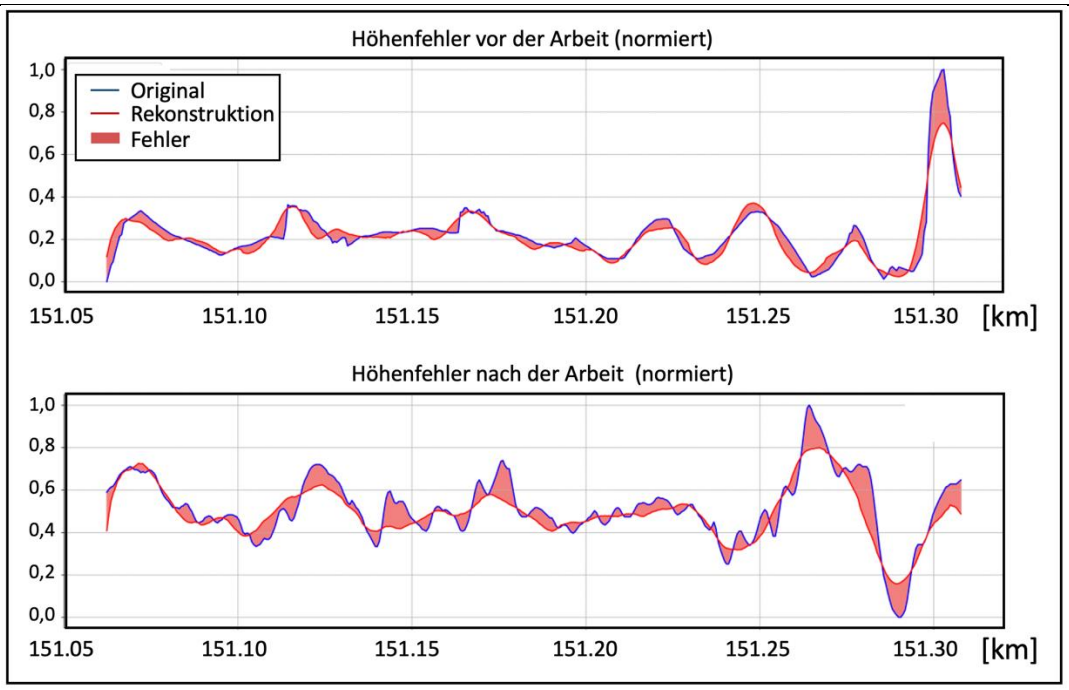


Abbildung 4: Vorhersage des trainierten unsupervised KI-Programms der normierten Gleislagefehler nach der Arbeit; Quelle: System7 rail GmbH.

Die Abbildung 4 zeigt im oberen Diagramm einen vor der Stopfarbeit ermittelten Gleislagefehlerverlauf. Die blaue Linie ist der gemessene Originalfehler. Die rote Linie entspricht der Rekonstruktion des Gleislagefehlerverlaufes „Vor der Arbeit“ durch die KI. Das rote Band zeigt den Rekonstruktionsfehlerbereich, also die Vorhersagequalität der KI. Im unteren Diagramm sagt die KI den nach der Arbeit der Stopfmaschine erwartbaren normierten Restfehlerverlauf voraus.

Im praktischen Einsatz wird das Ergebnis der Stopfarbeit mit der Vorhersage der KI verglichen. Im Fehlerfall bedarf es der Analyse durch Fachleute.

3.3 Die Absolutführung der Stopfmaschine

Vor einer Stopfarbeit werden absolute Gleislagedaten erfasst. Die Referenzpunkte sind an Masten in Form von Bolzen gegeben. Die Vormessung erfolgt (meist) mit handgeschobenen Messgeräten. Diese bedürfen eigener Sperr- oder Zugpausen. Eine aktuelle Entwicklung von System7 sieht den Ersatz der konventionellen Gleisvermarkung an Masten durch eine satellitenbasierte vor.

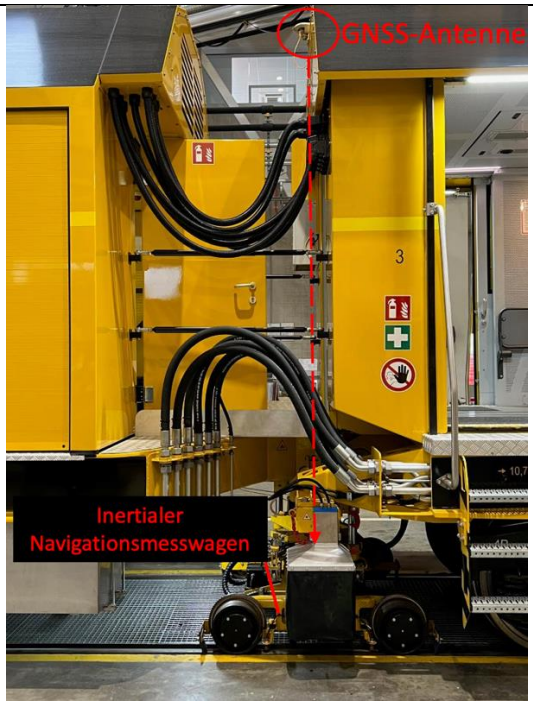


Abbildung 5: Inertialer Navigationsmesswagen mit RTK-GNSS System; Quelle: Autor.

Zentral über einem inertialen Navigationsmesssystem ist ein hoch präzises RTK-GNSS-System (real time kinematic) aufgebaut (siehe Abbildung 5). Für die angestrebten hohen absoluten Genauigkeiten von 5-8mm in der Lage und 10-15mm in der Höhe werden Korrekturen drahtlos von einem Netz von Referenzstationen an das GNSS-Gerät übertragen.

Das eingesetzte RTK-GNSS System erlaubt während einer Messfahrt oder während des Arbeitens die präzise Erfassung der Position und der Gleisgeometrie. Jeder Arbeitsschritt, alle erfassten Messwerte – wie zum Beispiel Hebewert, Hebekraft, Richtwert und Richtkraft, Nachfedern des Gleises, Stopfparameter, Schienen- und Umgebungstemperatur – werden ortsbezogen abgespeichert. Daraus werden im nachhinein Einflussfaktoren analysiert.

Mit dem RTK-GNSS System fährt die Maschine Arbeitspositionen exakt an und ersetzt die aufwendige kostspielige Vormessung. Das System vergrößert die Verfügbarkeit der Gleise, weil die Vormessung durch eine schnelle Messfahrt der Maschine vor der Arbeit erfolgt und keine zusätzlichen Sperr- und Zugspausen erfordert. Das implementierte Gleisgeometrie-Optimierungsprogramm errechnet automatisch die Korrekturwerte für das Gleis und führt anschließend die Maschine nach Absolutkoordinaten.

3.4 Die vollautomatische Vorfahrt und Steuerung der Arbeitsaggregate

Die Vollautomatisierung umfasst die automatische Vorfahrt der Maschine, das Anfahren und genau positionierende Bremsen, die automatische Wahl und Ansteuerung des Hebe-Richt-Aggregates in Längsrichtung und die Selektion der Hebewerkzeuge. Vor dem Eintauchen der Stopfaggregate, insbesondere in Weichenbereichen, müssen die Stopfaggregate in Querrichtung, abhängig von den örtlichen Gegebenheiten, exakt positioniert werden. Dazu sind an manchen Stellen die Pickel ganz oder teilweise wegzuschwenken. Die Stopfaggregate müssen über die Drehvorrichtung an die Schräglage der Langschwellen angepasst werden. Die Zusatzhebung muss automatisch der abzweigenden Schiene nachfahren. Vollautomatik heißt: Verzicht auf Korrekturen durch Maschinenpersonal, automatisches An- und Abrampen, selbsttätige Anpassung der Hebung und Kompensation des Rückfederns des Gleises oder des Hochdrückens der Schwellen. Der Universal Tamper 4.0 erfüllt diese Anforderungen. LIDAR-Systeme scannen das Gleis, die Lage der Schienen, der Weichenelemente und der Hindernisse. Damit wird die Positionierung der Arbeitsaggregate durchgeführt und Vorfahrt und Bremsung geregelt.

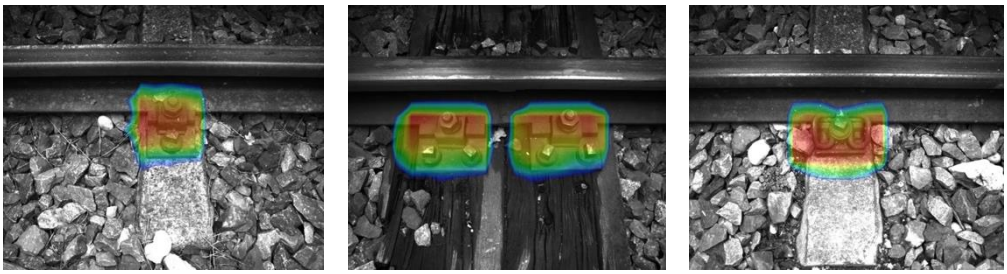


Abbildung 6: Aufnahmen der Befestigungsmittel-Klassen 1 bis 3

Eine weitere Möglichkeit die Vorfahrt von Schwelle zu Schwelle zu automatisieren, wurde in einem Forschungsprojekt mit dem Institut für Fertigungstechnik und Photonische Technologien der TU Wien [4] untersucht. Dazu wurden Schienenbefestigungsmittel klassifiziert (Siehe Abbildung 6).

Zur Erkennung und Positionsbestimmung wurde ein überwachtes Lernverfahren (Software: Zebra Aurora Deep Learning) verwendet. Für die Bildklassifikation wurde Convolutional Neural Networks (CNN) eingesetzt.

Das Künstliche Neuronale Netz erreichte eine Klassifikationsquote von 99,7%. Die Position der Schrauben konnte auf Millimeter genau bestimmt werden, was bei Weitem ausreichend zur Vorfahrtsbestimmung der Oberbaumaschine ist.

3.5 Fernsteuerung und Fernkontrolle autonomer Maschinen

Das Computersystem erlaubt den Fernzugriff und die Fernsteuerung durch autorisiertes Personal [5]. Abbildung 7 zeigt die Arbeitsumgebung im Falle eines Fernzugriffs, aktuell eingeloggt auf einer gerade im Tageseinsatz befindlichen Maschine. Links im Bild auf dem Laptop der Programmcode, in der Mitte die Moduldarstellung der Steuerung und rechts die aktuellen Screens – in real time.

Abbildung 7: Arbeitsumgebung im Falle eines Fernzugriffs; Quelle: Fa. System7 rail GmbH.

Am rechten Schirm werden der zentrale Stopfschirm (links) und ausgewählte Videobilder (rechts) gezeigt, die ebenfalls live übertragen werden. Das System dient der Fernwartung und Analyse im Einsatz befindlicher Maschinen und bildet die Basis für die Überwachung autonomer Maschinen.

Das Expertenpräsenzsystem ist zu jeder Tages- und Nachtzeit erreichbar. Anstelle des Maschinenpersonals sollen künftig Künstliche Intelligenzmodelle der Maschine Hilfestellung bei unerwarteten Problemen leisten.

3.6 Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Sicherheit autonomer Gleisbaumaschinen

Ein Ausfall von Komponenten oder das Auftreten von Störungen auf einer autonomen Stopfmaschine ist kritisch. Deshalb sind besondere Anforderungen an die Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Sicherheit gestellt. Das Automatisierungssystem des Stopfroboters ist mit einem detaillierten und umfangreichen Diagnose- und Analyseteil

ausgestattet. Vom üblichen Betriebszustand abweichende Parameter werden vollautomatisch erkannt und Hinweise auf mögliche Ursachen ermittelt. Jedes derartige Vorkommnis wird geloggt, gespeichert und auf der Webplattform RaVeM aufgezeichnet. So stehen die Daten der Analyse eines Deep-Learning-Algorithmus zur Verfügung. Einen Ausfall von Komponenten erkennt der Steuerungscomputer. Der Deep-Learning Algorithmus einer autonomen Maschine soll erkennen, welche Sensoren bei Defekten gefahrlos abgeschaltet werden können, um die Arbeit zu Ende zu führen.

Neuralgische Komponenten, wie Antriebsstrang, Hilfsgenerator, Bremsen und Hydraulik, Bordnetz, Datennetz, Feldbussystem, Mobilfunk und Sensorik, werden überwacht, müssen zuverlässig arbeiten und eine hohe Ausfallsicherheit gewährleisten.

Die Maschine muss selbstständig Notfallsituationen erkennen und Notfallstrategien aktivieren – der sicherste Zustand ist immer der Stillstand: automatische Bremsung, Abschaltung und umgehende Benachrichtigung des Notfallmanagers. Eine Zugangskontrolle zur Maschine erfolgt über physische Absperrung sowie gesicherter Zugang zu On-Board Datennetzen und Systemen.

Die Ausfallsicherheit wird durch entsprechende qualitative Auswahl der Komponenten, Redundanz und überwachende Sensorik mit trendbasiertem Zustandsmonitoring erhöht. Das erlaubt frühzeitig sich anbahnende Schäden.

4 Datensicherheit

Autonome Maschinen müssen eine hohe Sicherheit gegen Cyberangriffe aufweisen. Das Ausmaß und die Häufigkeit von Cyberangriffen auf vernetzte Computersysteme nehmen ständig zu und sind zu einer erheblichen Bedrohung der Sicherheit der Bahn geworden [6]. Ein nahtloser Datenaustausch zwischen Gleisdatenquellen, Gleisstopf- und Schotterplaniermaschinen und dem Infrastrukturbetreiber reduziert personellen wie organisatorischen Aufwand deutlich. Dieser Austausch erfolgt beim Einsatz von System7 Oberbaumaschinen mit erhöhten digitalen Sicherheitsvorkehrungen (Verwendung sicherer Übertragungsprotokolle, Ende-zu-Ende Verschlüsselung, digitale Zertifikate).

Eines der größten Risiken für die Gefährdung der Cybersicherheit liegt in den digitalen Wartungszugängen [7, 8]. Das 24h-Expertenpräsenzsystem baut auf einem abgesicherten digitalen Fernwartungszugang auf, der mittels verschlüsselter VPN-Verbindung realisiert wird. Die Experten müssen sich im Fernwartungsfall mittels 2-Faktor-Authentifizierung bei einem Server im Data Center anmelden. Die Anmeldungen werden zentral

protokolliert, sodass die Dauer der Tätigkeit im Nachhinein ersichtlich ist und ausgewertet werden kann.

5 Fazit

Wesentliche Voraussetzungen künftiger autonomer Stopfmaschinen, wie automatische Vorfahrt und Arbeit, Fernsteuerung und Fernkontrolle und die Selbstüberwachung der Maschinen sind beim Stopfroboter 4.0 bereits gegeben. Überwachte und unüberwachte Künstliche Intelligenzmethoden werden in Teilbereichen angewendet. Künftige autonom arbeitende Maschinen werden selbsttätig über ECTS-Technologie zur Baustelle fahren. Umfassenderer Einsatz von KI wird die Fehlertoleranz und Selbstüberwachung der Maschinen weiter erhöhen und damit den Weg zur autonomen Arbeitsweise ebnen. Autonome Maschinen können ohne Fahrkabinen, ohne Bedienmittel, Heizung und Klimaanlagen auskommen. Die Kostenersparnis betrifft niedrigere Investitionen, billigeren Betrieb und den Wegfall von Personalkosten für bereits heute rare Fachkräfte umfassen.

6 Literatur

[1] Bahnblogstelle: Bombardier: Ab 2025 sollen erste autonome Züge im Fernverkehr eingesetzt werden, 2020 https://bahnblogstelle.net/2020/07/26/bombardier-ab-2025-sollen-erste-autonome-zuege-im-fernverkehr-eingesetzt-werden/ abgerufen am 9.6.2021

[2] Tao, Fei; Qi, Quinglin; Wang, Lihui; Nee, A. Y. C.: Digital Twins and Cyber-Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison; Engineering 5, 2019, pp. 653-661

[3] Lichtberger, Bernhard: Das neue System7 – Automatikstopfen erhöht die Haltbarkeit der Gleislage: Einsatzergebnisse; ETR – Eisenbahntechnische Rundschau, September 2020, S58-63

[4] Singer, Fabian; Pickel, Laurenz; Saric, Zelijko; Pöchgraber, Gernot: Dynamische Detektion und Analyse von Gleiskörpern mittels Machine-Vision; Forschungskooperation zwischen System7 Rail, dem Institut für Fertigungstechnik u. Photonische Technologien der technischen Universität Wien, und dem COMET-Zentrum CDP Center for Digital Production

[5] Stute, Eric; Vogel, Rainer; Söllinger, Markus; Lichtberger, Bernhard: Umweltfreundlich und ressourcenschonend stopfen; EI-Eisenbahningenieur, Mai 2019, S. 48-54

[6] Schnieder, Lars: Safety und Security in der Zulassung von Bahnanwendungen; EI-Eisenbahningenieur, Juli 2017, S. 15-19

[7] Feistle, Friedrich; Kursawe, Martin; Lüdicke, Daniel; Sept, Jürgen; Fanuli, Paolo: IT-Sicherheit auf Schienenfahrzeugen – Vom gesetzlichen Kontext zur generischen Architektur; ETR-Eisenbahntechnische Rundschau, Oktober 2012, S. 61-66

[8] Krage, Gernot: IT-Sicherheit für Software auf Eisenbahnfahrzeugen; EI-Eisenbahningenieur, April 2020, S. 37-40

Autor

Univ.-Doz. Dr. Lichtberger, Bernhard

Ist CTO der Firma System7 rail support GmbH und geschäftsführender Gesellschafter. Er ist Autor einschlägiger Fachbücher wie dem „Handbuch Gleis“ das in 8 Sprachen übersetzt wurde, dem Buch „Unser Planet im Klimawandel“ oder dem „Großen Handbuch der Gleisinstandhaltung“ in 2 Bänden.

IRSA 2023

SESSION 9

FAHRZEUGTECHNIK II

VEHICLE TECHNOLOGY II

Session 9
Oliver Garack, Max Schott, Anton Müller, Björn Kauer

Simulationsgestützte Bewertung von innovativen Fahrzeugtechnologien und deren Regelung

Die Abbildung des Fahrzeugs als transientes Energiesimulationsmodell zur Effizienzbewertung von Antriebs- und Klimatisierungssystemen sowie deren Regelungsstrategien

Garack, Oliver; Schott, Max; Müller, Anton; Kauer, Björn

HÖRMANN Vehicle Engineering GmbH

Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes *Heat2Comfort* wurde ein Simulationswerkzeug erarbeitet, welches die Möglichkeit bietet, neue Antriebs- und Klimasysteme hinsichtlich ihrer Eignung für die Traktions- und Klimatisierungsaufgabe zu untersuchen, ihren Energiebedarf abzuschätzen und ihre Regelung auszulegen und zu optimieren.

Keywords: Fahrdynamik, Fahrzeugklimatisierung, Energiesimulation, Energieverbrauch, Energiemanagement, Thermomanagement

Finanziert von der Europäischen Union
NextGenerationEU

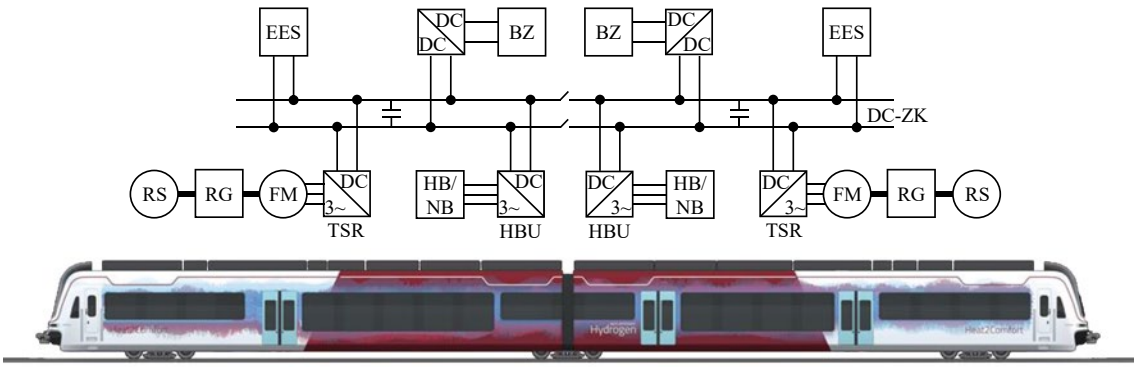
Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

1 Motivation

Simulationswerkzeuge erhalten in der Entwicklung moderner Schienenfahrzeuge einen zunehmend höheren Stellenwert. Sie können vielfältig zur Unterstützung von Systemdimensionierungen aber auch zur Abschätzung von Systemverhalten im realen Betrieb eingesetzt werden, um eine erste Eignungsprüfung hinsichtlich der Anwendbarkeit durchzuführen. Für die Entwicklung von Fahrzeugen mit alternativen Antriebssystemen, insbesondere mit Traktionsbatterien, sind so bspw. eine simulationsgestützte System- und Fahrzeugauslegung sowie die Analyse des Betriebsverhaltens anhand realitätsnaher Betriebsszenarien aufgrund des zusätzlichen Freiheitsgrades in der Energiebereitstellung zielführend [1]. Zudem bildet das Energiemanagement vor allem bei hybriden Energieversorgungssystemen mit Brennstoffzellen einen weiteren wesentlichen Untersuchungsgegenstand, um die Abstimmung der Einzelsysteme und ihr Degradationsverhalten zu optimieren.

Über Energieversorgungs- und Traktionssystem hinaus ist auch die Untersuchung des Klimasystems von hoher Relevanz, da es mit bis zu 40 % des Traktionsenergiebedarfs den zweitgrößten Verbraucher im Fahrzeug darstellt [2]. Fahrzeuge mit Brennstoffzellen-Energieversorgung sind hierbei besonders interessant, da aktuell in Schienenfahrzeugen verwendete Brennstoffzellen (BZ) einen Wirkungsgrad von ca. 50 % aufweisen – das heißt, es wird in etwa so viel Wärme- wie Elektroenergie erzeugt. Mehr als 80 % der Wärme wird über Flüssigkeits-Kühlkreisläufe an die Umgebung abgeführt [3]. Es liegt daher nahe, die Abwärme zur Klimatisierung des Fahrzeuges zu nutzen. Stand der Technik ist ein zusätzlicher Wärmeübertrager im Klimagerät für die Beheizung der Fahrgastraum-Zuluft. Eine Nutzung im Kühlbetrieb befindet sich bisher nicht in der mobilen Anwendung, ist durch thermische Kälteerzeugung z. B. mit einer Absorptionskälteanlage (AKA) aber ebenfalls möglich.

Um den Energiebedarf, das transiente Verhalten und die Interaktion verschiedener Energieversorgungs-, Antriebs-, und Klimatisierungskonzepte für diverse Betriebsszenarien untersuchen und bewerten zu können, wird daher bei *HÖRMANN Vehicle Engineering* ein Simulationswerkzeug in *MATLAB Simulink* erarbeitet. Aufbau und Anwendung dieses Werkzeugs werden im Folgenden anhand des im Forschungsprojekt *Heat2Comfort* entwickelten Fahrzeugkonzeptes *WARAN – Wasserstoff-Angetriebener Regionalzug mit Abwärme-Nutzung* erläutert. Der in Abbildung 1 dargestellte zweiteilige Nahverkehrstriebzug verfügt über eine hybride Energieversorgung bestehend aus Brennstoffzellen und elektrischen Energiespeichern (EES).



Leermasse:	93 t	BZ	Brennstoffzelle	HB	Hilfsbetriebe
Sitzplätze:	110	DC/DC	Gleichstrom-Wandler	HBU	Hilfsbetriebeumrichter
Max. Geschwindigkeit:	160 km/h	DC-ZK	Gleichstrom-Zwischenkreis	NB	Nebenbetriebe
Max. Beschleunigung:	1,1 m/s²	EES	Elektrischer Energiespeicher	RG	Radsatzgetriebe
Max. Antriebsleistung:	1,26 MW	FM	Fahrmotor	RS	Radsatz
Install. BZ-Leistung:	600 kW			TSR	Traktionsstromrichter
Max. NB/HB-Leistung:	120 kW				

Abbildung 1: Fahrzeugkonzept WARAN

2 Fokus Antrieb

Im Fokus der simulativen Bewertung von Fahrzeug- und Antriebskonzepten steht ein Simulationswerkzeug zur Analyse von Streckenfahrten. Hierbei wird das Verhalten eines Fahrzeugs auf Basis vorgegebener Fahrzeug-, Strecken-, Betriebs- und Umgebungsdaten auf das Betriebsszenario hin analysiert. Untersucht werden insbesondere:

- Unterstützung der Auslegung von Antrieb und Energieversorgung
- Abschätzung des fahrdynamischen Verhaltens auf der virtuellen Strecke
- Abschätzung der Fahrplaneinhaltung und -reserve sowie von Kraftstoffbedarf und Betankungsintervallen zur Bewertung des Fahrzeugkonzeptes aus Betreibersicht
- Evaluierung und Detaillierung der Regelung des Fahrverhaltens (Fahrer), der Energieversorgung (Energiemanagement) und der Subsysteme (Subsystemregler)

Der hierbei verwendete Ansatz wird auch als *Cause-Effekt-Simulation* oder Vorwärtssimulation bezeichnet. Der Aufwand zur Erstellung eines solchen Werkzeuges ist hierbei als deutlich höher einzuschätzen als bei vergleichbaren Rückwärts-Simulationsmodellen. So bedarf eine *Cause-Effekt-Simulation* der Wahl einer angemessenen Modellierungstiefe der Subsysteme sowie ihrer Steuerungen bzw. Regelungen und weiterhin einer genauen Kenntnis über programmatische Abläufe innerhalb des Gesamtsystems und seiner Subsysteme.

Im Gegenzug birgt die Vorwärtssimulation auch entscheidende Vorteile: Sie ist ein autarkes Simulationswerkzeug und bedarf im Gegensatz zur Rückwärtssimulation keiner Vorsimulation, bspw. zur Erlangung eines Geschwindigkeit-Zeit-Profils. Weiterhin bietet ein *Cause-Effekt-Modell* ein hohes Maß an Modularität, was insbesondere für die verschiedenen Energieversorgungssysteme, die im Schienenfahrzeugbereich eingesetzt werden (Oberleitungen, Dieselgeneratoren, Akkumulatoren, Brennstoffzellen, etc.), vorteilhaft ist. Die einzelnen Subsysteme können je nach Bedarf und vorliegender Datenlage in der Modellierungstiefe variieren. Dabei besteht zusätzlich die Möglichkeit, einzelne Subsysteme als Rückwärts-Simulationsmodelle, bspw. anhand von Wertetabellen von Herstellern, zu implementieren. Nicht zuletzt sind Änderungen des Komponentenverhaltens wie zum Beispiel durch Degradation abbildbar.

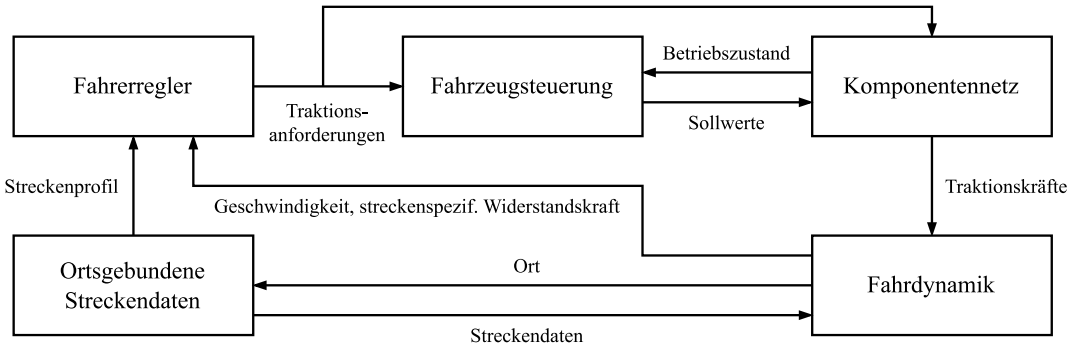


Abbildung 2: Vereinfachte Topologie des Streckenfahrt-Simulationsmodells

Die Simulation ist durch eine Zeitschrittintegration mit fester Schrittweite in der Programmumgebung *MATLAB Simulink* realisiert. Zur Veranschaulichung von Aufbau und Funktionsweise stellt Abbildung 2 die Topologie des Simulationswerkzeugs schematisch dar. Ausgangspunkt des Signalflusses bilden die eingelesenen Streckendaten, die ortsabhängig an den Fahrerregler weitergeleitet werden. Innerhalb dieses Subsystems erfolgt auf Grundlage des Streckenprofils sowie der Geschwindigkeit die Auswahl des fahrdynamischen Zustands des Fahrzeugs. Hierbei wird zwischen Beschleunigung, Beharrungsfahrt, Ausrollen und Bremsung unterschieden.

Auf Grundlage des Fahrzustands erfolgt die Weitergabe einer Traktionsanforderung an Fahrzeugsteuerung und Komponentennetz. Die Fahrzeugsteuerung dient als Kommunikationsschnittstelle der Komponenten und beinhaltet u. a. das Energie-management. Ausgehend vom Betriebszustand der wesentlichen Komponenten stellt dieses Subsystem dem Komponentennetz Soll-Anforderungen bereit.

Kernstück des Komponentennetzes bildet der elektrische Zwischenkreis, der als elektrische Schnittstelle für alle relevanten Energieversorger und Energieverbraucher dient. Letztere werden wiederum in Traktionsaggregate sowie Hilfs- und Nebenbetriebe gegliedert. Abhängig von Traktionsanforderung und Sollwerten stellt der Traktionsstromrichter der Traktionsmaschine elektrische Leistung aus dem Zwischenkreis bereit, die im Motorbetrieb folglich in mechanische Leistung umgewandelt wird. Die Traktionskraft wird in den Fahrdynamik-Block weitergeleitet, welcher die Fahrzeugbewegung, charakterisiert von Beschleunigung, Geschwindigkeit und Ort, anhand der fahrdynamischen Grundgleichung ermittelt. Hierfür werden anhand der Strecken- und Fahrzeugparameter die strecken- und fahrzeugspezifischen Widerstandskräfte errechnet.

Zur Veranschaulichung der Streckenfahrt-Simulation sind im Folgenden ausgewählte Ergebnisse des Brennstoffzellen-Triebzugkonzepts *WARAN* dargestellt. Als Betriebsszenario dient ein fiktiver Einsatz auf der topografisch und meteorologisch anspruchsvollen Zschopautalbahn in Sachsen zwischen Chemnitz und Cranzahl.

Abbildung 3 zeigt Fahrgeschwindigkeit, Passagierbesetzung und anfallende Brennstoffzellenabwärme für einen Halbzug. Die Simulation umfasst einen vollen Umlauf von Chemnitz Hauptbahnhof bis Bahnhof Cranzahl und zurück. Dabei wird in den ersten zehn Minuten die Hauptstrecke Chemnitz-Dresden mit bis zu 120 km/h befahren, woran sich die steigungsreiche Nebenstrecke nach Cranzahl mit maximal 80 km/h anschließt. Die simulierten Fahrgastzahlen stammen aus realen Zählungen des Jahres 2019. Dem Abwärmeprofil liegt die Betriebscharakteristik des Brennstoffzellensystems zugrunde, die wiederum durch das Energiemanagementsystem, die Brennstoffzellen-Subsystemregelung und die Brennstoffzelle als Regelstrecke selbst beeinflusst wird. Die anfallende Abwärme besitzt eine direkte Abhängigkeit von der momentanen Traktionsanforderung, da das Energieversorgungskonzept eine dynamische, dem Traktionsbedarf folgende Energiebereitstellung aus der Brennstoffzelle vorsieht. Dem Beschleunigen mit Abwärme von bis zu 499 kW steht das Bremsen mit Abwärme von lediglich 0 bis 16 kW entgegen. Zudem ist erkennbar, dass bei der Bergfahrt nach Cranzahl mehr Abwärme aufgrund des zu überwindenden Höhenunterschiedes anfällt als bei der Talfahrt nach Chemnitz – insgesamt 161 kWh gegenüber 81 kWh. Die gewonnen Daten dienen als Eingangsgrößen für die Simulation des Klimasystems im nachfolgenden Kapitel.

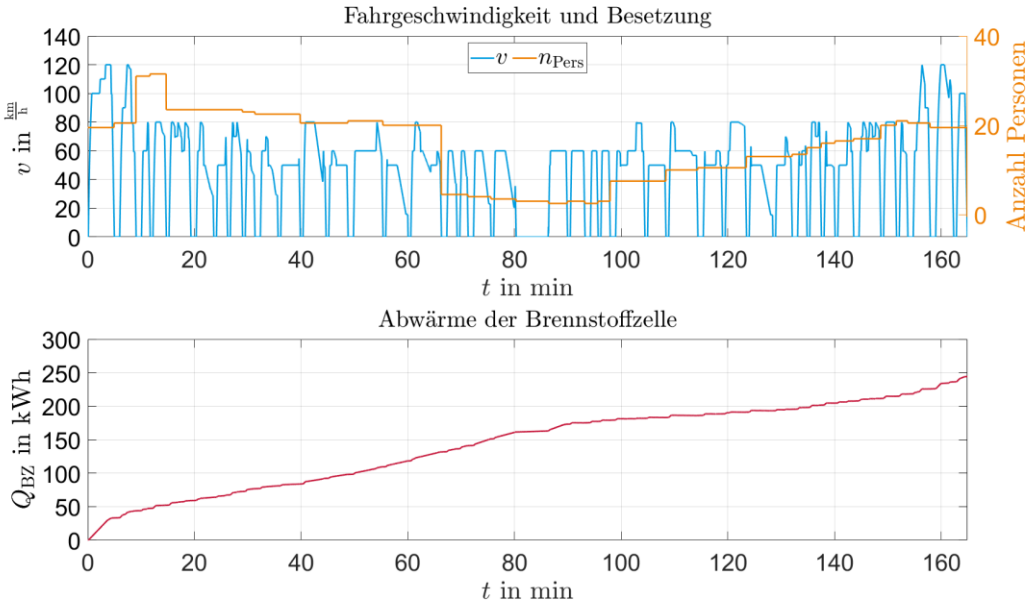


Abbildung 3: Ergebnis der Streckenfahrt-Simulation; oben – Fahrgeschwindigkeit und Passagierzahl, unten – Abwärmeprofil der Brennstoffzelle (Angaben für einen Halbzug)

3 Fokus Klimatisierung

Für eine möglichst umfängliche Abwärmenutzung für die Fahrzeugklimatisierung wurde im Rahmen des Projektes *Heat2Comfort* ein abwärmegestütztes Klimasystem entwickelt. Kernstück bilden dabei die thermische Kälteerzeugung mit einer Absorptionskälteanlage (AKA) sowie ein neuartiger Latentwärmespeicher mit Wärmeübertragungsfunktion, bezeichnet als Thermische Weiche (TW). Dies ermöglicht eine ganzjährige Nutzung der Brennstoffzellen-Abwärme zum Heizen und Kühlen des Fahrgastraums (FGR) und somit die Senkung des elektrischen Energiebedarfs der Fahrzeugklimatisierung. Bedingt durch hohe thermische Anforderungen und die Trägheit von AKA und TW sind zusätzlich eine Kompressionskälteanlage (KKA) sowie ein Durchlauferhitzer (DLE) notwendig [4]. Das resultierende Klimasystem ist wesentlich komplexer als heutige Kompaktklimageräte. Ein kalkulatorischer Ansatz zur Bewertung des jährlichen Energieverbrauchs mit rein statischen Betriebspunkten, wie es z. B. nach DIN EN 50591 oder VDV 183 vorgeschrieben wird, ist für dieses System nur bedingt zweckmäßig. Die höhere Systemträgheit und das Wechselspiel zwischen den verschiedenen Wärme- und Kälteerzeugern können nicht oder nur unzureichend abgebildet werden. Mit Hilfe des entwickelten Energiesimulationsmodells ist es jedoch möglich, diese Zusammenhänge nachzuvollziehen und die Abwärmenutzung zu optimieren.

3.1 Abwärmegestütztes Klimasystem

Das abwärmegestützte Klimasystem besteht aus drei Hauptkomponenten – Kälte- und Wärmeversorgung, Luftaufbereitungsanlage (LAA) und Fahrgastraum (FGR). Verbunden sind die Komponenten über Fluidkreisläufe (siehe Abbildung 4). Die Kälte- und Wärmeversorgung bildet das Herzstück der Abwärmenutzung – sowohl durch die AKA im Kühlbetrieb als auch durch die TW im Heizbetrieb.

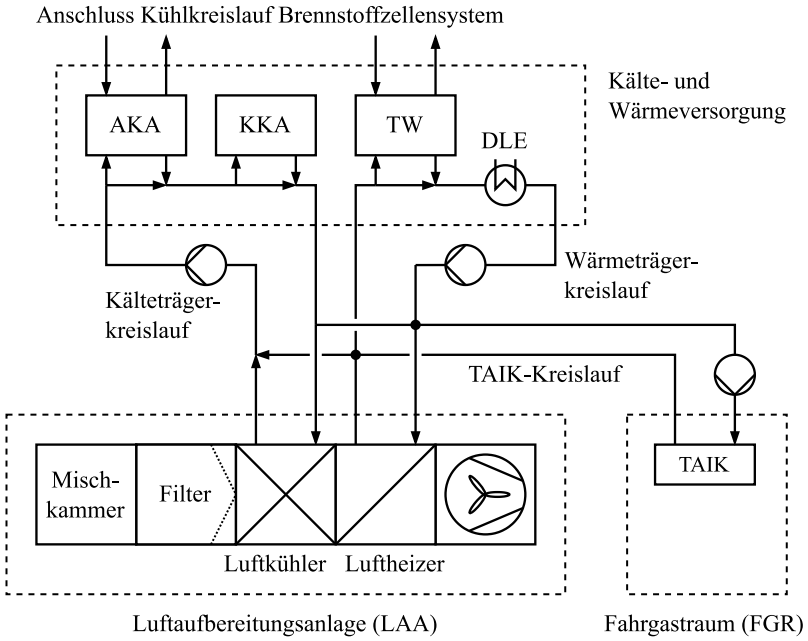


Abbildung 4: Aufbau abwärmegestütztes Klimasystem

Die Absorptionskälteanlage nutzt dafür einen chemischen Prozess, wodurch unter sehr geringem Aufwand an Elektroenergie Wärme in Kälte umgewandelt wird. Verglichen mit einer Kompressionskälteanlage findet sich an Stelle des mechanischen Verdichters ein thermischer Verdichter, bestehend aus Absorber, Lösungsmittelpumpe und Generator. Der Kälteprozess läuft ähnlich zu dem einer KKA ab. Das Kältemittel verdampft unter Wärmeaufnahme im Verdampfer, gelangt jedoch anstatt zum Verdichter in den Absorber und wird von einem Lösungsmittel absorbiert. Die Lösungsmittelpumpe fördert das Gemisch in den Generator, wo das Kältemittel ausdampft. Das Lösungsmittel strömt zurück in den Absorber, während der Kältemitteldampf im Kondensator unter Wärmeabgabe kondensiert.

Über ein Expansionsventil gelangt es zurück in den Verdampfer und der Prozess beginnt erneut. Die Absorptionskälteanlage besitzt dementsprechend neben einer thermischen auch eine chemische Speicherkapazität, die sich in der Konzentration des absorbierten Kältemittels ausdrückt. Diese verglichen mit einer Kompressionskälteanlage höhere Speicherkapazität ist für eine kontinuierliche und bedarfsgerechte Abwärmenutzung vorteilhaft, bedeutet jedoch ebenso eine höhere Trägheit.

Das Pendant zur AKA bildet im Heizbetrieb die Thermische Weiche, welche einen passiven Speicher mit integrierter Wärmeübertragungsfunktion darstellt. Sie dient zur Speicherung und Übertragung der Wärme aus dem Brennstoffzellenkühlkreis an den Wärmeträgerkreislauf sowie zur Systementkopplung. Der Aufbau ähnelt einem Rohrbündelwärmeübertrager mit je einem Rohrbündel für den Brennstoffzellenkühlkreislauf und den Wärmeträgerkreislauf. Zwischen den Rohrbündeln erfolgt die Wärmeübertragung durch ein Verbundmaterial aus zellularen metallischen Werkstoffen und Phasenwechselmaterial. Durch die latente Wärmeaufnahme bzw. Wärmeabgabe ist die Speicherkapazität bei gleichem Volumen etwa viermal höher als bei einem Wasserspeicher.

Die Kälte- und Wärmeversorgung wird durch Kompressionskälteanlage (KKA) und Durchlauferhitzer (DLE) komplettiert, die die thermische Behaglichkeit bei hohen Lastanforderungen oder ungenügender Abwärme sicherstellen. Durch die Speicherfunktion der thermischen Komponenten ist es jedoch möglich, Stillstandszeiten des Brennstoffzellensystems von bis zu einer halben Stunde ohne Zuschalten dieser elektrisch angetriebenen Komponenten zu überbrücken und so den elektrischen Energiebedarf zu minimieren.

Über Flüssigkeitskreisläufe wird die bereitgestellte Energie aus der Kälte- und Wärmeversorgung zur Luftaufbereitungsanlage transportiert, in der die Zuluft im Luftkühler bzw. Luftheizer entsprechend konditioniert und so die thermische Last aus dem Fahrgastraum abgeführt wird. Für einen effizienten Betrieb der Absorptionskälteanlage muss die Kälteträgertemperatur möglichst hoch gewählt werden. Somit sind große Wärmeübertragungsflächen nötig. Da der Bauraum für Wärmeübertrager im Klimagerät begrenzt ist, werden zusätzlich Flächen im Fahrgastraum temperiert. Die sogenannten Thermisch aktiven Innenausbau-Komponenten (TAIK) bilden ein modulares, flüssigkeitsbasiertes Flächenheiz- und Kühlsystem und unterstützen die Luftaufbereitungsanlage mittels Wärmeübertragung durch Konvektion und Strahlung.

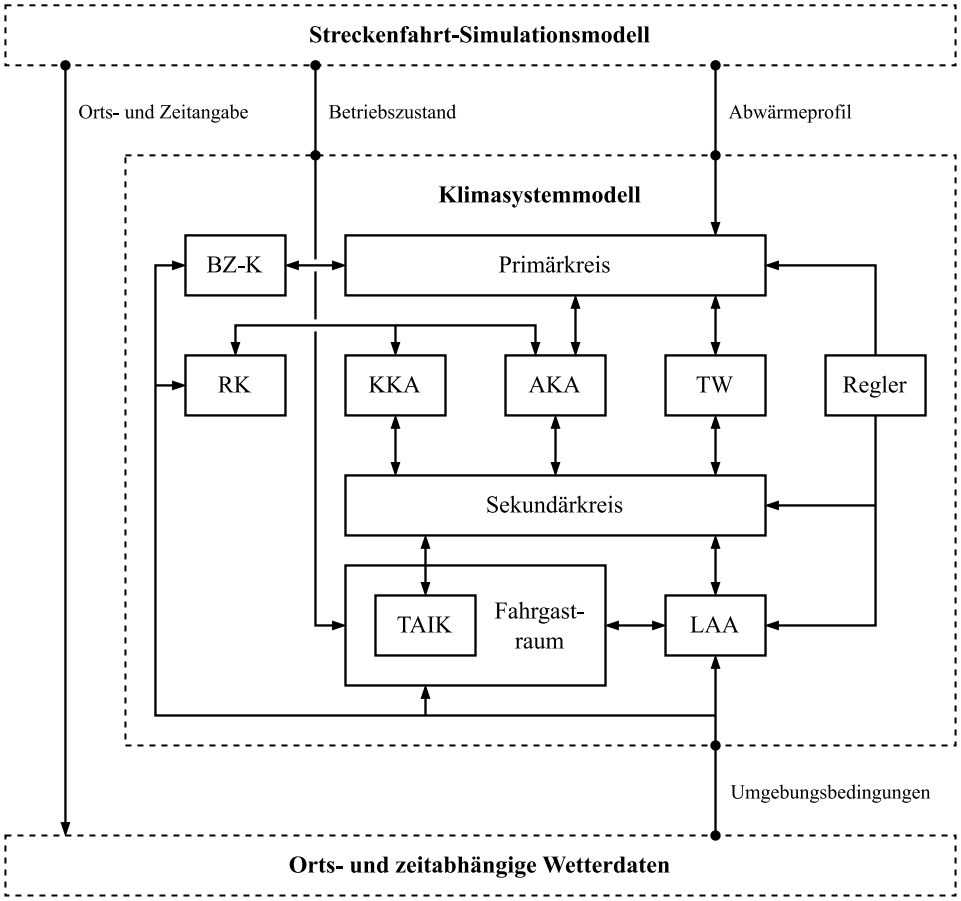
3.2 Modellansatz

Die Simulation der thermischen Prozesse im und am Fahrzeug ist innerhalb verschiedener Simulationsumgebungen denkbar. Für eine Auswahl ist daher folgende Eingrenzung der Problemstellung sinnvoll: Zum Zeitpunkt t_0 liegt der bekannte Initialzustand des Systems $\boldsymbol{x}_0 = \boldsymbol{x}(t_0)$ vor. Den Systemkomponenten sowie der Raumluft sind dabei gemittelte Temperaturen zugewiesen. Demnach besteht keine räumliche Auflösung der thermischen Felder. Ziel ist die Berechnung der Systemzustände $\boldsymbol{x}_i = \boldsymbol{x}(t_i > t_0)$. Der Zustand $\boldsymbol{x}_{i+1}$ ergibt sich gemäß der Bilanzierung resultierender Energieflüsse aus Zustand $\boldsymbol{x}_i$. Es handelt sich demzufolge um ein Anfangswertproblem mit gewöhnlichen Differentialgleichungen. Eine signalflussorientierte Modellbildung erleichtert die Integration der Regelungstechnik in das Modell. Für die vorgestellte Charakteristik stellt *MATLAB Simulink* ein geeignetes Simulationswerkzeug dar. Abbildung 5 zeigt vereinfacht die umgesetzte Modellstruktur.

Zentral ist der Anschluss an das Streckenfahrt-Simulationsmodell: Dieses liefert für eine ausgewählte Strecke zeitabhängig den Ort und den Betriebszustand (Geschwindigkeit, Türöffnung, Besetzung) des Zuges sowie das Abwärmeprofil der Brennstoffzelle. Aus dem Abwärmeprofil berechnet sich innerhalb des Subsystems „Primärkreis“ ein Volumenstrom zur Entwärmung der BZ, der direkt von den einzustellenden Ein- und Austrittstemperaturen an der BZ abhängt. Schnittstellen des Primärkreises bestehen zu den Submodellen von BZ-Kühler, AKA und TW, wobei letztere ebenso eine Schnittstelle zum Subsystem „Sekundärkreis“ besitzen. Den physischen Austausch von Fluiden im realen System (vgl. Abbildung 4) entsprechen im Modell die Signale Vor- und Rücklauftemperatur sowie Volumenstrom an den einzelnen Komponenten. Da die Bestimmung und Regelung von Temperatur, Luftfeuchte und CO_2-Gehalt innerhalb des Subsystems „Fahrgastraum“ (FGR) Hauptgegenstand der Klimasystem-Simulation ist, werden die übrigen Zusammenhänge in Hinblick auf den FGR beschrieben. Der Raumluftzustand (Wärme, Luftfeuchte, CO_2) ergibt sich über Bilanzierung der Energie bzw. der Stoffströme. Hierbei finden die in Tabelle 1 gelisteten Einflüsse Berücksichtigung.

Im Sinne eines möglichst realistischen Betriebsszenarios werden die Umgebungs-Zustandsgrößen Außenlufttemperatur und -feuchte sowie direkte und diffuse Sonnenstrahlung über das Subsystem „Orts- und zeitabhängige Wetterdaten“ eingebunden. Dies geschieht anhand der Orts- und Zeitkoordinaten, die das Streckenfahrt-Simulationsmodell übergibt.

Neben dem Subsystem FGR verwenden auch LAA, BZ-Kühler und der Kälteanlagen-Rückkühler diese Wetterdaten. Einerseits ist damit eine präzise Abschätzung des Energiebedarfs der vorhandenen Lüfter möglich, andererseits kann eine Aussage getroffen werden, wie weit das Kühlwasser der Kälteanlagen heruntergekühlt werden kann. Die Kühlwassertemperatur hat wiederum einen entscheidenden Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der AKA und somit auf den zusätzlichen Energiebedarf durch die KKA. Neben der KKA werden weitere wesentliche elektrische Verbraucher (DLE, Zuluft-Gebläse der LAA, Kühlerlüfter sowie Pumpen in Primär- und Sekundärkreis) dynamisch betrachtet, um die Energieeffizienz des Systems bewerten zu können.



AKA	Absorptionskälteanlage	BZ-K	Brennstoffzellen-Kühler
KKA	Kompressionskälteanlage	LAA	Luftaufbereitungsanlage
RK	Rückkühler Kälteanlagen	TW	Thermische Weiche
		TAIK	Thermisch aktive Innenausbau-Komponenten

Abbildung 5: Vereinfachte Topologie des Klimasystem-Simulationsmodells

Weiterhin ist in Abbildung 5 der Gesamtsystemregler angedeutet. In oberster Hierarchie steuert der Regler die Volumenströme im Primärkreis, in dem je nach Heiz- oder Kühlfall der Volumenstrom über AKA oder TW geführt wird. Zusätzlich greift der Regler auf das Subsystem LAA zu, in dem die Vorgabe von Zulufttemperatur und Frischluftmenge in Abhängigkeit des Heiz-/Kühlbedarfs bzw. der CO_2-Konzentration erfolgt. Im Sekundärkreis gibt der Regler das Temperaturniveau des konstant fließenden Volumenstroms vor. Dieses wird so eingestellt, dass mit der Beaufschlagung der Wärmeübertrager innerhalb der Luftaufbereitung möglichst effizient die geforderte Zulufttemperatur erreicht wird (d. h. geringer Bypass- bzw. Rücklaufanteil). Die Einstellung der TAIK-Oberflächentemperaturen erfolgt über die Regelung der Rücklaufbeimischung. Die KKA, die Kühler der BZ sowie die Rückkühler der Kälteanlagen besitzen zusätzliche Subsystemregler, welche in Abbildung 5 nicht dargestellt sind.

Tabelle 1: Einflussgrößen für die Bilanzierung innerhalb des Subsystems „FGR“

Wärmebilanz	Feuchtebilanz	CO_2-Bilanz
• Zuluft • Transmission • Sonneneinstrahlung (direkt und diffus) • Personen (sensible Wärme) • Türöffnung • Exfiltration[1] • Heiz-/Kühlflächen	• Personen (latente Wärme) • Zuluft • Türöffnung • Exfiltration	• Personen (Atmen) • Zuluft • Türöffnung • Exfiltration

Im Weiteren werden kurz die Modellansätze der einzelnen Subsysteme dargestellt:

Luftaufbereitungsanlage LAA

Die Wärmeübertrager in der LAA (Luftkühler und -heizer) berechnen sich nach dem NTU-Modell [5]. Der kA-Wert wird dafür gemäß Nusselt-Theorie dynamisch bestimmt [6]. Das Zuluft-Gebläse ist auf Basis von Hersteller-Kennfeldern implementiert.

[1] Exfiltration beschreibt den ungewollten Luftaustausch durch eine undichte Fahrzeughülle.

Thermische Weiche TW und Thermisch aktive Innenausbau-Komponenten TAIK
Zur Modellierung werden die jeweiligen Komponenten virtuell in ihre Bestandteile zerlegt, denen eigene Bilanzräume mit Durchschnittstemperaturen und Kapazitäten zugeordnet sind. Die Berechnung von Wärmeströmen innerhalb des Bauteils und zum FGR bzw. zu den Fluidkreisläufen hin ermöglicht die Beschreibung mittels Gleichungen der quasi-stationären Wärmeübertragung.

Absorptionskälteanlage AKA
Das Modell umfasst ein experimentell ermitteltes Kennfeld der AKA, aufgenommen für den statischen Betrieb. Aus der An- und Abfahrcharakteristik der Anlage werden die Trägheiten abgeschätzt und über Verzögerungsglieder im Modell ergänzt.

Kühler der Brennstoffzellen und Rückkühler der Kälteanlagen
Für die Rückkühler der Kälteanlagen und die BZ-Kühler erfolgt die Abbildung von Wärmeübertragern und Lüftern analog der LAA.

Kompressionskälteanlage KKA
Für die Kompressionskälteanlage wird zunächst ein Hersteller-Kennfeld stationärer Betriebszustände herangezogen. Die Trägheit ist momentan lediglich durch ein Verzögerungsglied berücksichtigt. Im Vergleich zur AKA liegt die Zeitkonstante hier jedoch im Bereich weniger Sekunden.

3.3 Simulationsergebnisse

Kühlfall
Für einen typischen Sommertag[2] wird das Fahrspiel Chemnitz-Cranzahl-Chemnitz mit Abfahrt um 09.36 Uhr simuliert. Abbildung 6 zeigt basierend auf den Ergebnissen der Streckenfahrt-Simulation (vgl. Abbildung 3) die resultierenden Wärmeströme am FGR. Es ist ersichtlich, dass insbesondere der Strahlungswärmestrom $\dot{Q}_{\mathrm{r}}$ und der Transmissionswärmestrom $\dot{Q}_{\mathrm{trans}}$ geschwindigkeitsabhängig sind. Dies bedingt eine hohe Dynamik des Zuluftwärmestroms $\dot{Q}_{\mathrm{sup}}$, der über die Regelung der LAA eingestellt wird. Die Bewertung des Energiesparpotenzials erfolgt zunächst durch den von der AKA erbrachten Anteil der Kälteleistung anhand von Abbildung 7. Hier ist erkennbar, dass die AKA bei hoher Traktionsanforderung durch die zugeführte Abwärme in der Lage ist, mit $10 \ldots 15\ \mathrm{kW}$ einen signifikanten Anteil der benötigten Kälteleistung bereitzustellen.

[2] 01.08.2020: Temperaturverlauf $\vartheta_{\mathrm{oda}} = 25 \ldots 28\ °\mathrm{C}$, relative Luftfeuchte $\varphi_{\mathrm{oda}} \approx 35\ \%$,
direkte Sonneneinstrahlung $G_{\mathrm{sun,dir}} = 780 \ldots 870\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}$, diffuse Sonneneinstrahlung $G_{\mathrm{sun,diff}} = 65 \ldots 110\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}$

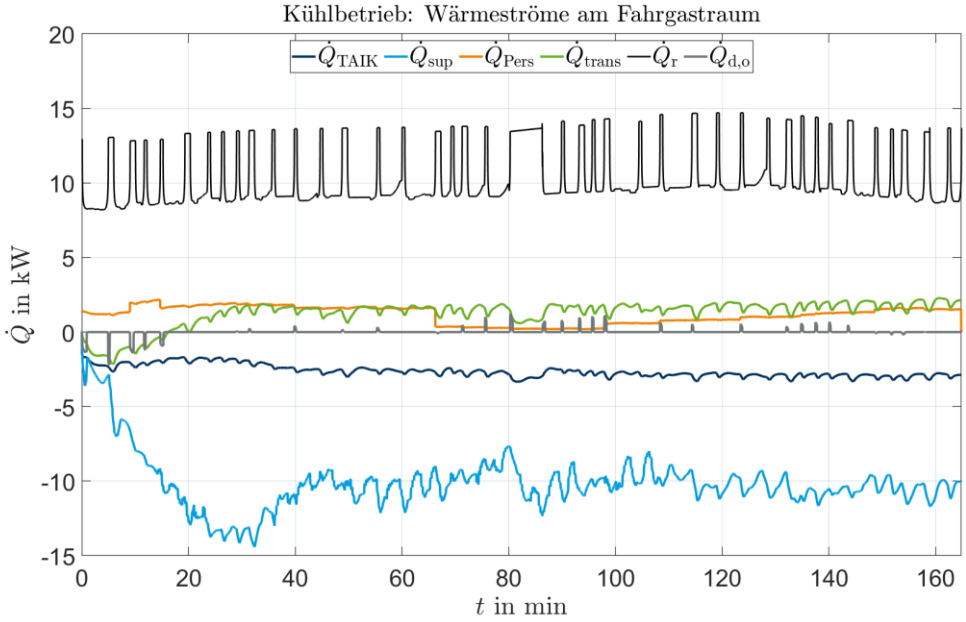


Abbildung 6: Berechnete Wärmeströme des Subsystems „FGR“ für einen Sommertag

Insbesondere zu Fahrtbeginn muss zunächst Heizleistung zur Erwärmung des Generators und zur Herstellung des Konzentrationsgefälles im Lösungsmittel aufgewendet werden, bevor Kälteleistung verfügbar ist, woraus ein verstärkter Betrieb der KKA resultiert. Diese Trägheit ist jedoch zur Überbrückung kurzzeitiger Betriebsphasen geringer Abwärme (z. B. Bremsvorgänge und Stationsaufenthalte) von Vorteil. Während der Fahrt Cranzahl-Chemnitz ($t > 85$ min) fährt der Zug talwärts. Aufgrund des geringeren Traktionsbedarfs steht weniger Abwärme zur Verfügung. Daraus resultiert eine niedrigere Kälteleistung $\dot{Q}_{\mathrm{AKA,0}}$ bis hin zum temporären Abschalten der AKA. Außerdem ist ersichtlich, dass die Kompressionskälteanlage die Absorptionskälteanlage im Falle eines Leistungsdefizits unterstützt. Anzumerken ist dabei, dass die abgebildete KKA eine Mindestkälteleistung von ca. 5 kW besitzt, woraus temporär ein taktender Betrieb folgt.

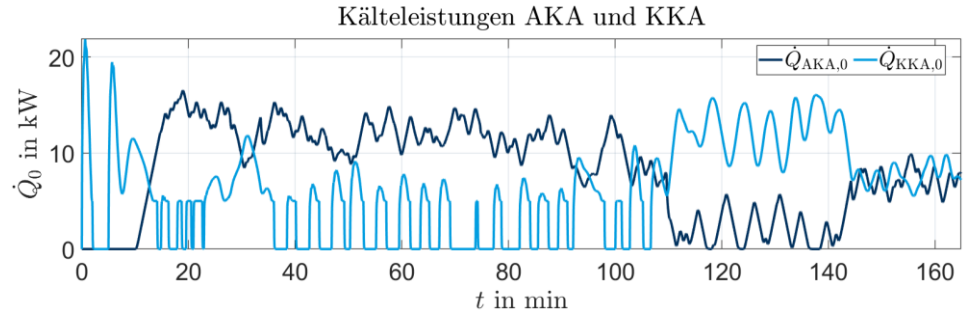


Abbildung 7: Simulierte Kälteleistungen $\dot{Q}_0$ der AKA und KKA

Abbildung 8 stellt den Verlauf von Raumluft- und Zulufttemperatur dar. Nach einem Einschwingen zu Beginn der Fahrt (ca. 20 min) bewegt sich die Raumlufttemperatur ϑ_{ida} um den normativ geforderten Sollwert $\vartheta_{\mathrm{ida,DIN}}$ unter Einhaltung der in DIN EN 14750 für ein behagliches Raumklima definierten Toleranz von $\pm 2\,\mathrm{K}$. Die aus Sicht der Behaglichkeit normativ gegebene minimale Zulufttemperatur $\vartheta_{\mathrm{sup,DIN,min}}$ von $12\,^{\circ}\mathrm{C}$ wird nach dem Einschwingen lediglich im Bereich der Zugwende in Cranzahl kurzzeitig unterschritten. Hier ist erkennbar, dass die realisierte energieoptimierte Regelung des Zuluft-Gebläses auf einen minimalen Zuluftvolumenstrom den Fahrgastkomfort noch nicht ausreichend berücksichtigt. Die Regler-Optimierung und die damit verbundene Abwägung von Energieeffizienz und Behaglichkeit steht im Fokus laufender Untersuchungen im Projekt *Heat2Comfort*.

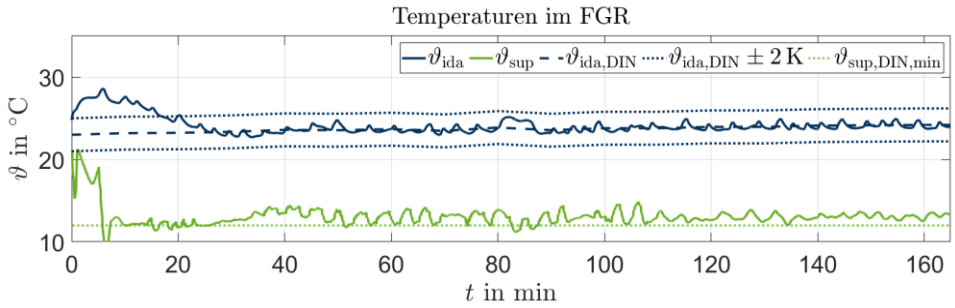


Abbildung 8: Raumlufttemperatur ϑ_{ida}, Zulufttemperatur ϑ_{sup}, Soll-Raumlufttemperatur $\vartheta_{\mathrm{ida,DIN}}$ mit Toleranzband sowie min. Zulufttemperatur $\vartheta_{\mathrm{sup,DIN,min}}$ nach DIN EN 14750

Heizfall

Für das Heizszenario wird das Fahrspiel an einem typischen Wintertag[3] betrachtet. Abwärmeprofil, Fahrgeschwindigkeit und Besetzung sind weiterhin identisch zu Abbildung 3. Die sich ergebenden Wärmeströme stellt Abbildung 9 dar. Der Verlustwärmestrom durch Türöffnungsvorgänge $\dot{Q}_{\mathrm{d,o}}$ ist verglichen mit dem Sommertag betragsmäßig signifikant größer, was durch die deutlich höhere Temperaturdifferenz zwischen Innenraum und Umgebung im Winter zu begründen ist. Weiterhin ist hervorzuheben, dass allein die Beheizung der TAIK einen großen Anteil der thermischen Last kompensiert.

[3] 01.01.2020: Temperaturverlauf $\vartheta_{\mathrm{oda}} = 0 \ldots 5\,^{\circ}\mathrm{C}$, relative Luftfeuchte $\varphi_{\mathrm{oda}} = 50 \ldots 78\,\%$, direkte Sonneneinstrahlung $G_{\mathrm{sun,dir}} = 190 \ldots 260\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}$, diffuse Sonneneinstrahlung $G_{\mathrm{sun,diff}} = 40 \ldots 53\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}$

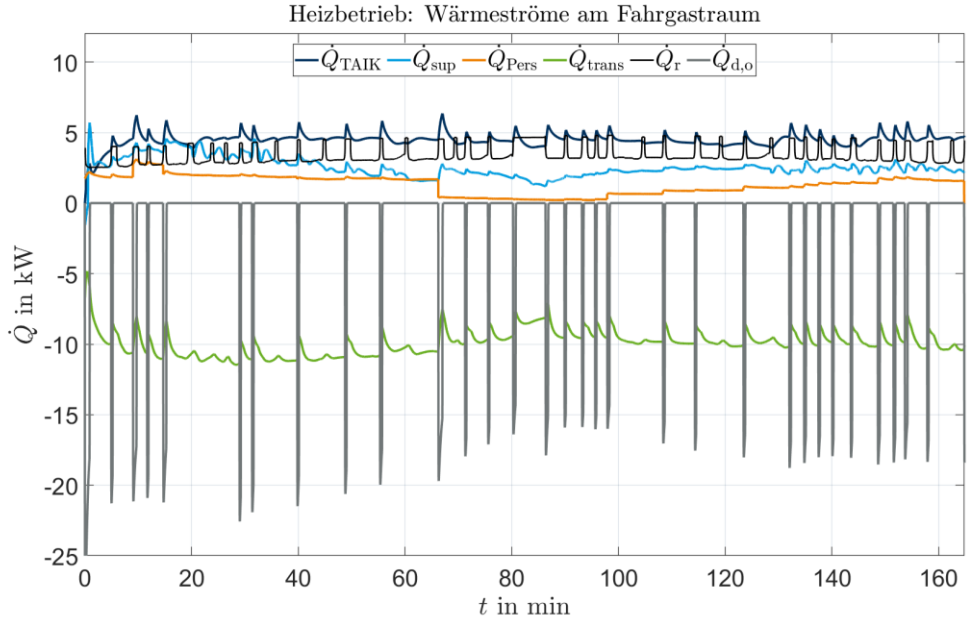


Abbildung 9: Berechnete Wärmeströme des Subsystems „FGR“ für einen Wintertag

Die Wärmespeicherung innerhalb der Thermischen Weiche verdeutlicht Abbildung 10. In Phasen hoher Abwärmeleistung erfährt die Thermische Weiche eine hohe Wärmezufuhr $\dot{Q}_{\mathrm{TW,PC}}$, während sich die entzogene Wärme $\dot{Q}_{\mathrm{TW,SC}}$ mit deutlich geringerer Schwankung der Leistungsanforderung des Sekundärkreises folgt. Die Thermische Weiche ist somit in der Lage, die zeitliche Diskrepanz zwischen Anfall und Nutzung der Abwärme zu entkoppeln. Dadurch kann die Heizleistung nahezu vollständig durch die Abwärme gedeckt werden und es ist mit Ausnahme von Aufheizvorgängen kein Zuschalten elektrischer Heizer nötig.

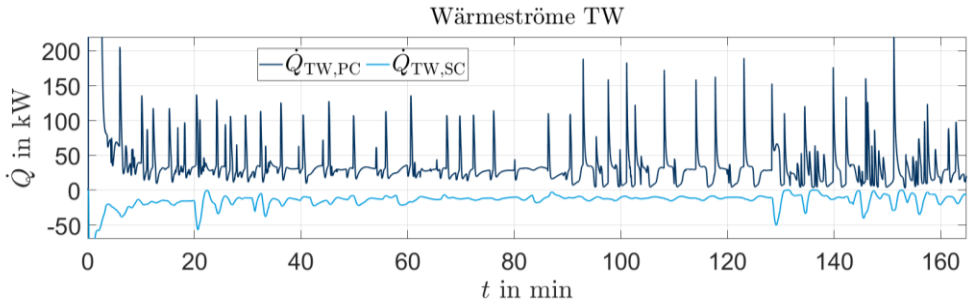


Abbildung 10: Be- und Entladung der TW durch Primär- und Sekundärkreislauf

4 Fazit

Das vorgestellte Simulationswerkzeug bietet die Möglichkeit, ein Fahrzeug als komplexes energetisches System zu beschreiben und dessen Verhalten in realistischen Betriebsszenarien zu untersuchen. Durch eine variable Modellierungstiefe ist es hierbei möglich, den Fokus auf unterschiedliche Subsysteme zu richten. So kann mittels der Streckenfahrt-Simulation die Eignungsprüfung eines Fahrzeug- bzw. Antriebskonzeptes für ein konkretes Betriebsszenario hinsichtlich des Fahrplans, des Energiebedarfs und des Betankungs- bzw. Ladeintervalls vorgenommen werden. Aber auch die Auslegung einzelner Systeme und Komponenten sowie die Gestaltung und Optimierung ihrer Regelstrategien ist in einem frühen Entwicklungsstadium möglich. Des Weiteren kann durch eine detaillierte Abbildung des Klimatisierungssystems eine Analyse des transienten Verhaltens durchgeführt werden. Dadurch lassen sich bestehende Systeme aber auch neuartige Komponenten unter Berücksichtigung diverser Fahrzeug-, Umgebungs- und Betriebsparameter energetisch und regelungstechnisch bewerten.

Im Projekt *Heat2Comfort* ermöglicht die Anwendung des Werkzeugs die Abschätzung des Abwärmeprofils der Brennstoffzelle in konkreten Betriebsszenarien des Fahrzeugkonzeptes *WARAN*. Daran anknüpfend wird untersucht, inwiefern neuartige Komponenten eines abwärmegestützten Klimatisierungssystems die anfallende Abwärme nutzen können. Erstes Zwischenfazit ist hier, dass die Heizenergie mittels der Thermischen Weiche nahezu vollständig durch die Abwärme gedeckt werden kann. Im Kühlfall kann durch die Absorptionskälteanlage ein Großteil der Kälteleistung bereitgestellt werden, jedoch ist hier eine zusätzliche elektrische Kälteerzeugung unabdingbar und ein signifikanter Unterschied zwischen Bergfahrt, Stillstand und Talfahrt festzustellen.

Innerhalb des Projekts wird weiterführend ein Hardware-in-the-Loop-Versuchsstand mit Absorptions- und Kompressionskälteanlage sowie Thermischer Weiche aufgebaut, um die Simulationsergebnisse zu validieren und die Regelung der neuartigen Systeme zu optimieren. Auf Grundlage der Zustandsgrößen des Fahrgastraums und den Daten zum Leistungsbedarf der Komponenten sind ferner Vergleiche von komfort- und energiebasierten Klimatisierungsregelungen sowie die Anwendung eines modellprädiktiven Regelungssystems geplant. Hierzu laufen bereits weiterführende Untersuchungen, inwiefern die Abwärmenutzung auf Basis von prädizierter Abwärme und Klimatisierungsbedarf unter Berücksichtigung aktueller Wetterdaten nochmals gesteigert werden kann. Nach Projektabschluss wird zudem die Anwendung des Werkzeugs auf ein prädiktives Thermomanagement der Antriebssysteme angestrebt.

Danksagung

Ein besonderer Dank gilt den Projektpartnern des Verbundprojektes *Heat2Comfort:*

- *Institut für Luft- und Kältetechnik gGmbH*
- *Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM Dresden*
- *WätaS Wärmetauscher Sachsen GmbH*

aber auch der *TÜV Rheinland Consulting GmbH* für das Forschungsmanagement und dem *Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz* für die Förderung der hier vorgestellten Untersuchungen. Zudem möchten wir uns beim *Verkehrsverbund Mittelsachsen* für die unkomplizierte Bereitstellung der Fahrgastzahlen bedanken.

Literatur

[1] T. Schirmer, J. Pagenkopf, H. Dittuns und J. Winter, „Brennstoffzelle oder Batterie? - Eine Analyse zum Einsatz in Triebzügen," ZEVrail, S. 40-47, Februar 2019.

[2] F. Siedler, U.-P. Menti, T. Eveline und P. Oelhafen: „Energieeffizienz von Heizung, Lüftung und Kühlung (HLK) im öffentlichen Verkehr", Kurzfassungsband 14. Symposion Energieinnovation, Institut für Elektrizitätswirtschaft und Energieinnovation (IEE) TU Graz, 2016, S. 417-418

[3] M. Klell, H. Eichlseder und A. Trattner: „Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik: Erzeugung, Speicherung, Anwendung", 4. Aufl., Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018

[4] M. Schott, O. Garack, L. Richter, S. Mönch und S. Mey: „Ein Konzept zur ganzjährigen Nutzung der Abwärme von Brennstoffzellensystemen für die Klimatisierung von Schienenfahrzeugen", Tagungsband 19. Internationale Schienenfahrzeugtagung Dresden, 2023, S. 92-94

[5] I. Ebinger und J. Morgenstern: „Klimatisierung von Schienenfahrzeugen: Grundlagen, Konzepte, Perspektiven", Beuth Verlag, 2021

[6] VDI: VDI-Wärmeatlas, Düsseldorf, Springer-Verlag, 2013

[7] M. Kache und S. Günther: „Brennstoffzellen in Schienenfahrzeugantrieben: Ein Überblick zu Potentialen und Grenzen der Wasserstofftechnologie in der Schienenfahrzeugtechnik", EI – Der Eisenbahningenieur, S. 26-31, 09 (2017)

Session 9
Oliver Garack, Max Schott, Anton Müller, Björn Kauer

Autoren

Garack, Oliver

Ich habe 2016 mein Maschinenbau-Studium mit der Vertiefung Schienenfahrzeugtechnik an der *TU Dresden* abgeschlossen und anschließend zwei Jahre bei *Dassault Systémes* als Anwendungsingenieur für die Mehrkörpersimulationssoftware *Simpack* gearbeitet. Seit 2018 bin ich bei *HÖRMANN Vehicle Engineering* als Systemingenieur für Antriebs- und Klimatisierungssysteme tätig. Darüber hinaus befasse ich mich mit der anforderungsbasierten Ausarbeitung von Fahrzeugkonzepten.

Schott, Max

Ich habe zwischen 2015 und 2020 Maschinenbau an *der HTW Dresden* studiert und arbeite seit 2021 als Berechnungsingenieur für Strömungsmechanik und Thermodynamik bei *HÖRMANN Vehicle Engineering*. Parallel dazu schreibe ich meine Dissertation zum Thema „Ein Beitrag zur Anwendung flüssigkeitsbasierter Flächenheiz- und Kühlsysteme in Schienenfahrzeugen“ an der *TU Dresden*.

Müller, Anton

Ich habe von 2015 bis 2020 Fahrzeugtechnik mit Spezialisierung auf Nutzfahrzeugtechnik an der *HTW Dresden* studiert und arbeite seit 2020 als Systemingenieur bei *HÖRMANN Vehicle Engineering.* Ein wesentlicher Fokus meiner Arbeit sind hierbei insbesondere die Brennstoffzellen- und Akkumulator-Technologie, Antriebs- und Klimatisierungssysteme sowie die Systemmodellierung und -simulation

Kauer, Björn

Mein Diplom an der *TU Dresden* im Studiengang Maschinenbau mit Schwerpunkt Simulationsmethodik erlangte ich 2022. Schon während meines Studiums wirkte ich an der Erstellung der vorgestellten Simulationsmodelle mit und arbeite nun als Systemingenieur bei *HÖRMANN Vehicle Engineering*.

Session 9
Yan Niu, Dietmar Kraft, Marc Breemeersch

Bogie Health Monitoring Using Acoustic Data

Niu, Yan[1]; Kraft, Dietmar[2]; Breemeersch, Marc[3]

[1]Alstom Transportation Germany GmbH
[2]Alstom Switzerland Ltd.
[3]Alstom Crespin SAS

Abstract

Bogies are critical train components. The health condition of bogie components has a direct influence on passenger ride comfort, running stability, and train reliability. From the aspect of maintenance, bogies are the main cost drivers. Bogie health monitoring is the subject of detection and localisation of degraded bogie components at an early stage. It facilitates the implementation of Condition-Based Maintenance (CBM) which has a big potential in reducing the maintenance cost.

A degradation of a bogie component often causes a change in its vibration characteristics. In many cases, such a change is reflected in the generated sound, and it is possible to detect the component degradation by recognising a certain characteristic pattern in the recorded acoustic data. This paper focuses on solutions of using acoustic data for bogie health monitoring. Examples from practical applications are presented, including using smartphones and using trackside acoustic monitoring. These examples cover both rotating components (e.g. axle bearing, wheel, gearbox, motor, etc.) and non-rotating components (e.g. yaw damper with a loose connection). Furthermore, the potentials of permanent onboard acoustic monitoring are discussed.

Keywords: Bogie Health Monitoring; Acoustic Data; Diagnosis; Condition-Based Maintenance (CBM)

1 Introduction

Bogies are one of the main subsystems of a railway vehicle. They are located below the car body, responsible for the following critical functions [1] [2].

- Vertically support the car body.
- Laterally guide the train on the track.
- Transmit the traction and the braking forces.

The health condition of bogie components has a direct influence on passenger ride comfort, running stability, and train reliability. Bogies are the train subsystem with the highest impact in term of costs [3]. From the aspect of maintenance, bogies account for 25-30% of the maintenance costs for the whole train [1]. Condition-Based Maintenance (CBM) is believed to be an attractive lever for gaining maintenance efficiency [4]. To implement CBM for bogies, information on bogie health condition is needed.

Auscultation is a popular medical diagnostic method. During a regular medical check-up, doctors often listen to the internal sounds of our body, e.g. heart sound, breath sound, etc. Abnormalities in the internal sounds indicate that the related organs may be in poor condition. Similar to the role of doctors, skilled train inspectors are hired by some rolling stock operators to regularly listen for possible defects while travelling on trains. In case an abnormal sound is detected from a bogie, train inspectors will provide maintenance suggestions. In this process, the sound from the bogie is sensed by human ears, and the bogie health condition is evaluated based on the subjective feelings and the experience of the train inspectors.

The railway industry is enjoying the benefits of the efficiency leaps brought by digitisation. This paper focuses on some digital solutions for monitoring bogie health condition by using acoustic data. First, the principle and the basic idea are illustrated. Then, two main categories of practical applications are considered, including using smartphones and using trackside acoustic monitoring. The presented examples cover rotating components (e.g. axle bearing, wheel, gearbox, motor, etc.) and non-rotating components (e.g. yaw damper with a loose connection). Advantages and challenges are discussed. In the end, an outlook is given on permanent onboard acoustic monitoring.

2 Principle

The health condition of an engineering structure can be evaluated based on its vibration. A defect or degradation in the structure can cause a change in its vibration characteristics [5] [6]. As a structure vibrates, its surrounding air particles are forced to move at the same

vibration frequency. Sound waves are formed in this process and propagate through longitudinal wave motion of air particles [7]. These propagating sound waves carry the information of the vibration patterns (e.g. frequency, energy, etc.) of that structure. With microphones, the sound waves can be sensed and recorded in form of acoustic data. By recording the sound from a running bogie, it is possible to extract the vibration patterns that are carried in the sound waves and to perform a diagnosis for the bogie components. Based on the analysis results, maintenance suggestions are defined with the support of domain experts, and suitable maintenance activities are planned and executed in a cost-efficient way. This contributes to a high availability of the fleet. The basic idea is illustrated in Figure 1.

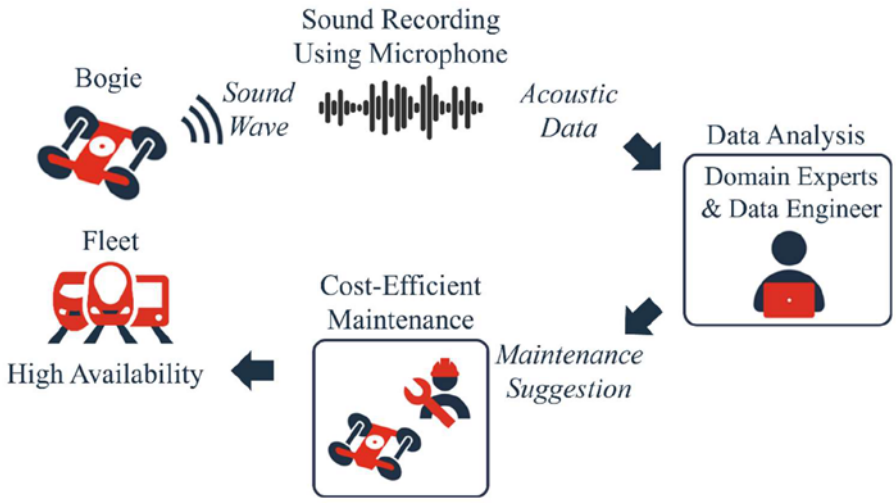


Figure 1: Basic idea

3 Applications Using Smartphones

Smartphones have become a vital part of our daily life. When people go out, smartphones have nearly the same priority as wallets and house keys. In a present-day smartphone, different types of sensors are integrated. Figure 2 provides an overview of the sensors that are available in most smartphones currently on the market. These integrated sensors can be utilised for condition monitoring purposes. For example, a pioneer study can be found in [8] which discusses the potentials of smartphones for railway condition monitoring, including ride comfort evaluation, track irregularity detection and localisation, wheel flat detection, etc.

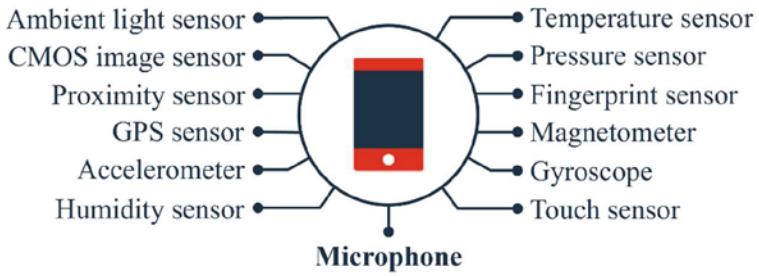


Figure 2: Sensors available in a typical present-day smartphone [9]

For bogies which are not instrumented with condition monitoring systems, the maintenance activities are usually planned based on pre-defined mileage values or time intervals but not on the real condition of the bogie components. In case a bogie is found with a degraded component, the following questions are often raised:

- Do we have such component degradation on other bogies?
- If yes, on which bogie?

To answer the questions above, smartphones can be an efficient tool in many cases. Each smartphone usually comes with an application which is capable of recording sound or video (with sound). This means a smartphone can work as a portable acoustic data acquisition device. By recording the acoustic data at a position near the bogie of interest, it is already possible to perform some diagnosis for that bogie. Figure 3 lists the main steps which have been successfully applied in different projects. A practical aspect is that the train speed is often not stable during the sound recording. This in turn causes the recorded acoustic signal to be non-stationary. Spectrogram is a simple way of visualising the time-frequency patterns of a non-stationary signal. In diagnosis for mechanical components, harmonics and sidebands are two very useful patterns [10]. Figure 4 presents a proposed flowchart which assists bogie health diagnosis. In case the harmonic or sideband spacing shows a correlation with the train speed, it often indicates that a rotating component on bogie has a defect or degradation. By comparing the harmonic or sideband spacing with the fault characteristic frequencies of different rotating components (e.g. axle bearing, wheel, gearbox, motor, etc.), it is possible to identify the degraded component. Track irregularities have also an influence on the recorded acoustic data. In case the influence from track irregularities is dominating, sound recordings can be performed at different track sections to reduce the influence from track irregularities.

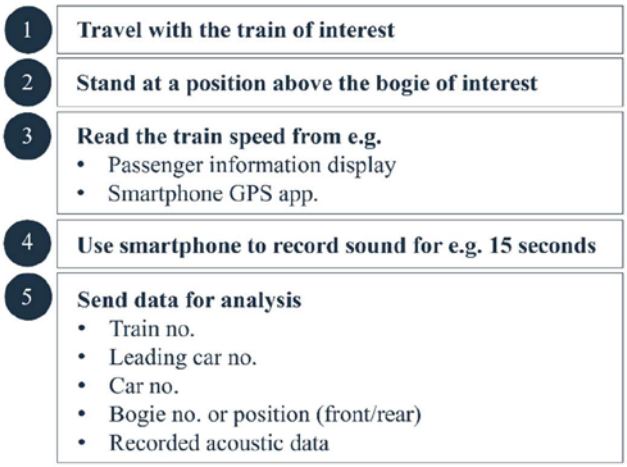


Figure 3: Main steps of onboard acoustic data acquisition using smartphone [11]

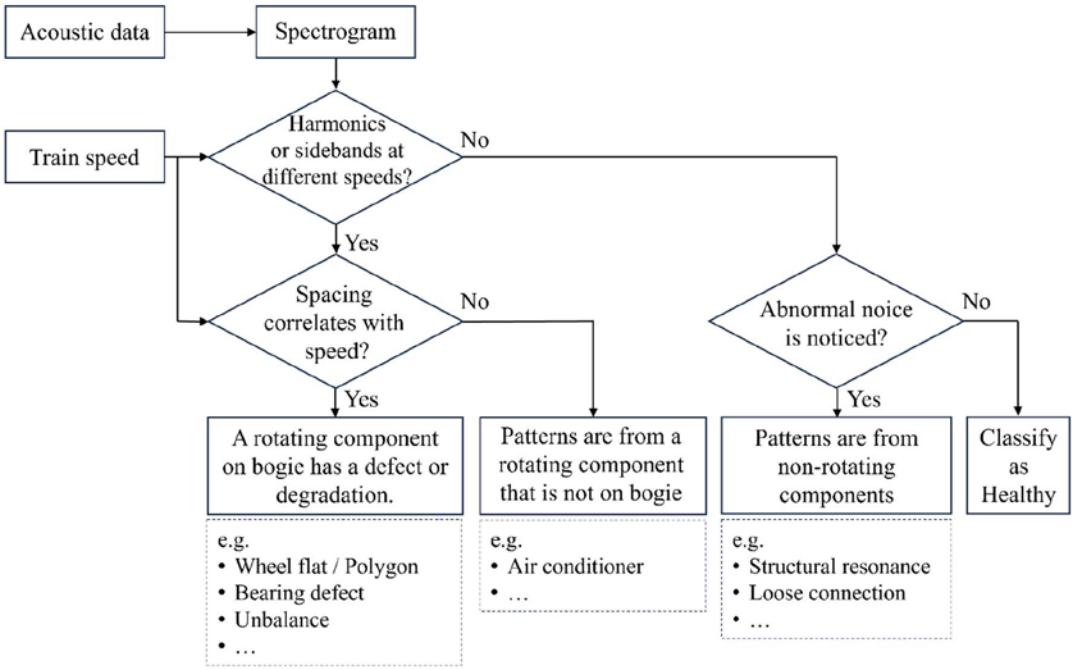


Figure 4: A proposed flowchart for bogie health diagnosis using smartphone

3.1 Examples

The method that is described in Figure 3 and Figure 4 has been applied in different projects (in Germany, France, UK, Canada, etc.) during either test runs or normal passenger service. Some selected examples are provided in Figure 5.

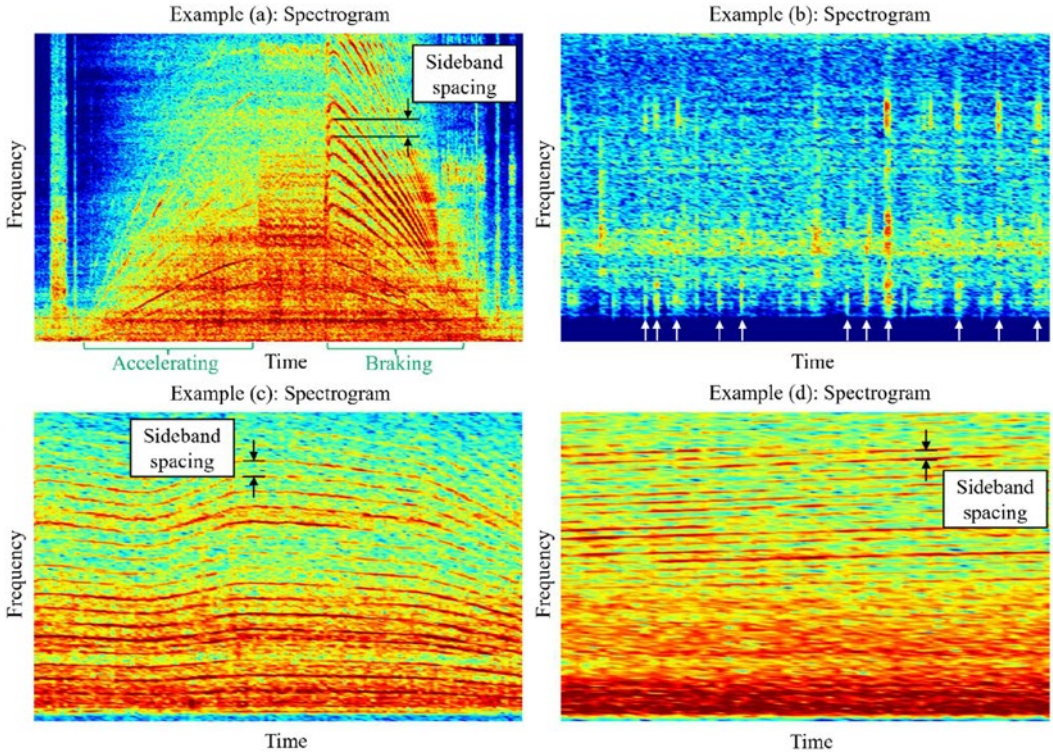


Figure 5: Examples of spectrogram using smartphone acoustic data from (a) a bogie with a faulty gearbox bearing (train type: metro); (b) a bogie on which a yaw damper has a loose connection (train type: regional train); (c) a bogie with faulty axle bearing (train type: tram), and (d) a bogie with a wheel defect (train type: high-speed train)

Scenario 1: Diagnosis for bogies with abnormal noise

A metro was reported with abnormal noise, especially during braking. Sounds were recorded by a smartphone close to the suspicious bogie. The generated spectrogram is provided in Figure 5(a). It can be seen that clear sidebands appear, especially during the braking phase. According to the flowchart in Figure 4, a rotating component on that bogie probably has a defect or degradation. By comparing the sideband spacing with the fault characteristic frequencies of different rotating components on that bogie, it was identified that a gearbox bearing had a defect on the outer ring.

During test runs of a regional train, rattling sounds were noticed. It was not clear which component caused those sounds. There was also a concern that the axle bearing could have had a defect. To support the diagnosis, the rattling sounds were recorded using a smartphone. The corresponding spectrogram is presented in Figure 5(b) in which the white arrows at the bottom indicate the occurrence of the rattling sounds. Following the

rules in Figure 4, it was concluded that the rattling sounds were not caused by a faulty axle bearing but by a non-rotating component. Such a conclusion already supported to narrow down the scope in finding the root cause. It was in the end confirmed that the rattling sounds were caused by a yaw damper which had a loose connection.

Scenario 2: Fleet scan for targeted component degradation

Currently there are still many bogies which have not been instrumented with condition monitoring systems. Smartphones, as a cost-efficient solution, have recently been applied to several fleets of trains for detecting targeted component degradations, e.g. faulty axle bearing, wheel flat, etc. Following the steps in Figure 3, sound recordings are performed at pre-defined positions on the train. Based on the analysis results, bogies with degraded components are identified and maintained. In the meantime, train availability is guaranteed.

Figure 5(c) shows an example which is taken from a scanning for a fleet of trams, some of which have been found with defects on the outer ring of the axle bearing. During the sound recording, the train speed reached about 30 km/h and then started to decrease. Such a fluctuation of the train speed is also reflected by the pattern of sidebands, and the sideband spacing fits well with the target fault characteristic frequency of the axle bearing.

The example in Figure 5(d) is from a scanning for a fleet of high-speed trains. During the sound recording, the train speed was increasing, approaching 250 km/h. This is also reflected by an increasing pattern of the sidebands, and the sideband spacing matches the wheel rotating frequency. This indicates that the bogie has a wheel defect (e.g. wheel flat, polygon, etc.).

3.2 Advantages

Bogie health monitoring using smartphone acoustic data has the following advantages.

+ Low hardware cost - Only a smartphone is needed.
+ Easy to apply - No professional skill is needed. Quick deployment is possible.
+ High train availability - Data acquisition can be performed during normal passenger service. There is no need to take train out of service for mounting/dismounting sensors.

3.3 Challenges

Through the practical applications, the following potential challenges are noticed.

- Train speed information is sometimes not available. Train speed information is needed in the calculation of the fault characteristic frequencies of rotating components. Most of the time, train speed information can either be read from the information displays inside the train or be estimated by using a smartphone GPS application. However, there are still some cases in which the display is not working properly or the GPS signal is not available (e.g. in a tunnel).
- Some indicative patterns are more obvious in certain dynamic scenarios, e.g. with a certain train speed, at a certain track section, under a certain track excitation, etc. If the time slot for sound recording does not coincide with those dynamic scenarios, there is a risk to miss recording those indicative patterns.
- Degraded components can only be localised to the bogie level but not to the axle level. For example, if a bogie is detected with faulty axle bearing, it is still challenging to determine on which axle the faulty axle bearing is located.
- Data volume might not be sufficient for trend analysis. The results from a sound recording reflect the bogie health condition only at that time instance. To perform a trend analysis for health condition prediction, sound recordings need to be performed more frequently, e.g. at regular time intervals.
- Data privacy. It is suggested to perform sound recording when there are no passengers around who may be speaking. If it is not the case, passengers must be informed in advance about the audio recording activity and its purpose.

4 Applications Using Trackside Acoustic Monitoring

Sounds from passing trains carry not only the rhythm from the Doppler effect but also the health condition information of bogie components. For example, Figure 6 shows the spectrograms for the pass-by noise of two motor bogies. Both bogies are with known motor bearing defects but at different stages, one at a relatively early stage and the other one with clear audible noise. The two bogies are of the same type and their pass-by speeds are at the same level. The same colour scale is applied for the two spectrograms. The sideband spacing in the spectrogram matches a fault characteristic frequency of the motor bearing. The intensity and the distribution of the sidebands are different for the two bogies. This indicates that their motor bearings are with defects at different stages.

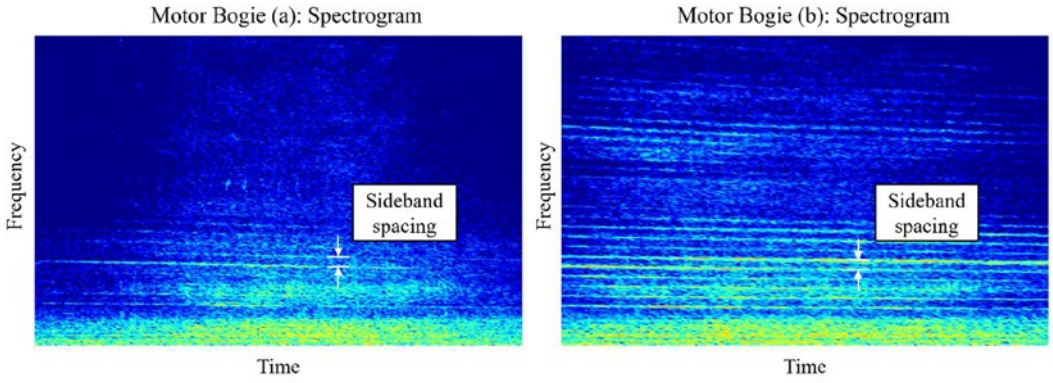


Figure 6: Spectrograms for the pass-by noise of two motor bogies with known motor bearing defects: (a) at a relatively early stage; and (b) with clear audible noise

According to a cost-benefit analysis that is recently published by Rail Safety and Standards Board (RSSB) in UK, trackside acoustic monitoring is highly likely to deliver significant benefits for train owners/maintainers [12]. Alstom's Mechatronics team has developed a pilot solution for trackside acoustic monitoring [13]. This solution has been deployed at regular time intervals on the networks of two urban rail operators. In partnership with an operator, Alstom is currently developing a permanent and automatic trackside acoustic monitoring system.

4.1 Examples

Figure 7 provides photos of different test sites where the developed pilot solution has been deployed. As it is shown in Figure 7, two microphone arrays are placed next to a selected track section. The utilisation of a microphone array makes it possible to apply the beamforming technique which can enhance sounds from a specified direction [14]. With the beamforming technique, each axlebox is tracked in sequence by a steered beam pattern of the microphone array, from the time when the train enters the measurement area to the time when the train leaves the measurement area. This helps to localise a faulty component to the correct axle and the correct side. The principle of axlebox tracking is illustrated in Figure 8.

Figure 7: Photos of test sites on the rail network of two operators [11]

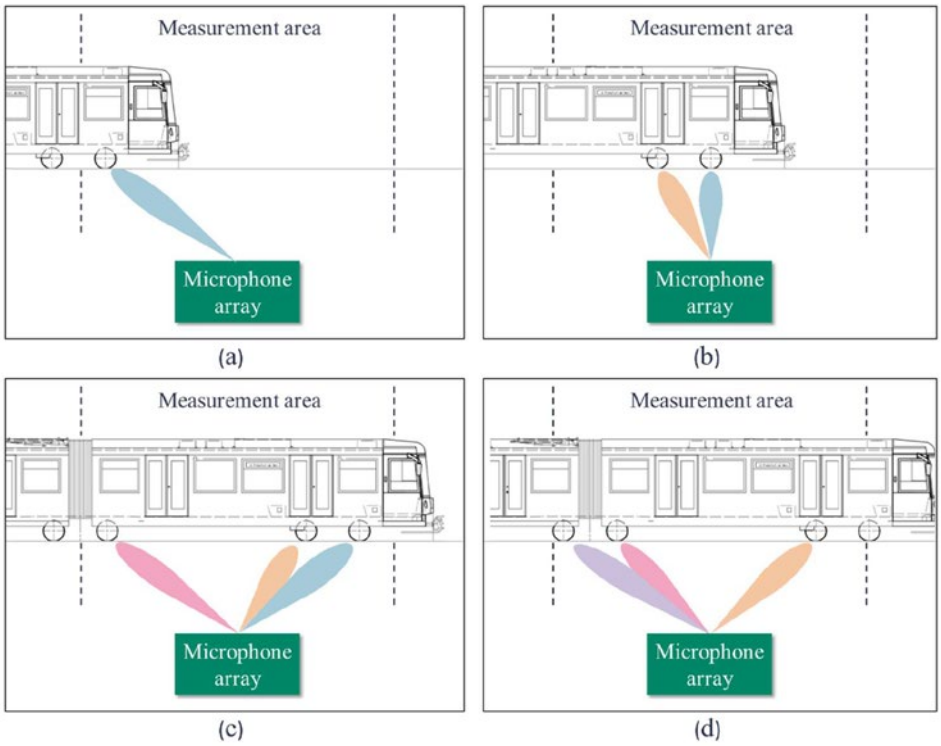


Figure 8: Principle of axlebox tracking by a steered beam pattern [13]

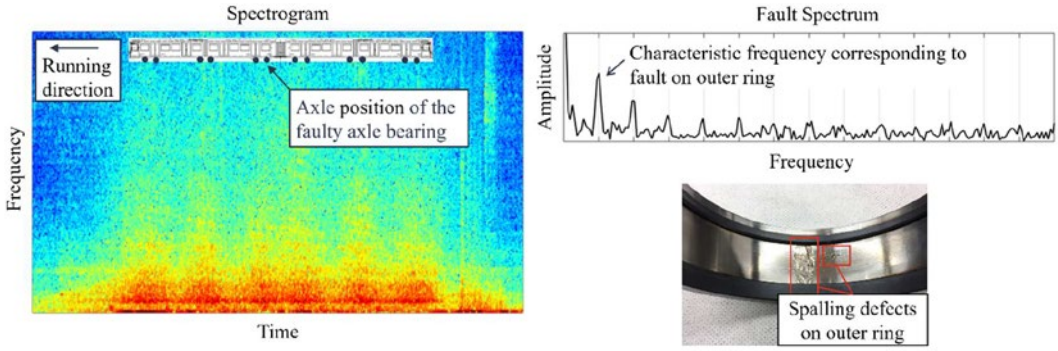


Figure 9: An example of axle bearing fault detection using trackside acoustic monitoring

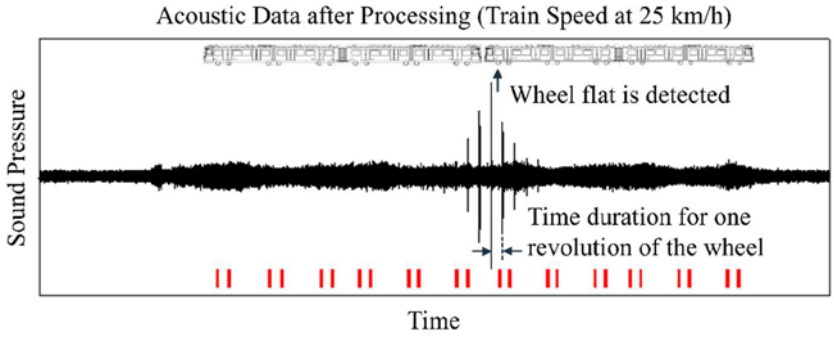


Figure 10: An example of wheel flat detection using trackside acoustic monitoring

Figure 9 provides an example of a faulty axle bearing that was detected from an in-service train. With the beamforming technique and advanced signal processing, the faulty axle bearing was detected and localised to the correct axlebox. Based on the results, maintenance resources were planned in a cost-efficient way, and the detected faulty axle bearing was dismounted after 2 months. The photo from the visual inspection of the bearing confirms the analysis results from the trackside acoustic monitoring.

Figure 10 presents an example of wheel flat detection. The acoustic data were recorded from an in-service train. The red bars indicate the time instances when a wheelset passes by. The pattern in Figure 10 indicates that there is a wheel flat. The position of the related wheelset is also localised.

4.2 Advantages

Trackside acoustic monitoring has the following advantages.

- Efficient - One trackside acoustic monitoring system can monitor the bogie components from all passing trains.
- Reliable - Through several years of practical application and validation, failure modes can be reliably distinguished.
- Early-warning - Faulty axle bearings are detected in an early stage. This not only helps to avoid service disruptions, but also wins time for the maintenance team to better schedule the related activities and resources.
- High train availability - Data acquisition is realised when in-service trains pass by, with no interruption to normal train operation, and thus contributes to high train availability.
- Higher fault localisation accuracy - Compared to using a single microphone, the utilisation of microphone arrays makes it possible to improve the fault localisation accuracy to axle level. Such localisation accuracy helps to increase the efficiency of the maintenance work and in turn to reduce the maintenance costs.
- Stable data stream for trend analysis - With a permanently installed trackside acoustic monitoring system, acoustic data from a train can be recorded every time when that train passes by. Such a stable data stream builds a good base for estimating trends of bogie health condition. Furthermore, with the power of Artificial Intelligence (AI) techniques, it will be possible not only to realise bogie health condition evaluation in an automatic way, but also to predict more precisely until when a component replacement will be needed. A stable data stream is key to predictive maintenance which has the potential to further reduce the Life Cycle Cost (LCC) and maintain high train availability, as illustrated in Figure 11.

Figure 11: AI-driven predictive maintenance for bogies [11]

5 An Outlook on Permanent Onboard Acoustic Monitoring

Through practical applications of smartphones, several challenges are noticed. To fill the gaps that are caused by those challenges, a promising solution is to install acoustic monitoring devices below the car body, permanently monitoring the health conditions of bogie components. This solution has the following potential advantages.

- Less cables - All cable connections for onboard acoustic monitoring can be realised only on the car body side. This makes the integration work easier.
- High train availability - Bogie health monitoring takes place during normal passenger service.
- Stable train speed information - Through communication with e.g. Train Control and Management System (TCMS), stable train speed information is available.
- Capturing all dynamics scenarios - Permanent onboard acoustic monitoring is capable of recording sound at different dynamic scenarios, which increases the chance to detect a component degradation at an early stage.
- Applicable for different bogie designs.
- Applicable for all train speed range. This solution is applicable from trams to high-speed trains.
- Stable data stream for trend analysis. Permanent onboard acoustic monitoring makes it possible to get bogie health condition information every day. This builds a stable data stream for trend analysis and prediction.

Digitalisation is revolutionising the railway industry. As trains continue harvesting data, centralised data processing becomes more and more impractical, and a desirable trend is to adopt edge computing to decentralise the processing power out to the field [15]. Acoustic monitoring faces also the challenge of how to handle the big data. In this sense, a synergy between edge computing and cloud computing can be a solution. In the meantime, it is still suggested to keep a door open to the raw data. In case some abnormality or a component degradation is detected, an access to raw data can be very helpful for other analysis, e.g. Root Cause Analysis (RCA), Machine Learning (ML) model updating, etc.

6 Summary

This paper focuses on acoustic solutions for bogie health monitoring, including using smartphones and using trackside acoustic monitoring. Some examples from practical applications are presented. Both solutions have advantages and are considered as cost-

efficient tools for many rail operators in their transformation to CBM or even predictive maintenance for bogies. Some challenges are also noticed through practical applications using smartphones. To fill the gaps caused by those challenges, permanent onboard acoustic monitoring can be a promising solution.

References

[1] Kwasnicki, E.: Fahrwerk. In C. Schindler (Ed.), *Handbuch Schienenfahrzeuge: Entwicklung, Produktion, Instandhaltung*, pp. 349-371. Hamburg: DW Media Group GmbH, 2014.

[2] Spiryagin, M., Wu, Q., Wolfs, P., and Spiryagin, V.: Design of Powered Rail Vehicles and Locomotives. In S. Iwnicki, M. Spiryagin, C. Cole, and T. McSweeney (Eds.), *Handbook of Railway Vehicle Dynamics*, 2 ed., , pp. 115-163. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2020.

[3] Dersin, P., Alessi, A., Fink, O., Lamoureux, B., and Brahimi, M.: Prognostics and Health Management in Railways. In Q. Mahboob and E. Zio (Eds.), *Handbook of RAMS in Railway Systems: Theory and Practice*, pp. 79-98. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2018.

[4] Stern, S., Behrendt, A., Eisenschmidt, E., Reimig, S., Schirmers, L., and Schwerdt, I.: The Rail Sector's Changing Maintenance Game: How Rail Operators and Rail OEMs Can Benefit from Digital Maintenance Opportunities. Digital McKinsey, 2017.

[5] Fritzen, C.-P.: Vibration-Based Techniques for Structural Health Monitoring. In D. Balageas, C.-P. Fritzen, and A. Güemes (Eds.), *Structural Health Monitoring*, pp. 45-224. London: ISTE Ltd., 2006.

[6] Farrar, C. R. and Worden, K.: *Structural Health Monitoring: A Machine Learning Perspective*. West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd., 2013.

[7] Everest, F. A. and Pohlmann, K. C.: *Master Handbook of Acoustics*. The McGraw-Hill Companies, 2009.

[8] Brundisch, V.: Zustandsüberwachung mit dem Smartphone. In *ZEVrail,* vol. 142, pp. 22-31, 2018.

[9] Majumder, S. and Deen, M. J.: Smartphone Sensors for Health Monitoring and Diagnosis. In *Sensors,* vol. 19, no. 9, 2019.

[10] Randall, R. B.: *Vibration-Based Condition Monitoring: Industrial, Aerospace and Automotive Applications*. John Wiley & Sons, Ltd., 2011.

[11] Niu, Y., Kraft, D., Manns, C., and Breemeersch, M.: Cost-Efficient Solutions for Bogie Health Monitoring. In *ZEVrail,* vol. 147, no. 4, pp. 128-133, 2023.

[12] Bevan, A. and Shackleton, P.: Comparison of Options for Acoustic Monitoring of Axle Bearings: Cost-Benefit Analysis. Rail Safety and Standards Board Ltc., 2023.

[13] Niu, Y., Kraft, D., and Breemeersch, M.: Potentials of Axle Bearing Condition Monitoring - Examples from Practical Applications. In *ZEVrail,* vol. 144, no. 3, pp. 87-93, 2020.

[14] Thompson, D.: *Railway Noise and Vibration: Mechanisms, Modelling and Means of Control*. Elsevier, 2009.

[15] Barrow, K.: Bridging the Big Data Gap. In *International Railway Journal,* vol. 58, no. 7, pp. 40-44, 2018.

Authors

Niu, Yan

Bachelor degree in Mechanical Engineering and Automation from Shanghai Jiao Tong University (SJTU) in China in 2006. Master degree in Mechatronics and PhD degree in Mechanical Engineering from University of Siegen in Germany in 2009 and 2018. Research Assistant with focus on Structural Health Monitoring (SHM) at Institute of Mechanics and Control Engineering - Mechatronics at University of Siegen from 2009 to 2013. CBM Data Engineer at Bombardier Transportation GmbH from 2013 to 2021. Data Engineer at Alstom since 2021.

Session 9
Yan Niu, Dietmar Kraft, Marc Breemeersch

Kraft, Dietmar

Studies of Mechanical Engineering with specialisation on railway technology at Technical University of Aachen (RWTH) until 1992. Research Assistant with focus on railway mechatronics at Institute of Railway Vehicles and Conveyor technique (IFS) at RWTH Aachen. PhD degree in 1998. Since 1998 different functions in bogie development at Alstom Switzerland (resp. predecessor companies) including vehicle dynamics, testing, safety, project and bid engineering, product management, mechatronic projects. Since 2018 product manager mechatronics.

Breemeersch, Marc

Degrees as Industrial Engineer Electronics (1986) at KTH Oostende and Civil Engineer Computer Sciences & Mechatronics (1989) at KU Leuven. 1989-2000 System Engineer at Bombardier for different types of systems (e.g. displays for public announcements, video surveillance, audio, passenger alarm, pre-recorded announcements or evacuation messages, radio interfaces, tilting). Since 2000 Manager of the Mechatronic department. The activities are focused on the definition of the hardware, software development and testing of different Mechatronic systems (e.g. tilting, active suspensions, active steering, track monitoring and condition based maintenance systems).

Session 9
Nutchanon Prasomsuk, Sebastian Winkelheide, Christian Schindler

Crashworthiness Design of a Light Commuter Rail Vehicle Operating on Secondary Lines

Prasomsuk, Nutchanon, Winkelheide, Sebastian, Schindler, Christian

Institute for Rail Vehicles and Transport Systems, RWTH Aachen University, Aachen, Seffenter Weg 8, 52074, Germany

Summary

A newly designed rail vehicle in Europe must fulfill the requirements specified in the European standard EN15227 to prove sufficient and acceptable crashworthiness. A vehicle designed as a so-called Light Commuter Rail Vehicle (LCRV) refers to a lightweight railcar operating on secondary lines. Lightweight is necessary for modern engineering design. Although it has many benefits, it creates difficulty in the crashworthiness design. An LCRV has low longitudinal structural strength that affects the ability of the energy-absorbing devices. It is only a single unit; its weight is comparable with large road vehicles like trucks. A collision with them can be dangerous to LCRV. With the Aachener Rail Shuttle (ARS), a totally innovative design is introduced, and the restrictions to crashworthiness are even more brutal. This paper describes the crashworthiness design process, its problems and limitations, and possible solutions for this type of rail vehicle. The ARS's crashworthiness concept is presented as a design example. The crashworthiness design process consists of three main procedures: developing the crashworthiness concept, analyzing the collision behavior in one dimension, and finally, in three dimensions. The goal is to fulfill the three primary requirements of the European standard: the deceleration limit, the overriding protection, and the survival space.

Keywords: Crashworthiness, Light Commuter Rail Vehicle, Rail Vehicle Design, Collision

1 Introduction

Germany aims to reopen disused short-distance railway lines to promote rail transportation in the countryside, [1-2]. More than 95% of these lines are shorter than 30 kilometers connecting small cities to mainline railways, known as secondary lines. Conventional trains like diesel or electric multiple units (DMU or EMU) may not fit in these very low-passenger density routes in terms of cost efficiency. Therefore, an innovative lightweight rail vehicle smaller than conventional regional trains seems to be more suitable for this type of railway line, [3]. The idea of this kind of rail vehicle is initially known in Germany as a railbus (Schienenbus). The idea was developed over time and later known as LNT (Leichter Nahverkehrstriebwagen). This type of railway vehicle is designed with low longitudinal stiffness of the vehicle frame but has a good braking performance comparable to tram vehicles. It operates in mixed traffic with mainline vehicles in urban and regional areas. The crashworthiness design of this type of rail vehicle is challenging because the low longitudinal stiffness causes difficulty in meeting the present crashworthiness requirements in secondary line operation.

At present, a newly designed rail vehicle's passive safety is analyzed according to the European standard EN15227. [4-6] The standard defines the crashworthiness requirements for rail vehicles based on their operational type and possible collision scenarios. A rail vehicle operated on secondary lines has several requirements because it is considered to run on an open line that shares routes with other types of rail vehicles. Besides, this type of operation can encounter level crossings so colliding with road vehicles is possible. Therefore, the crashworthiness requirements are strict because many types of obstacles are possible.

The Aachener Rail Shuttle (ARS) project aims to introduce an innovative light rail vehicle operating on low demand/non-used secondary lines. [7] The vehicle belongs to the so-called Light Commuter Rail Vehicle (LCRV) class. It is a single wagon and very light. However, its low longitudinal stiffness affects the ability of the energy-absorbing devices, which limits the crashworthiness design. The comparable weight to large road obstacles raises doubt about safety in case of a collision. Moreover, a unique design concept of decoupling between the chassis and the passenger compartment is proposed. This leads to a special challenge to protect the passenger compartment which should not bear external loads.

2 Crashworthiness design process

The chosen crashworthiness design process consists of three main steps (developing crashworthiness concept, one-dimensional analysis, and three-dimensional analysis) as shown in Fig. 1.

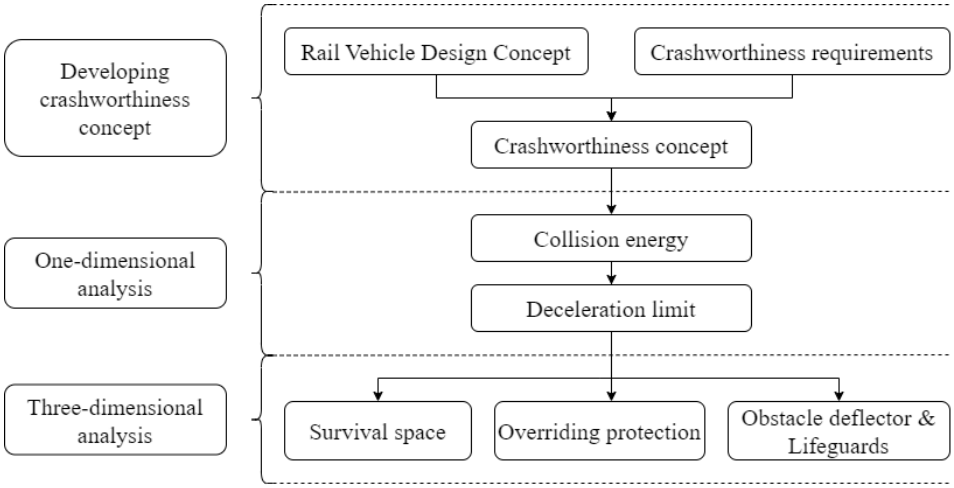


Figure 1: Crashworthiness design process

The process begins with defining the crashworthiness concept. The requirements from the rail vehicle design affecting the crashworthiness concept are gathered and summarized. Besides, the crashworthiness requirements according to the European standard EN15227 are listed. Then, these two aspects are considered together to elaborate the crashworthiness concept for the rail vehicle.

The crashworthiness design relies heavily on numerical simulations to prove the crashworthiness performance. The simulation ranges from a simple one-dimensional analysis to a sophisticated three-dimensional simulation of the designed vehicle. The one-dimensional collision study is performed by analyzing the differential equation of motion and using the commercial software (LS-DYNA). First, the collision energy is calculated for each design collision scenario to identify the worst collision scenario in terms of required energy absorption. It will be used as a reference scenario to evaluate the deceleration limit. Next, the conventional analysis performs a fundamental calculation, before further sophisticated simulation by the commercial software. At this step, the energy-absorbing elements are defined regarding technology and characteristics. Later, the result from the actual crash experiment is used to improve the simulation. The final step is three-dimensional analysis. The other design collision scenarios are investigated to evaluate survival space and overriding protection, and obstacles & lifeguards according to the requirements from the standard.

3 Developing crashworthiness concept

The ARS vehicle has unique design characteristics. A list of requirements from the design concept and its impact on crashworthiness design can be summarized in Tab. 1.

Table 1: Design concept and impact on crashworthiness design

Characteristic	**Impact on crashworthiness design**
Operation on secondary lines	Crashworthiness category C-III (EN15227)
Passenger vehicle category P-III (EN12663)	Static buffer load is limited to 800 kN
The passenger compartment should not be subjected to any external force	All collision force is taken by the chassis via energy absorbers
No center coupling	No central energy absorber
Compact design	Crumple zone is kept as short as possible
Single wagon	Symmetric design on both vehicle ends

The ARS vehicle falls into the crashworthiness design category C-III according to the European standard EN15227. The standard aims to guarantee the passive safety of rail vehicles in four aspects: Overriding protection, Survival space, Deceleration limit, and Obstacle deflector and lifeguard. The obstacles in a collision could range from small obstacles like debris on track to large obstacles like heavy trains. The standard defines four major design collision scenarios to validate all four aspects of the crashworthiness requirements. The crashworthiness requirement for category C-III is shown in Tab. 2.

Table 2: Crashworthiness requirements for category C-III according to EN15227

Crashworthiness requirements for category C-III	Design collision scenarios				
	S1	S2		S3	S4
		S2-1	S2-2		
	Identical train	80 t freight train	129 t regional train	15 t deformable obstacle	Leading end impact with a low obstacle
Overriding	●				
Survival space	●	●	●	●	
Deceleration limit	●	●	●		
Obstacle deflectors and lifeguards					●

According to the standard, the different obstacles result in different collision positions at the vehicle front. Side buffers are installed for a collision with a freight wagon. A center buffer is usually installed for a collision with a regional train. Generally, the energy absorber for the center position is part of a center coupling; however, the design concept of ARS intends to omit a center coupling. The reason is that the ARS vehicle is planned to operate solely on secondary lines without coupled wagons. Hence, the ARS design does not include a center buffer and uses only side buffers as a primary energy absorber. The standard defines a collision with a center coupling as the design collision scenario S2-2 (a collision with a regional train with a center coupling). The 129 t regional train has a center coupler of a total deformable length of 475 mm. Even though the ARS vehicle has no center buffer, the designer aims to stop a collision with a regional train before its center coupler reaches the safety zone of the ARS vehicle. Detailed analysis is explained in Chapter 4. Besides, obstacle deflectors and lifeguards are separate devices from the main energy-absorbing elements and have independent validation methods. This paper does not focus on them. Hence, the design collision scenario S4 will be neglected in this paper. Then, the crashworthiness concept is designed as in Tab. 3.

Table 3: Crashworthiness concept design

Crashworthiness requirements for category C-III	Design collision scenarios				**Crashworthiness concept**
	S1	S2-1	S2-2	S3	
Overriding Protection	●				Equipped with Anti-climber
Survival space	●	●	●	●	Energy absorbers absorb all collision energy
Deceleration limit	●	●	●		Appropriate force-deformation characteristics
Crashworthiness concept	Side buffers with anti-climber	Only side buffers	No intrusion of center coupling into survival zone	No intrusion of obstacle into survival zone	

Four design collision scenarios (S1, S2-1, S2-2, and S3) are used to validate the ARS's crashworthiness. The ARS's crashworthiness concept is summarized as follows:

- The energy-absorbing elements will be two side buffers equipped with anti-climber at both vehicle ends.

- The buffers can absorb all collision energy with a limited collision force at 800 kN.
- There is no intrusion of the collided obstacle into the survival zone (the passenger compartment). The crumple zone is limited to energy-absorbing element length and is designed to be as short as possible.

4 One-dimensional analysis

4.1 Collision energy

The train collision is assumed to be a perfectly inelastic collision. The collided objects will stick together after a collision. While the total momentum is conserved during the collision, a part of the total kinetic energy is absorbed by the collision elements. This dissipated energy from a collision is called collision energy. It can be computed from the mass of collided objects and their velocity according to eq. 1.

$$E_c = \frac{m_1 m_2}{2(m_1 + m_2)}(v_1 - v_2)^2 \tag{1}$$

The collision mass of the colliding vehicle is the design mass in working order plus 50% of the mass of seated passengers following EN15663, [8]. All standardized obstacles are un-braked and stationary ($v_2 = 0$ km/h). In Tab. 4, the result shows that the design collision scenario 2-1 (a collision with a freight train) generates the highest collision energy of 462 kJ. Thus, it will be used as the reference scenario for verifying deceleration limit.

Table 4: Collision Energy

Design collision scenarios	S1	S2-1	S2-2	S3
ARS mass, m_1 (ton)	25.2	25.2	25.2	25.2
Obstacle mass, m_2 (ton)	25.2	80	129	15
ARS velocity, v_1 (km/h)	25	25	10	25
Collision energy, E_c (kJ)	304	462	82	227

4.2 Deceleration limit

One aspect of passenger safety during a collision is ensured by limiting the train's deceleration. The deceleration limit will decrease the severity of the secondary impacts on the passengers. According to the standard, the deceleration limit is set to two criteria. The first criterion is that rail vehicles must have a mean decelerate below 10g (98.1 m/s^2) during any 30 milliseconds collision period. The second criterion is that a mean deceleration must be below 5g (49.05 m/s^2) during any 120 milliseconds collision period.

After the crashworthiness concept and the reference collision scenario have been defined, the collision analyses are performed to design suitable energy-absorbing elements. One-dimensional crash analysis is performed first to determine the force-displacement characteristic of the energy-absorbing elements, which is essential to achieve the desired safety. It defines how the collision energy is absorbed. One-dimensional analysis simplifies all complex geometries of rail vehicle components by rigid bodies/point masses. It limits many degrees of freedom of the rail vehicles into one degree of freedom in the longitudinal direction (train running direction). This simplification makes the analysis faster and more easily repeatable. The design collision scenarios generally involve a moving train colliding with another stationary object. The collision can be simplified using a spring-mass system, as in Fig 2.

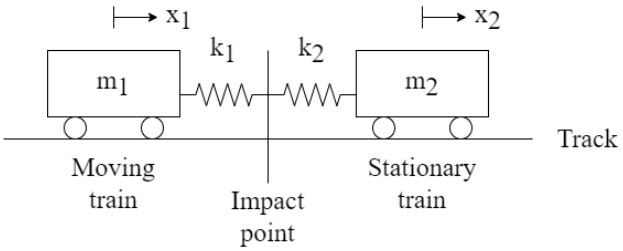


Figure 2: One dimensional trains collision model

Springs represent energy-absorbing components without a damping effect. The collision is assumed as a perfectly inelastic collision. Therefore, the collision can be analyzed by the differential equation of motion with initial conditions [9-10], as in Tab 5. The design collision scenario 2-1 is investigated. The analysis aims to find the energy absorber's characteristic (spring's characteristic, k_1) that complies with the deceleration limit. The conventional analysis provides fundamental results, which guide further detailed simulations by commercial software.

Table 5: One dimensional crash analysis equation

Description	Equation	
The spring's characteristics	$k_{eff} = \frac{k_1 k_2}{(k_1 + k_2)}$	(2)
The differential equation of motion	$m_1 m_2 (\ddot{x}_1 - \ddot{x}_2) = -(m_1 + m_2) k_{eff} (x_1 - x_2)$	(3)
Initial conditions	$x_1 = x_2 = 0$ $\dot{x}_1 = v_1 , \dot{x}_2 = v_2 = 0$	(4)
The relative acceleration	$a_{rel} = \ddot{x}_1 - \ddot{x}_2 = -\omega v_1 \sin \omega t$	(5)
The angular frequency	$\omega = \sqrt{\frac{(m_1 + m_2)}{m_1 m_2} k_{eff}}$	(6)

Conventional analysis and commercial software show similar results. It verifies the accuracy of the simulation model. The impact force is limited to 800 kN, and the spring's characteristic (k_1) is set to 738 kN/m; the acceleration-time relation of a collision with a freight train can be seen in Fig. 3.

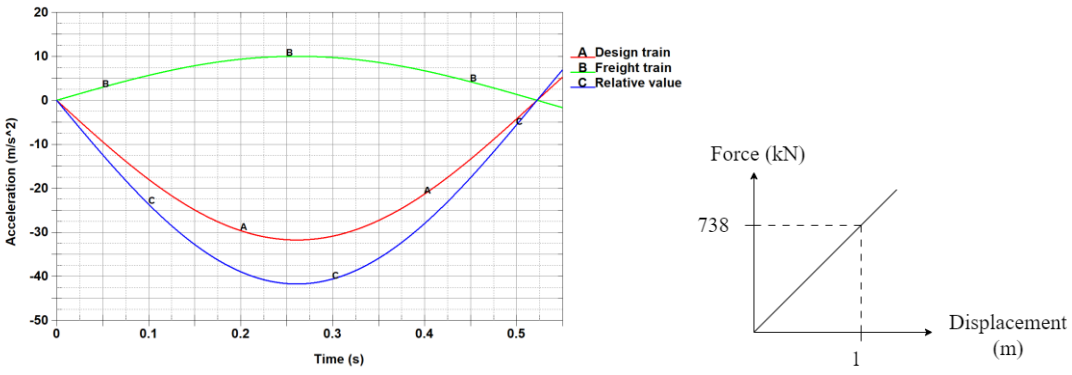


Figure 3: Acceleration-time diagram of the design collision scenario 2-1 (left), spring's characteristic (k_1) (right)

The maximum deceleration of the designed train is 31.7 m/s^2. Hence, it fulfills the deceleration limit. However, this spring's characteristic needs considerable deformation length. It requires more than 1084 mm. Thus, the designers aim to minimize this length as much as possible to fulfill the compact design concept.

There are two main types of energy absorbers (reversible and non-reversible energy absorption elements). After a collision, the reversible type is reusable, while the non-reversible type will be damaged. However, the non-reversible type requires a shorter length to absorb the same energy level. Therefore, using non-reversible energy absorbers is considered. If the non-reversible energy absorber can absorb energy perfectly, the deformation length can be calculated from absorbed energy and impact force as in Eq. 7.

$$E_{absorb} = F_{impact} \cdot L_{deformable} \tag{7}$$

The analysis reveals that the required deformable length is about 542 mm for non-reversible energy absorbers. The one-dimensional simulation shows that the maximum deceleration of the designed train is still at 31.7 m/s^2, as in Fig. 4. The designers decide that the energy absorber will use non-reversible energy absorbers.

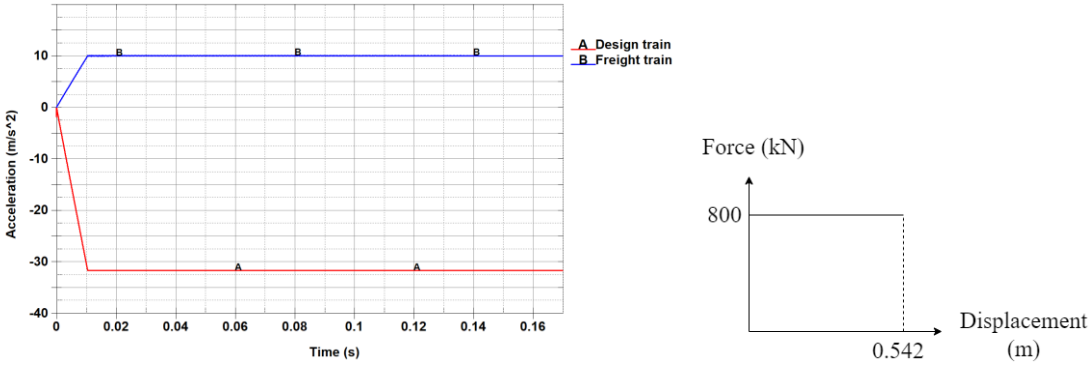


Figure 4: Acceleration-time diagram using non-reversible energy absorber (left), energy absorber's characteristic (right)

4.3 A collision with the standardized regional train

A collision of the ARS vehicle with the 129 t regional train generates a collision energy of 82 kJ, as in Tab. 4. The designed side energy absorber can absorb this collision energy within a deformable length of 102.5 mm. The collision must stop before the center coupler of the regional train reaches the safety zone of the ARS vehicle. In that case, the side energy absorber should absorb all the collision energy for this scenario as well. Hence, the crumple zone (a permissible deformable area) of the ARS vehicle requires a length of at least 577.5 mm (the length of the center coupling of the 129 t regional train plus a deformable length of the energy absorber of the ARS vehicle).

5 Three-dimensional analysis

5.1 Survival space

According to the design concept, there shall be no deformation in the passenger compartment. However, the obstacle in the design collision scenario 3 (a collision with a large road obstacle) has a particular shape and conditions. The crash simulation with the standardized model of a large road obstacle exhibits that the obstacle will tip over the designed train, as in Fig. 5. It hits directly at the passenger compartment, which is unacceptable. Therefore, three proposed solutions are investigated to handle this impact.

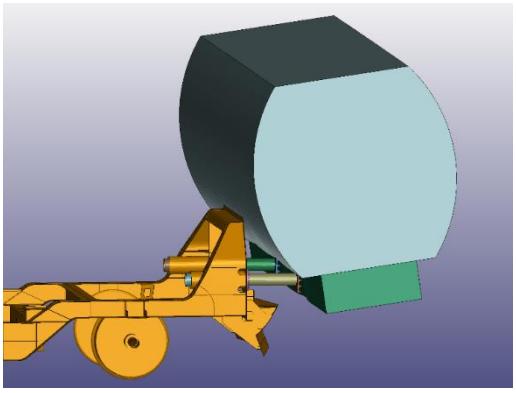


Figure 5: Collision with the standardized large road obstacle

5.1.1 Strengthening chassis and installing additional energy absorber

The obstacle's most outer point (MO) height is 2200 mm above the top of the rail level (TOR). The obstacle's center of gravity (CG) height is 1750 mm above TOR, as shown in Fig. 6. Secondary energy-absorbing elements should be installed at a chassis structure around these heights to protect the passenger compartment. It needs a revised chassis design to support the additional energy absorbers, which may result in a larger and heavier chassis. The length of the crumple zone is also an essential factor. The primary energy absorber is at a height of 1000 mm above TOR, according to the standard. It needs at least 550 mm to contact the lower part of the standardized obstacle. Otherwise, the secondary energy absorber may collide with the obstacle before the primary energy absorber and function as a main energy absorber. It needs a sufficient length of the primary energy absorber, sizeable secondary energy absorbers, and robust support structures. All these requirements disagree with the design concept of lightweight design. Moreover, the

higher chassis could result in smaller or no front windows area. As a result, this option is not viable.

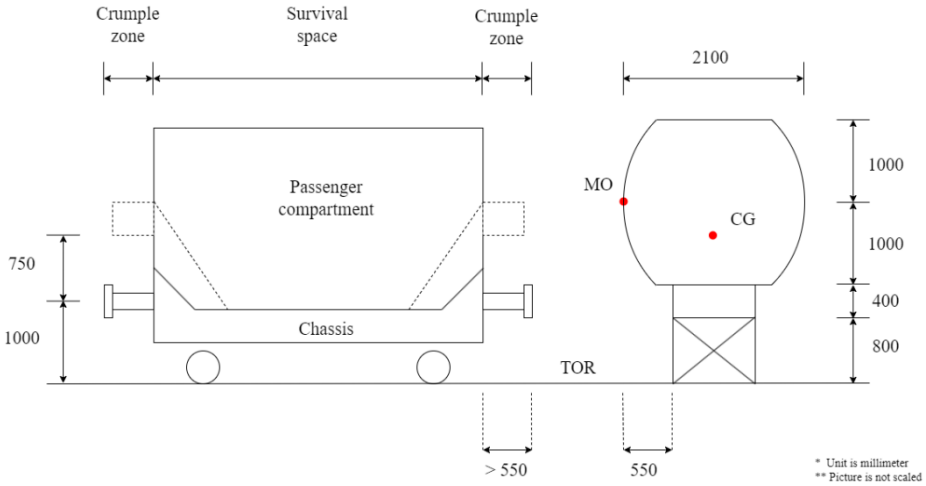


Figure 6: Dimensioning of the design collision scenarios 3

5.1.2 Strengthening passenger compartment

The obstacle will collide with the front end of the vehicle at a height that hits the passenger compartment directly. Typically, this impact will encounter the front-end structure of the conventional rail vehicle, which is designed to be deformed in a controlled manner to absorb the collision energy. This solution requires a sufficient deformable length at the front-end structure to absorb collision energy and a durable passenger compartment to provide safety space. Since the ARS vehicle is compact and has no driver cab, the required deformable length and more robust structure could result in a heavy passenger compartment with small safety space. It disagrees with the ARS's design concepts. It requires a more sophisticated design for the passenger compartment. This option is not viable for the time being.

5.1.3 Reducing vehicle's velocity at level crossing

The significance of the design collision scenario 3 depends on the existence of level crossings, the operating speed, the emergency braking rate of the train, and the sighting distance. The design collision scenario 3 is obsolete if the LCRV can stop reliably within the sighting distance. The stop distance consists of the sum of the covered distance from the point where the driver can see the obstacle until he reacts, called reaction distance, and the brake distance, which depends on the vehicle itself with its brake system.

The ARS vehicle is equipped with a disk brake, an electromagnetic brake, and a regenerative brake using the engine for recuperation. The brake system provider investigates the braking performance regarding standard EN14531, [11]. In full braking performance and with a reaction time of 1 second, the vehicle can stop from the operational speed of 100 km/h within 174 m, as in Fig. 7. The stop distances sink at lower speeds radically and meet the high requirements for the deceleration according to §36 BOStrab, [12]. For this reason, reducing the speed at level crossings with the highest possible deceleration is an option to avoid a collision. It causes a slight loss of time, so the effect on the timetable is limited. This option is more viable than other solutions for the time being.

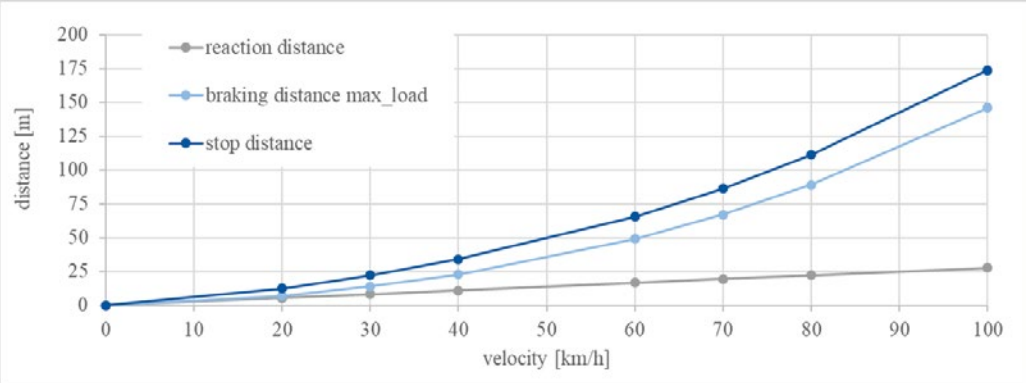


Figure 7: Stop distances at different velocities

5.2 Overriding protection

The overriding of collided trains is one of the main crashworthiness requirements because it could result in catastrophic and dangerous damage to vehicles and passengers. The standard requires a train equipped with an anti-climber device to prevent an overriding during a collision. However, an anti-climber device has no specific standard. It is designed according to the industry's know-how. It is usually a wave-shaped plate installed at the tip of the energy absorber, as in Fig. 8. During a train collision, the wave shape will lock with each other and provides contact in the vertical direction. Hence, the vehicles cannot be lifted easily about each other during a collision. Typically, the energy absorber equipped with anti-climbers can withstand a vertical force of around 100 kN. The collision simulations are performed according to design collision scenario 1 (a collision with an identical train) as in Fig. 9. A low pass filter of 180 Hertz filters the simulation results in Fig. 10. The simulation shows that the vertical collision force at one

side fluctuates within the limit of 100 kN. The maximum lifted wheel is still within the requirement of 75% of the flange height, which is 24 mm. The anti-climber devices stay fully engaged during the collision simulation period of 120 ms. Therefore, the vehicle fulfills the requirement of overriding protection.

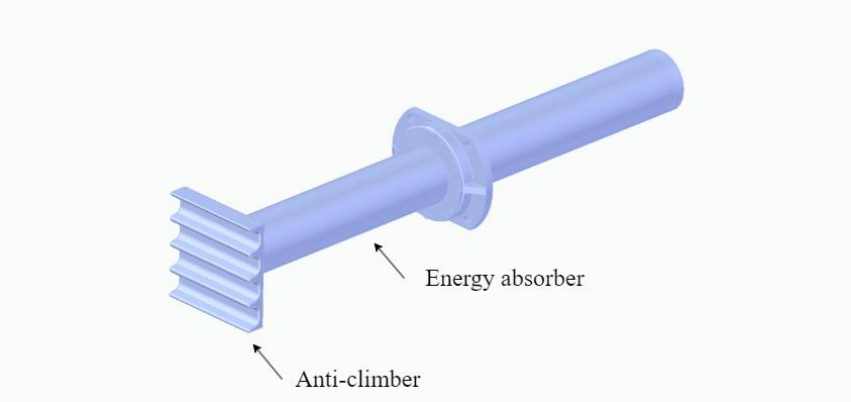


Figure 8: Energy absorber equipped with anti-climber

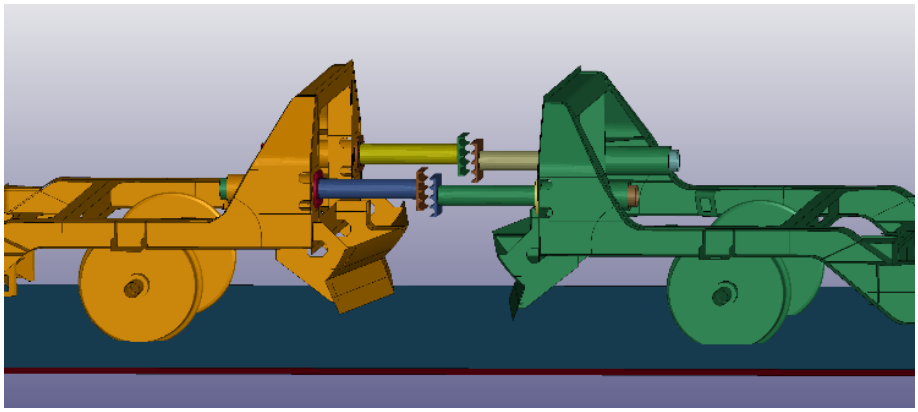


Figure 9: Collision with an identical train with a vertical offset of 40 mm

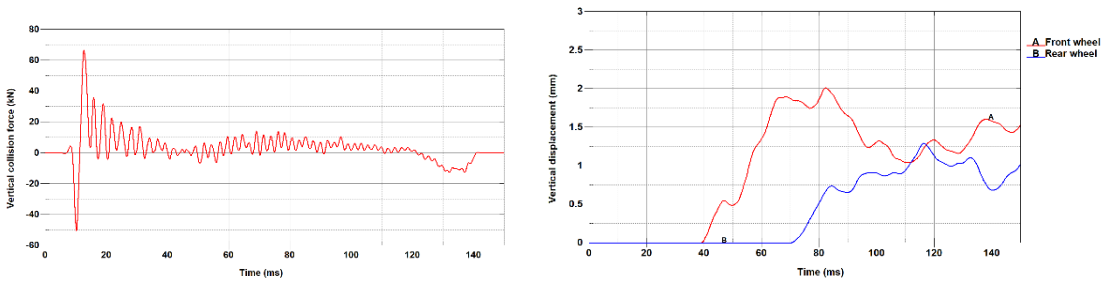


Figure 10: Vertical collision force (left), Wheel lifting (right)

6 Conclusions

Designing crashworthiness for a light commuter rail vehicle, as shown in the design of the ARS vehicle, is challenging. The vehicle is designed to be compact (single wagon) and light; therefore, it has low longitudinal stiffness. The passenger compartment should not be subjected to external forces. The vehicle will operate on secondary lines, which have railway crossings. A collision with other road obstacles is possible. This design concept causes difficulty in meeting the crashworthiness requirements.

The crashworthiness design begins with summarizing the rail vehicle design concepts and the related crashworthiness requirements. It leads to the design of the crashworthiness concept. The main crashworthiness characteristics of the ARS vehicle are:

- The crumple zone is limited to the energy-absorbing element's length. The passenger compartment (considerable here as a safety zone) shall not have any deformation.
- The energy-absorbing elements will be two side energy absorbers equipped with anti-climber at both vehicle ends.
- The collision force is limited to 800 kN.

The crashworthiness design is evaluated by one-dimensional and three-dimensional analysis to fulfill the three primary requirements in the European standard EN15227 (Deceleration limit, Survival space, and Overriding protection). As a result, the designed vehicle is recommended to use a lower speed at level crossing. The collision analyses define the characteristics and configurations of the two side energy absorbers as follows:

- Non-reversible energy absorber
- The collision force is limited to 400 kN (per side)
- The deformation length is 600 mm (considered from all collision scenarios)

7 Concluding part

Acknowledgment

We would like to thank the federal ministry of economic affairs and climate action for providing funding for the project "Flexibler Schienenbus für den Ländlichen Raum (FlexSbus-LR)".

Literature

[1] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (VDV), "Leitfaden zur Reaktivierung von Eisenbahnstrecken," www.vdv.de, Kamekestraße 37-39, 50672 Köln, 09/2017.

[2] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (VDV), "Auf der Agenda: Reaktivierung von Eisenbahnstrecken," www.vdv.de, Kamekestraße 37-39, 50672 Köln, August 2022.

[3] P. Gil, S. Winkelheide, N. Schibert and C. Schindler, "Möglichkeiten für lokal emissionsfreien Betrieb nicht-elektrifizierter Eisenbahnstrecken," *ETR,* pp. 69-73, November 2022.

[4] R. Braemar, "Designing rail vehicles to meet En15227 crashworthiness requirements for railway vehicles," in *Conference on railway excellence CORE2016*, Belbourne, Australia, 2016.

[5] A. Surini, S. Raiti, D. Blanco and D. D'Agostino, "Crashworthiness design of a train based on european standard EN15227," *Newsletter EnginSoft Year 15 n3,* pp. 5-7.

[6] European committee for standardization, *EN 15227: Railway applications - Crashworthiness requirements for rail vehicles,* Brüssel, 2020.

[7] C. Schindler, "The Aachen Rail Shuttle ARS - Autonomous and energy self-sufficient feeder transport," *Journal of Rail Transport Planning & Management,* February 2022.

[8] European committee for standardization, *EN 15663:2017+A1: Railway applications - Vehicle reference masses,* Brüssel, 2018.

[9] G. Lu, "Energy absorption requirement for crashworthy vehicles," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engeers, Part F: J Rail and Rapid Transit,* vol. 216(1), pp. 31-39, 2002.

[10] S. Yao, K. Yan, S. Lu and P. Xu, "Equivalence study involving rail vehicle collision test conditions," *Proc IMechE Part F:J Rail and Rapid Transit,* vol. 233(1), pp. 73-89, 2019.

[11] European committee for standardization, *En 14531-1:2015+A1: Railway applications - Methods for calculation of stopping and slowing distances and immobilization braking - Part 1: General algorithms utilizing mean value calculation for train sets or single vehicles,* Brüssel, 2018.

[12] Bundesrecht, *Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen (Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung - BOStrab),* 1987.

Authors

Prasomsuk, Nutchanon

Nutchanon Prasomsuk, M.Sc. Research assistant at Institute for Rail Vehicles and Transportation Systems (IFS), RWTH Aachen University.

Winkelheide, Sebastian

Sebastian Winkelheide, M.Sc. Researcher at Institute for Rail Vehicles and Transportation Systems (IFS), RWTH Aachen University

Schindler, Christian

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Schindler. Head of the Chair and Institute for Rail Vehicles and Transport Systems (IFS) at RWTH Aachen University. Managing Director of the Research Center Railways (RCR) at RWTH Aachen University. Among others, chairman of the Association of University Professors on Railroading (VUE).

IRSA 2023

SESSION 10

MOBILITÄTSMANAGEMENT

MOBILITY MANAGEMENT

Session 10
Fabian Kühnel, Michael Schrömbges

Impact of access to rail transit on mode choice in rural regions of Germany

Kühnel, Fabian[1], Schrömbges, Michael[1]

[1]Institute of Urban and Transport Planning, RWTH Aachen University
Mies-van-der-Rohe-Straße 1, 52074 Aachen

Summary

Access to stations is key to rail use. By analyzing nationwide timetable data and the National Household Travel Survey for Germany, we find that while access to public transit on foot is widespread, only selected groups of the population in rural areas have access to rail stations. However, those with access to rail stations tend to use public transit more frequently. In addition, the frequency of train departures can further increase the use of public transit. But even under the best circumstances, with frequent train services of four hourly departures and short access distances below 600 m, the use of public transit in rural areas remains low.

Keywords: Public transit; Access to rail stations; mode choice; built environment; Ridership

1 Introduction

Increasing the use of public transit is a key measure for achieving climate goals in the transportation sector in Germany. Among public transit modes, rail transit enjoys a higher public acceptance due to its enhanced visibility, safe operation, and high capacity [1]. The German government therefore plans to double rail passenger kilometers by 2030 through improvements and expansion of the rail network [2]. The extension of the network will primarily take place in rural regions, where the existing public transit network is less dense, more vacant sites are available, and several abandoned tracks can be reinstated. The aim of this study is to analyze the current rail access and departure frequency in rural

areas of Germany and its impact on mode choice. This allows a first assessment of the impact of rail network development in these areas.

The paper opens in Section 2 with a literature review of research studies and German planning guidelines on the impact of rail access on the population and their usage of the transport system. In the following description of our methodology in Section 3, we focus on the preparation of the input data, the calculation of the walking distance to the nearest rail station and the evaluation of mode choice. Subsequently, in Section 4, we analyze the distribution of rail stations in Germany as well as the calculated walking distance. We conclude our analysis by tracing the share of public transit trips for different access distances and departure frequencies. Finally, Section 5 provides a conclusion, planning recommendations and areas for further research.

2 Literature review

Access to stations is necessary to use rail transit. One can walk, cycle, drive or take a bus to reach a rail station. While access by bicycle, car and bus depends on the availability of these modes in the household or in the area where the trip starts, walking to a train station does not depend on these preconditions. However, there is a limit to the distance people are willing to walk to a rail station. The longer the distance, the less likely people are to walk. But if people perceive they can walk to a station, they are likely to do so [3]. Physical condition, willingness to walk and the availability of other transport modes determine the maximum acceptable walking distance. This distance is typically longer for accessing rail than for bus stations [4]. German planning guidelines suggest that a beeline distance of up to 1,000 to 1,800 m is appropriate to access a rail station in rural areas [5–7]. Other research suggests a willingness to walk 800 m to a rail station [8]. Some people tend to walk further, but most people appear to walk 10 – 15 min (800 - 1200 m) or less to access a rail station [4]. Comparing the planning guidelines with research, the acceptable access distance remains disputed.

It is undisputed that the built environment influences travel behavior. The built environment can distinguish six dimensions (Density, Diversity, Design, Destination Accessibility, Distance to Transit, Demand management) [9]. Numerous studies analyzed the effect of distance to transit on travel behavior while controlling for the other five dimensions. In most studies, distance to transit measures the shortest route from the origin/destination of a trip to the nearest transit station [9], which represents the access distance to a transit station. Various studies indicate that having access to rail stations increases the number of transit trips in transit oriented developments [e.g. 10] and reduces

car ownership [e.g. 11–13] as well as car use [e.g. 14]. In this context, the exact relationship between the distance to rail stations and public transit mode choice in rural areas of Germany remains unclear.

3 Methodology

To analyze the effect of rail access, we evaluate the mode share between car and public transit trips in rural areas based on the walking distance to the nearest station and the service frequency at the station.

3.1 Data preparation

Since access to transit stations is sensitive to walking distance, public transit analysis requires high resolution of the input data [15]. We used a 100 x 100 m grid of residences [16] to locate the population across Germany at the micro level. We converted each grid cell to a single point – taking the settlement structure and land use [17] into account – to be able to calculate a walking distance between a residence and the nearest rail station. Thus, we assumed that the population of each grid cell resides at a single point. This results in about three million starting points for the access calculation.

We extracted information on public transit services from Germany-wide timetable data in GTFS format for Thursday, September 22, 2022 [18]. To account for missing data, we enriched the dataset with information from the NeTEx timetable [19] and compared the transit stops in the resulting data with external databases such as [20, 21]. After review, we excluded 33 of 400 counties from the analysis due to insufficient data. To separate the remaining stations by mode, we used the route type given in the GTFS data. Unfortunately, the reported route types are not consistent, as the nationwide data [18] is a loose collection of different GTFS datasets from all parts of Germany. In particular, the distinction between tram, subway and railway varies from region to region. To minimize the effect of the different classifications, we have combined the three transport types into “rail”. The resulting error in the analysis of rural areas should be small because trams and subways are rare in these regions. The final dataset consists of about 8,100 rail stations with over 1,200,000 departures.

To calculate the distance between the starting point and the nearest rail station, we used the walk routing API [22], which is based on the pedestrian network of [20]. Using the population-weighted median, we aggregated the access distance to a 1 x 1 km grid to add the information to the georeferenced National Household Travel Survey [MiD 2017 - B3,

23]. The survey contains information from a one-day travel diary of about 150,000 households. We added the access distance to each trip based on the respondent's place of residence. As a result, we hypothesize that the travel behavior of people who live nearby a rail station differs from the travel behavior of people who reside farther away from a rail station. Due to missing values and data protection, we were only able to determine the respondent's place of residence for 700,000 of the 960,000 trips.

3.2 Distribution of rail access and modal share

First, we evaluate the spatial distribution of the population, rail stations and departures throughout different area types. To separate urban and rural areas, we used the RegioStaR Gem5 classification [24]. This classification distinguishes between metropolises, large cities, medium-sized cities, urban areas, and small-town/village areas (see Figure 1) [24]. As access to rail stations and public transit varies widely across Germany, we analyzed the population distribution in the vicinity of rail stations by region type using the 100 x 100 m grid. We therefore plotted the number and cumulative frequency of residents living within a specified distance of rail stations. We further grouped the rail stations by minimal number of train departures per hour between 6 a.m. and 8 p.m.

In addition, to analyze the travel behavior based on the access to rail stations, we compared the public transit trip shares using the 1 x 1 km grid. We divided the sample into four groups based on the walking distance to the nearest rail station, in accordance with the classification in [7]. We then merged the groups based on walking distance with those based on the number of departures. For each group we calculated the weighted number of public transit trips. Since public transit is most environmentally effective when substituting car trips, we compared the number of public transit trips to the number of car trips (driver and passenger). This analysis can only supply a preliminary guide to the impact of rail access in rural areas, as mode choice depends on additional factors such as accessible destinations.

4 Rail access in rural regions of Germany

Figure 1 shows the distribution of regional classes in Germany, as well as the number of inhabitants, the area in km², the number of rail stations, and the number of daily departures per class. The analysis excludes 33 counties with insufficient data. Although small-town and village areas make up almost two-thirds of Germany, they are home to only 22 % of the population, demonstrating the sparse density of these areas. Despite having the highest

number of rail stations (> 2,400), rural areas register the lowest number of train departures. This is partly due to the inclusion of high-frequency subway and tram lines in urban areas in the analysis. Nevertheless, only about 40 trains depart from the average rail station in a rural area (small-town and village area) per day. Considering two-way traffic and an operation time from 5 a.m. until 11 p.m. each station will accommodate about one train per hour in each direction. Consequently, if there is a rail station in a rural area, departures from that station tend to be infrequent.

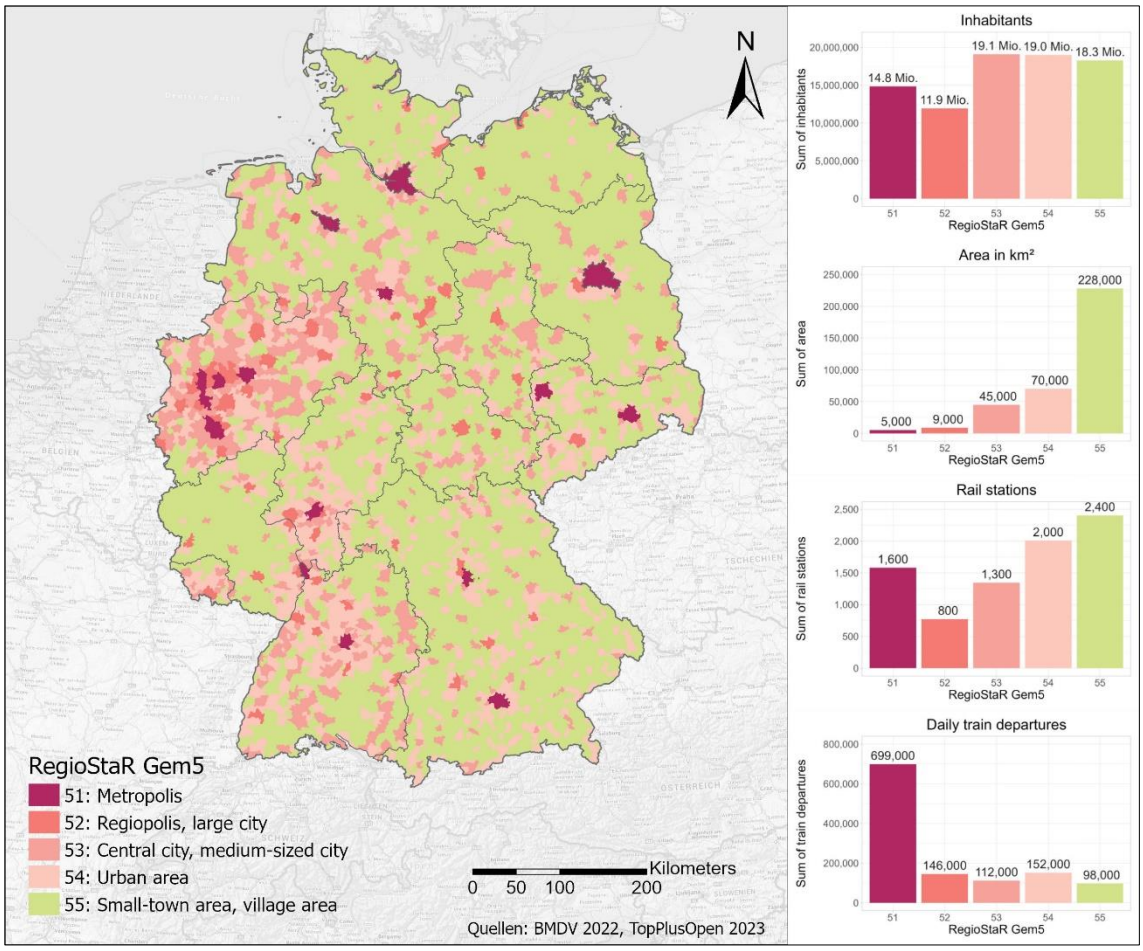


Figure 1 Overview of the regional classes of RegioStaR Gem5 and the distribution of inhabitants, area in km², number of stations and train departures

When comparing the walking distances to the nearest rail station in Figure 2, the differences between the regional classes are evident. Only 5 % of the population in rural areas can reach a rail station within 600 m (~7.5-minute walk). Even comparing rural areas with urban areas outside of central / medium-sized cities shows the disadvantage of rural areas in terms of access to rail stations. The cumulative frequency of inhabitants with access to rail stations is twice as high in urban areas for all three distance steps.

Comparing rural areas with metropolises further illustrates the lack of rail infrastructure. One-third of the population in metropolises reach some kind of rail station within 600 m, which means that they can easily walk there. Based on the planning guidelines, only 22 % of rural inhabitants even reach a station. In other words, more than 75 % of the rural population is not within walking distance of a station, while 75 % of the metropolitan population is.

In summary, Figure 2 shows that only selected groups have access to rail stations in rural areas, whereas access to rail stations in urban areas, cities and metropolises is more widespread across the population. This illustrates the dependence on (motorized) feeder services to access rail stations in rural areas.

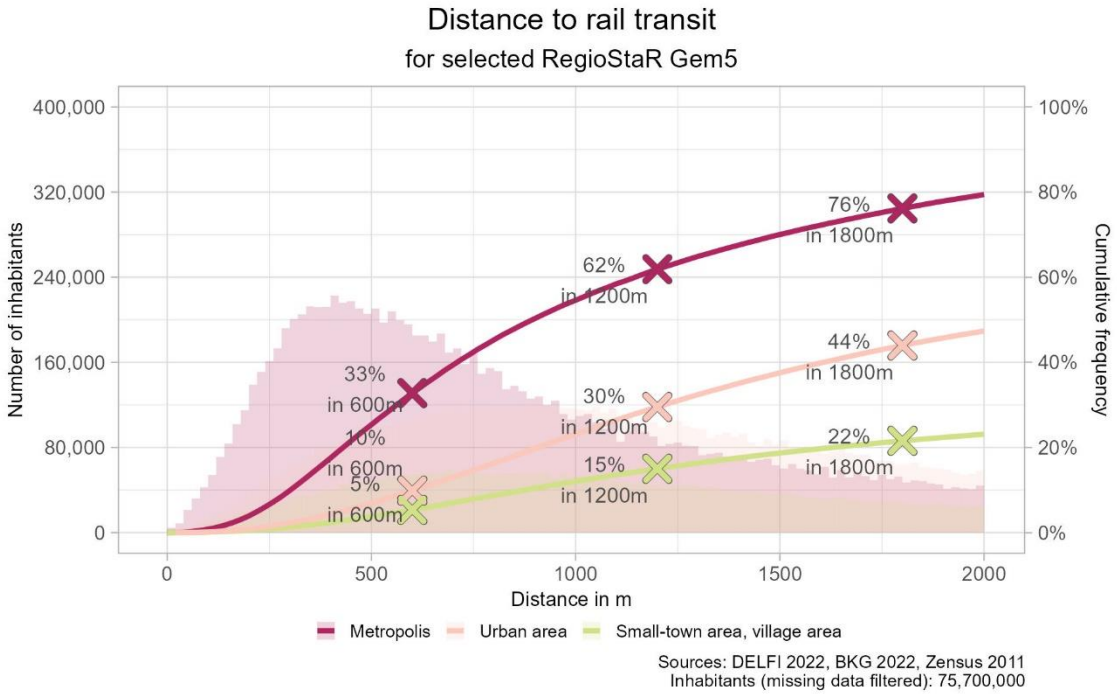


Figure 2 Number of inhabitants within a walking distance to rail transit by RegioStaR Gem5

We further distinguished the rail stations accessible in rural areas grouping them by the number of hourly departures from 6 a.m. to 8 p.m. Figure 3 illustrates that people typically have access to a rail station with two departures per hour or less. As a result, the trains depart once every hour in each direction, when considering two-way traffic. High-frequency rail offerings with more than four hourly departures are not available for over 90 % of the rural population. Only 2 % of the rural population can access such a rail station within 600 m (~7.5 min) and only 5 % in 1,200 m (~15 min). The results are in

line with the Figure 1 strengthening that the typical departure frequency in rural areas is low.

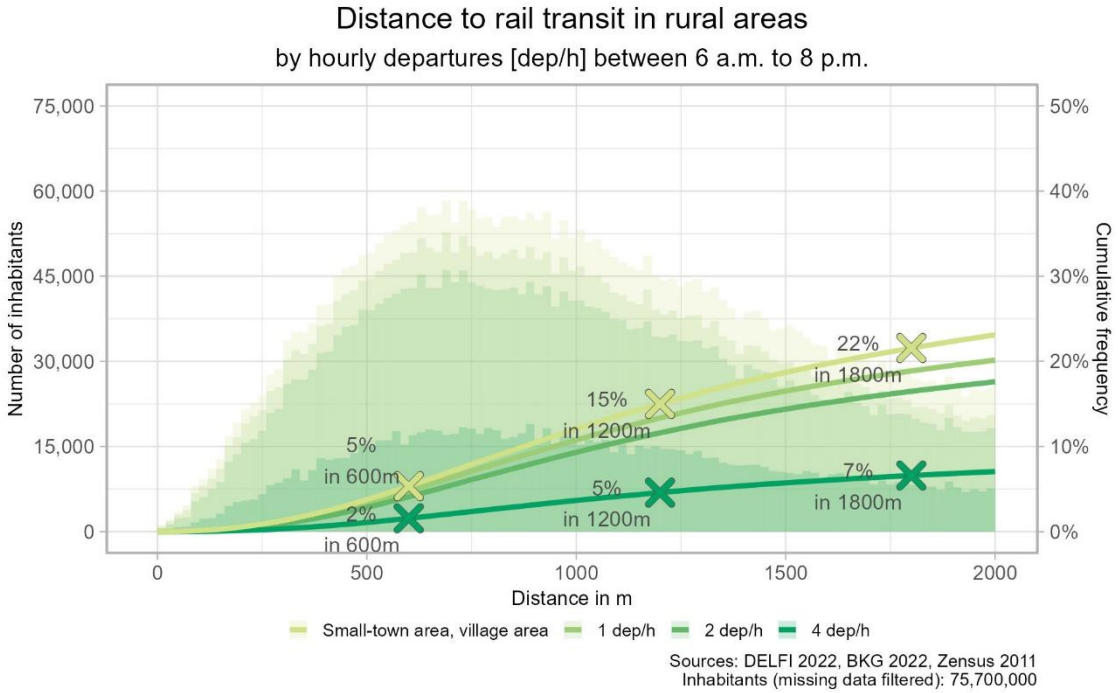


Figure 3 Number of inhabitants within a walking distance to rail transit by number of departures at the nearest station in rural areas

The preceding figures show that rail access in rural areas lacks the density and departure frequency of rail transit. The question that remains is whether rail access in rural areas still affects travel behavior. Therefore, we evaluated the public transit mode choice in the National Household Travel Survey [23] taking the access to rail into account. As explained in Section 3.1, we aggregated the 100 x 100 m cells to 1 x 1 km cells by calculating the population-weighted median of rail access. We further aggregated the resulting grid cells based on their distance to the nearest rail station and the number of departures. Consistent with Figures 2 and 3 we set the grouping thresholds to 600 m, 1,200 m, and 1,800 m for rail access and to 1, 2, and 4 for hourly departure frequency. We presume that inhabitants with over 1,800 m to the nearest rail station have no access to rail. Since there is no access, we did not consider the number of departures for these stations.

Public transit accounts for only a small share of the motorized trips in rural areas, as Figure 4 illustrates. Even people living within 600 m walking distance of a rail station use the car for nearly 90 % of motorized trips. When the access distance increases the use of public transit decreases. Considering the maximum rail access of up to 1,800 m from

the German planning guidelines, the transit share drops from 11.3 % to 9.5 %. The share of public transit trips decreases to 6.6 % if there is no rail station accessible within 1,800 m. As a result, the analysis suggests that the use of public transit increases with improved access to a rail station.

As Figure 4 highlights, the number of departures at the accessible station seems to have an additional impact on public transit usage. About half of the public transit trips of the population with access to a rail station within 600 m and 1,200 m involve people who can access a high frequency station (four departures per hour). Comparing with Figure 3, this group is relatively smaller in terms of access to rail and, thus, is over-represented in mode choice. Interestingly, the share of high frequency rail stations decreases in the 1,200 m – 1,800 m group. As the walking time increases over 15 min, the use of (motorized) feeder services appear more likely. As a result, advanced planning of a trip is necessary, which may reduce the importance of a high frequency.

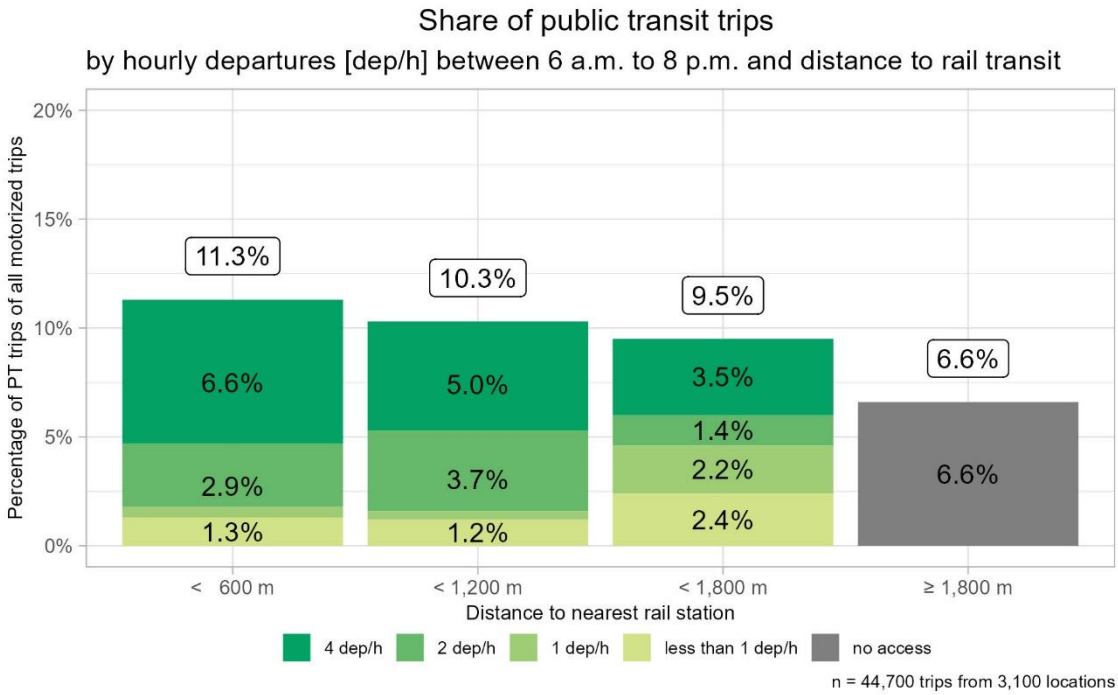


Figure 4 Public transit trip share by distance to rail transit and number of departures in rural areas

In summary, short walking distances to frequently served rail stations increase the use of public transit. However, this does not necessarily imply an immediate shift in travel patterns as the rail infrastructure develops. The built environment (e.g. urban density, destination accessibility), the quality of competing travel modes, and individual factors may also influence mode choice [14]. Additionally, people who are open to using public

transit may choose to live in locations close to rail stations choice [9, 13, 25], thus affecting the observed results. Nevertheless, preliminary analyses of user types within the access groups (differentiating by e.g. age or car availability) suggest that non-captive users are more likely to choose public transit when the distance between their home and the nearest rail station is small.

5 Conclusion

This paper analyzed the impact of distance to rail stations and service frequency on the public transit mode share in rural areas of Germany. To do so, we analyzed the distance between the population's residences and the nearest rail stations considering their departure frequency. Comparing the public transit trip share by access and service frequency allowed us to analyze the impact on mode share.

In conclusion, while only a selected group of the rural population has access to rail stations, those with access tend to use public transit more often. Lower access distances and higher service frequencies improve public transit use. Therefore, planners should ensure that the access distance for most of the surrounding population is less than about 600 m. Moreover, new and existing rail services should operate at high frequencies as this further improves the share of public transit.

It is important to note that external factors such as the settlement structure or individual preferences may affect the observed results. Therefore, future research should analyze these external factors in depth. In addition, it is still unclear, how the expansion of the network directly affects the surrounding area, which previously had no access to rail.

Nevertheless, the share of public transit trips in rural areas is small compared to car trips even under the best conditions of frequent train departures and short walking distances. Although access to rail is a prerequisite for changing travel behavior, planners and policy makers should not overestimate the immediate effect of rail network development in rural areas.

Acknowledgements

Parts of the work on which this study is based were carried out on behalf of the Federal Minister for Digital and Transport under FE-no. VB710007 titled "Erstellung der Methodik zur Entwicklung bundesweiter Mindeststandards der ÖPNV-Erreichbarkeit" (Developing the methodology for nationwide minimum standards of public transport accessibility). Responsibility for the content lies solely with the authors.

6 References

[1] M. Ben-Akiva and T. Morikawa, “Comparing ridership attraction of rail and bus,” *Transport Policy*, vol. 9, no. 2, pp. 107–116, 2002, doi: 10.1016/S0967-070X(02)00009-4.

[2] SPD, Bündnis90/Die Grünen, and FDP, Eds., “Mehr Fortschritt wagen: Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit,” Koalitionsvertrag zwischen SPD, Bündnis 90/Die Grünen und FDP, 2021.

[3] R. Cervero, “Transit-Oriented Development's Ridership Bonus: A Product of Self-Selection and Public Policies,” *Environ Plan A*, vol. 39, no. 9, pp. 2068–2085, 2007, doi: 10.1068/a38377.

[4] R. I. Sarker, M. Mailer, and S. K. Sikder, “Walking to a public transport station,” *SASBE*, vol. 9, no. 1, pp. 38–53, 2020, doi: 10.1108/SASBE-07-2017-0031.

[5] VDV, “Verkehrserschließung, Verkehrsangebot und Netzqualität im ÖPNV,” Köln, VDV-Schrift 4, 2019.

[6] BaySt-MWVT, “Leitlinie zur Nahverkehrsplanung in Bayern,” München, 1998.

[7] FGSV, “Empfehlungen für Planung und Betrieb des öffentlichen Personennahverkehrs: Forschungsprojekt des Forschungsprogramms Stadtverkehr (FoPS),” Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, FGSV FGSV 050, 2010.

[8] R. Yang, H. Yan, W. Xiong, and T. Liu, “The Study of Pedestrian Accessibility to Rail Transit Stations based on KLP Model,” *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 96, pp. 714–722, 2013, doi: 10.1016/j.sbspro.2013.08.082.

[9] R. Ewing and R. Cervero, “Travel and the Built Environment,” *Journal of the American Planning Association*, 2010.

[10] R. Ewing *et al.,* “Traffic Generated by Mixed-Use Developments—Six-Region Study Using Consistent Built Environmental Measures,” *J. Urban Plann. Dev.*, vol. 137, no. 3, pp. 248–261, 2011, doi: 10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000068.

[11] Z. Guo, “Residential Street Parking and Car Ownership: A Study of Households With Off-Street Parking in the New York City Region,” *Journal of the American Planning Association*, vol. 79, no. 1, pp. 32–48, 2013.

[12] C. Zegras, “The Built Environment and Motor Vehicle Ownership and Use: Evidence from Santiago de Chile,” *Urban Studies*, vol. 47, no. 8, pp. 1793–1817, 2010, doi: 10.1177/0042098009356125.

[13] V. van Acker and F. Witlox, “Car ownership as a mediating variable in car travel behaviour research using a structural equation modelling approach to identify its

dual relationship," *Journal of Transport Geography*, vol. 18, no. 1, pp. 65–74, 2010, doi: 10.1016/j.jtrangeo.2009.05.006.

[14] C. Chen, H. Gong, and R. Paaswell, "Role of the built environment on mode choice decisions: additional evidence on the impact of density," *Transportation*, vol. 35, no. 3, pp. 285–299, 2008, doi: 10.1007/s11116-007-9153-5.

[15] M. Peter, "Die Berechnung kleinräumiger und multimodaler Erreichbarkeiten auf regionaler Ebene," TUHH Universitätsbibliothek, 2021.

[16] Statistische Ämter, *Zensus 2011: Bevölkerung je Hektar*. Ergebnisse des Zensus am 9. Mai 2011 pro ha. Wiesbaden: Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2015. [Online]. Available: https://www.zensus2011.de/

[17] BKG, *Digitales Landschaftsmodell 1:250 000 (Ebenen): DLM250*. Frankfurt am Main: Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG), 2022. Accessed: Sep. 27 2022. [Online]. Available: https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/open-data/digitales-landschaftsmodell-1-250-000-ebenen-dlm250-ebenen.html

[18] DELFI, *Deutschlandweite Sollfahrplandaten (GTFS)*. Frankfurt am Main: Verein zur Förderung einer durchgängigen elektronischen Fahrgastinformation e.V. (DELFI), 2022. Accessed: Dec. 14 2022. [Online]. Available: https://www.opendata-oepnv.de/ht/de/organisation/delfi/startseite?tx_vrrkit_view%5Bdataset_name%5D=deutschlandweite-sollfahrplandaten-gtfs&tx_vrrkit_view%5Baction%5D=details&tx_vrrkit_view%5Bcontroller%5D=View

[19] DELFI, *Deutschlandweite Sollfahrplandaten (NeTEx)*. Frankfurt am Main: Verein zur Förderung einer durchgängigen elektronischen Fahrgastinformation e.V. (DELFI), 2022. Accessed: Dec. 14 2022. [Online]. Available: https://www.opendata-oepnv.de/ht/de/organisation/delfi/startseite?tx_vrrkit_view%5Bdataset_name%5D=deutschlandweite-sollfahrplandaten&tx_vrrkit_view%5Baction%5D=details&tx_vrrkit_view%5Bcontroller%5D=View

[20] OSM, *Openstreetmap*: © OpenStreetMap contributors, 2022. Accessed: Jan. 27 2023. [Online]. Available: https://www.openstreetmap.org/

[21] DELFI and WVI, *Zentrales Haltestellenverzeichnis: Deutschlandweite Haltestellendaten*. Frankfurt am Main, Braunschweig: Verein zur Förderung einer durchgängigen elektronischen Fahrgastinformation e.V. (DELFI), 2022. Accessed: Aug. 16 2022. [Online]. Available: https://zhv.wvigmbh.de/

[22] BKG, *RoutingPlus - Dienst web_ors (Bund)*: Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG), 2022. Accessed: Jan. 27 2023. [Online]. Available: https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/routing-plus-dienst-web-ors-001.html

[23] infas, DLR, IVT, and infas 360, *Mobilität in Deutschland*: (im Auftrag des BMVI), 2018. Accessed: Jan. 30 2023. [Online]. Available: https://www.mobilitaet-in-deutschland.de/

[24] BMDV, *Regionalstatistische Raumtypologie (RegioStaR)*: Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV), 2021. Accessed: Jan. 27 2023. [Online]. Available: https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/regionalstatistische-raumtypologie.html

[25] X. Cao, P. L. Mokhtarian, and S. L. Handy, "Examining the Impacts of Residential Self-Selection on Travel Behaviour: A Focus on Empirical Findings," *Transport Reviews*, vol. 29, no. 3, pp. 359–395, 2009, doi: 10.1080/01441640802539195.

Authors

Kühnel, Fabian

Fabian Kühnel studied transport engineering at RWTH Aachen University. He started working as a research assistant in the fields electromobility, spatial analysis and accessibility at the Institute of Urban and Transport Planning in 2019.

kuehnel@isb.rwth-aachen.de

Schrömbges, Michael

Michael Schrömbges studied transport engineering at RWTH Aachen University. He started working as research assistant in the fields vehicle automation, its effect on car ownership and spatial structures including accessibilities at the Institute of Urban and Transport Planning in 2017. Since 2020, he manages as "Smart.Vehicle.Mobility" team leader projects regarding urban air mobility, logistics and vehicle automation.

schroembges@isb.rwth-aachen.de

Session 10
Jing Shan, Henning Preis, Nikola Bešinović, Jörn Schönberger

Optimizing Service Networks for Rail Freight Transport between China and Europe

Jing Shan[a], Henning Preis[b], Nikola Bešinović[a] und Jörn Schönberger [c]

[a]Institute of Railway Systems and Public Transport , "Friedrich List" Faculty of Transport and Traffic Sciences, TU Dresden
[b]Chair of Logistics and Transportation Engineering
[c]Chair of Transport Services and Logistics, "Friedrich List" Faculty of Transport and Traffic Sciences, TU Dresden

Abstract

Eurasian rail transport has made significant strides in recent years, demonstrating its potential as a critical player in the global supply chain. Yet, it remains confronted with challenges, particularly in meeting the diverse demands of today's complex global supply chain. The traditional 'one service for all' operational strategy needs to address the unique needs of a global supply chain, underscoring the need for more tailored solutions. Further research is required regarding the Scheduled Service Network Design (SSND) in the context of international rail freight networks that consist of multiple rail systems featuring diverse railway gauges. We propose a time-space formulated I-SSND model designed explicitly for a relay international rail freight transport system. This innovative model seeks to provide heterogeneous services for shipments with differing origins, destinations, releases, and due times. The initial application of this model in Eurasian rail freight transport has yielded encouraging results, showcasing its potential for broader implementation within international rail freight transport.

Session 10
Jing Shan, Henning Preis, Nikola Bešinović, Jörn Schönberger

Keywords: Automated rail planning, International rail transport, Eurasian rail transport, Scheduled Service Network Design (SSND), I-SSND

1 Introduction

The Eurasian rail system, known as the "New Silk Road," has highlighted the importance of international rail freight in global supply chains since 2011. This growing intercontinental railway system includes trans-Kazakhstan, Mongolian, and Trans-Siberian lines from China to Europe. (see Figure 1). Over the past decade, trains grew from 17 in 2011 to 16000 in 2022. In parallel, the number of moved containers climbed from approximately 1428 TEU to 1.600.000,00 TEU [1]. Overall, the Eurasian rail system succeeded in positioning itself as an advantageous alternative to sea and air transport.

A significant challenge in Eurasian rail transport is the system's lack of service discrimination. The Eurasian rail services are often classified according to the loaded and empty containers and possibly offer discounts depending on the number of containers [21]. Understanding freight service demand heterogeneity is crucial as goods and logistics services diversify [11]. In the real world, making decisions to satisfy different demands is challenging [23]. In the rail industry, there are multiple rail operators on the same rail routes and provide different services on the market, especially after market liberalization in Europe introduced competition to rail freight markets in the mid of 1990s [19]. The current manual planning in Eurasian rail industry paradigms cannot reflect the diversified needs and is inefficient and unable to address the comprehensive service requirements of numerous customers. Consequently, intelligent decision support systems are necessary to improve rail operation planning, considering the diverse needs of global supply chains.

This paper proposes an international scheduled Service Network Design (I-SSND) for border crossing rail transport that aids in allocating capacities to meet various service requirements. The core of the proposed decision support system is a tailored mixed-integer mathematical optimization model designed for planning various rail services. This model determines the optimal number of necessary trains of varying service classes and the shipments assigned accordingly. The model is based on the classical SND Problem [9] but includes extensions addressing multiple services, varying service requirements, scheduling synchronization, transshipment times, capacity constraints at border-crossing

[1] Own calculation based on data from National Development and Reform Commission (NDRC)[16]

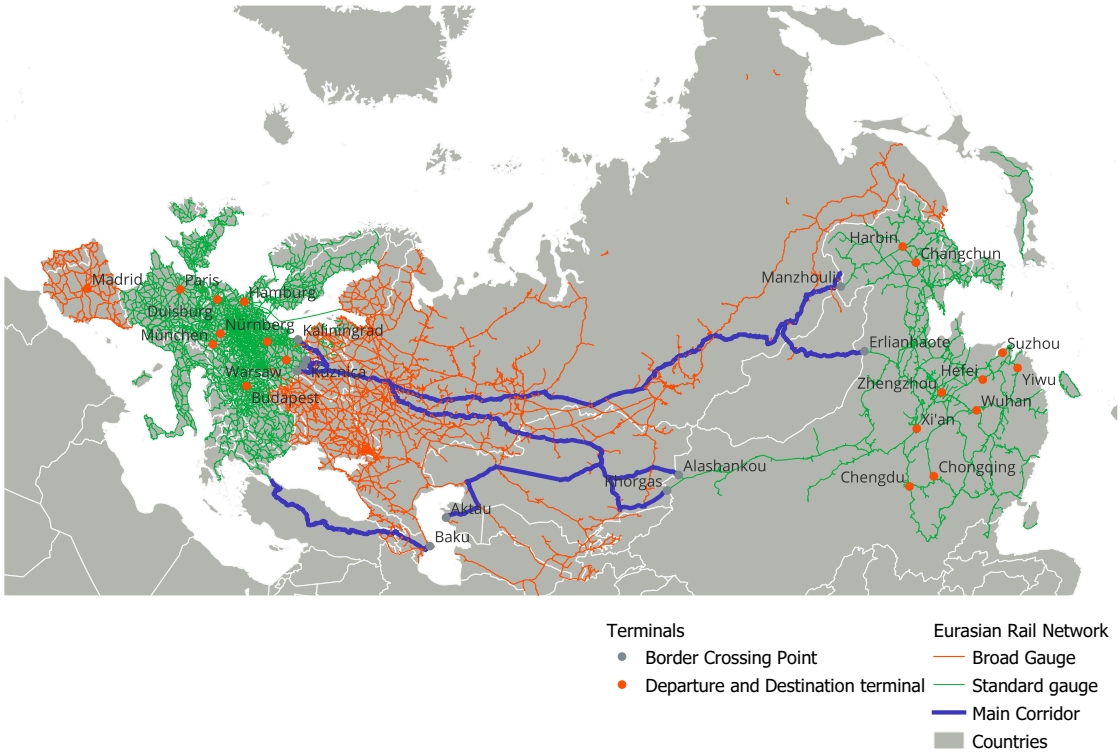


Figure 1:
Eurasian Railway transport network (Own illustration based on naturalearthdata)

terminals, and a rejection mechanism.

The structure of this paper is as follows: Section 2 carries out a literature review on SND problems and carves out the research gaps. Section 3 develops a mathematical model for determining a scheduled SND. Section 4 presents computational experiments, and conclusions are stated in section 6.

2 Literature Review

SND allows for the replication of transportation flows, with links representing services in the transportation system, and requires decisions on choosing service routes to move commodities [12, 20, 8]. The basic SND mathematical models are deterministic, fixed cost, capacitated, multicommodity network design (CMND) formulations [15, 3]. SSND incorporates a time dimension in the CMND formulation, transforming it into a discrete

Table 1: Literature review of related works

Author	Single Service	Heterogeneous Services	Routing	Scheduling	Demand Selection	Terminal handling Time	Transshipment Time	Train Length	Transport Mode	Objective Function
Bilegan et al.(2015) [5]		x	x	x	x				Rail	Max Profit
Andersen et al.(2009b) [2]	x		x	x	x				Rail	Min cost
Pollehn et al.(2021) [18]	x		x	x				x	Rail	Min cost
Chouman et al.(2021) [7]	x		x	x					Rail	Min cost
Zhu et al.(2014) [25]	x		x	x					Rail	Min cost
Crainic et al.(2009) [10]		x	x	x	x				Rail	Min cost
Benoit et al.(2012) [4]	x		x	x	x				Rail	Max Profit
Li et al.(2005)[14]	x		x	x	x				Rail	Max Profit
This work		x	x	x	x	x	x	x	Intercontinental Rail	Max Profit

multi-period model [20].

There is a lack of research on SND considering multiple service types, and many studies do not consider diverse service preferences [22, 23]; [11]. Different customers and product categories have different service needs [1]. For example, high-value demands, which are sensitive to delivery time, may require the use of express trains with fast speeds and guaranteed delivery times. However, most service network design cases and models in the literature focus on a single category of customers known as regular demand [6]. Most SND models proposed in the literature consider the resources required to perform the services and the different types of customers only indirectly, which is inadequate to reflect the operation strategies [22]. Designing diverse services will pose more significant challenges due to synchronizing service schedules and capacities [11].

To enhance the emphasis on the contributions of this paper, Table 1 provides a summary of the existing literature on SSND in the rail industry, focusing on three key aspects: components of the SSND model, transport mode, and objectives. The literature review shows that the decisions of SND mainly focus on scheduling (service selection) and routing (traffic distribution) [24, 9]. This paper investigates the integration of vital elements of intercontinental rail transport, including demand selection and multiple service choice, terminal handling time and transshipment time at border crossing terminals, and profit

goal.

3 Mathematical modelling

This section develops the international scheduled service design (I-SSND) model, which is an optimization problem that involves determining each train's arrival and departure times before the schedule is executed and assigning orders to the train services. Our proposed model's primary goal is to maximize profitability while minimizing potential delays, ensuring customized services meet the different supply chain transport requirements. The I-SSND model is formulated as a mixed integer programming (MIP) model on a time-space network. The forthcoming sections of this paper detail the structure of our approach. Section 3.1 describes the problem. The Mixed Integer Programming (MIP) model is presented in Section 3.2.

3.1 Problem description

Service network design models generally address issues related to the planning, selection, and, eventually, scheduling of services in consolidationbased transportation systems [9, 13]. In such formulations, network links represent services that could be included into the transportation plan operated by the carrier, Link fixed costs, then, represent the cost of operating the corresponding services, whereas variable costs stand for the cost of moving commodities using the selected services [17]. Train services are comprehensively defined by various parameters, including origin, destination, price, speed, departure, arrival times, and service capacity such as mass and length restrictions [18, 20, 9, 12]. We assume that a train is characterized by a movement between two consecutive terminals. Therefore is no stop between departure and arrival. Eurasian rail transport offers standard services regardless of the products being transported. The lack of tailored services fails to cater to the diverse transportation requirements that differ across various supply chains. The freight is typically transported by a single service or a series of services, with loads being transferred from one service to the next at intermediate terminals[20].

The Eurasian rail train always promotes block trains, which means shippers reserve train spaces from origin terminal to destinational terminal, and all orders departing from the original terminal on the same train must travel to Europe together, even if the order's time

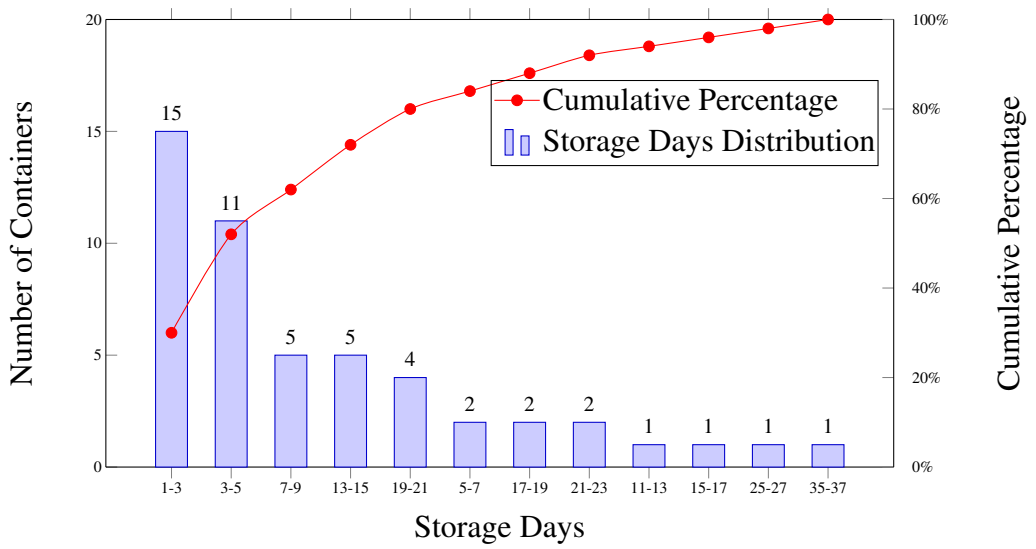


Figure 2: Storage days at the destination terminal of one Eurasian train (Own Research)

sensitivity varies. Figure 2 shows storage days of containers of one block train at the destination terminal. Sixteen non-time-critical containers stayed at the destination terminal for over two weeks out of 50. In Eurasian rail transport, all containers, whether time-critical or not, are transferred as rapidly as possible to the destination terminal, with some designated for storage at destination terminals. Loaded containers cause overcrowding at the destination terminal, especially during peak season. The terminal may not be able to take more trains, causing congestion at the border-crossing terminal. We suggest a new idea: non-time-critical products need not be pushed aboard the train for prompt delivery to the destination terminal. They can stay at the origin or border-crossing terminals. Furthermore, non-time-critical goods could be provided with relatively slower transit service compared to time-critical goods. This approach allows time-critical goods to have priority access to trains for quicker delivery to their destination. In addition, it is possible to extend the due time of orders; however, it is crucial to minimize total delays of orders. This approach allows us to cater to different supply chain demands with varied services.

The challenge is to design a scheduled service network for a border-crossing rail system comprising diverse services to manage shipments with varied origins, destinations, releases, and due times. We aim to use a consolidation-based approach, consolidating freight from different origin-destination (OD) pairs onto a single fleet for efficient main transit transport. Main Transit offers high-frequency, high-capacity services, with a single train serving multiple customers. Restrictions on the daily number of train arrivals at

terminals and the train length in the different rail systems are considered. Train length is determined by the number of containers (40 feet) each train carries in different rail systems. Priority is given to urgent goods in terms of transit and terminal processing time. Different orders have different fare classes based on time requirements. Low fares correspond to slower deliveries and high fares to faster ones. Urgent cargo shippers are ready to pay premium rates, while non-urgent cargo shippers may choose lower costs. However, no cargo is deliberately delayed, and delivery schedules are maintained.

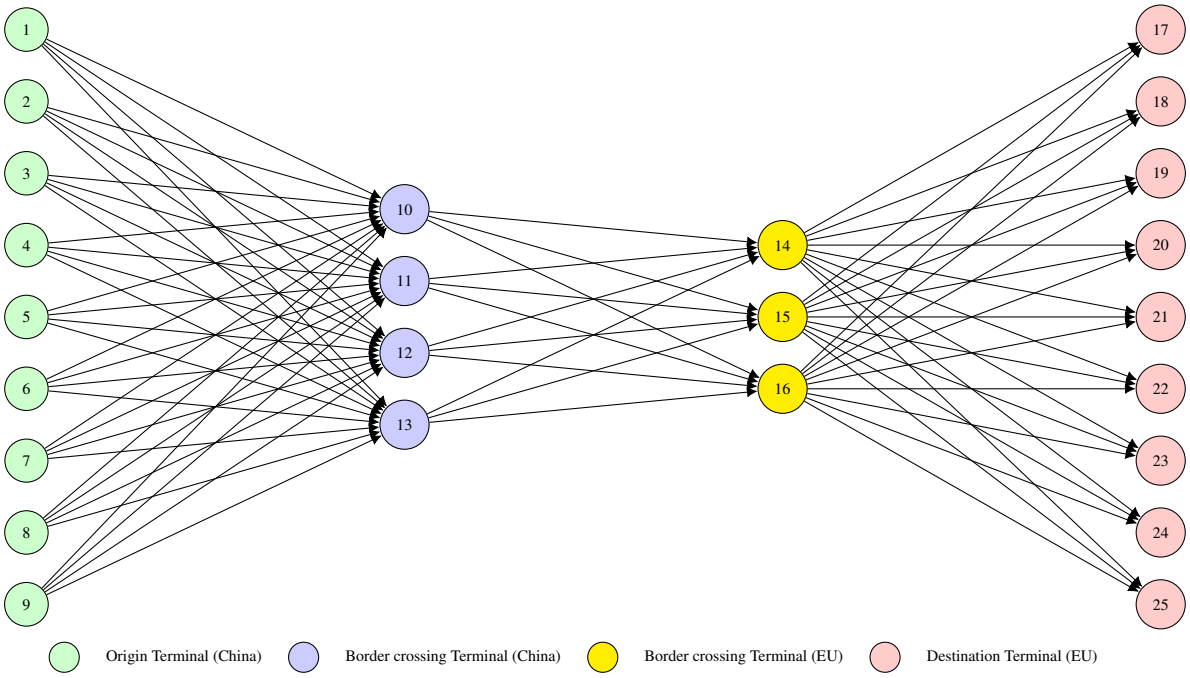


Figure 3: Simplified graph network of Eurasian Railway transport

3.2 Mathematical formulation

I-SSND model is an integrated planning model to address planning issues jointly. It optimizes the assembly of freight trains and their schedules. Decisions are primarily driven by maximizing profit while maintaining service commitments (due times). I-SSND model is based on the availability of critical information, such as demands, cost parameters, transit time, handling time, and capacity, before making design decisions. We have also introduced a rejection mechanism, which allows the model to make a trade-off by deciding which orders should be accepted and which should be rejected. The core decision

Table 2: Notation of decision variables and parameters

Type	Notation	Definition
Sets	L	Physical Terminals
	N=L*T	Terminals in space-time-network
	$OC \subset N$	Departure Terminal (Origin China)
	$TCO \subset N$	Transshipment Terminal China/Out
	$TEI \subset N$	Transhipment Terminal Europe/In
	$DE \subset N$	Arrival Terminals (Destination Europe)
	T	Planning Horizon (Days)
	$V = N * T$	Vertices in space-time network
	$A^T = \{A^E, A^S\}$	Transit Arcs represent trains
	A^H	Holding Arcs represent waiting time at terminals
	K	Shipments
	$S = \{E, S\}$	Service types S (Express, Normal)
Parameters	c_{ij}^H	Holding cost per container per day
	$c_{ij}^C = \{c_{ij}^S, c_{ij}^E\}$	Transport cost for standard service S and express service E on arc (i,j)
	r^k	Revenue per contaienr of shipment k
	Cap_i	Maximum incoming trains at terminal per time period at terminal i
	t_j	Holding time at terminal $j \in N$
	q^k	Number of containers of shipment k
	$h_{ij}^{Tr} = \{h_{ij}^S, h_{ij}^E\}$	Cost of train via standard service S and express service E on arc (i,j)
	$R_{i,j}$	Maximum containers per block train on arc (i,j)
Decision Variables	x_{ij}^k	1, if commodity k is transported via arc (i, j); 0, otherwise
	y_{ij}	Number of departures on arc (i,j)
	z^k	1, if commodity k is accepted; 0, otherwise

includes:

1. the timetable, the train arrival and departure times at each terminal;
2. order acceptance decision;
3. the route of each train;
4. frequency of service departures;
5. service choice during transit;
6. deciding the transshipment time of each order at border crossing terminals;
7. capacity allocation: the assignment of orders to trains.

Before developing the model, we briefly introduce notation, input parameters, and vari-

ables, as shown in Table 2. The underlying spatial network for freight transports between China and Europe is given by the location of the terminals and the rail lines connecting them (see Figure. 1). The set of all locations, denoted as L, can be divided into the following subsets: origin terminals in China (OC, ranging from 1 to 9), transshipment terminals in China/Out (TCO, from 10 to 13), transshipment terminals in Europe/IN (TEI, from 14 to 16), and destination terminals in Europe (DE, from 17 to 25), as shown in Figure 3. To handle scheduled services on this network, we extend the spatial network to a time-space network by replicating it for each time interval of the given time horizon T. So, the set of nodes of the time-space network is given by $N = L * T$. Between specific pairs of nodes $(i, j) \in N * N$, we define arcs representing transportation services, i.e., trains. We distinguish the standard transportation arcs A^S and express transportation arcs A^E according to trains' running time. Additionally, we define services for the storage of shipments in terminals. These services are represented by the set of holding arcs A^H. For all transportation arcs $(i, j) \in A^S \cup A^E$, we specify transportation costs per train h_{ij}^{Tr} and transportation costs per container c_{ij}^{C}. According to the service quality, express services' prices are higher than standard services'. The orders, i.e., freight containers that have to be routed through the network, are denoted as set K. For each shipment $k \in K$, we specify the quantity q^k, i.e. number of containers and the expected revenue r_k per container. To meet practical requirements at the terminals, we define for each $t \in L$ a minimum holding time t_j^H and a maximum capacity for incoming containers Cap_j. Also, the capacity of trains is limited to cap_{ij}. We use different decision variables to formulate the decision problem for designing optimal service networks for rail freight transport between China and Europe. The binary variable z_k represents whether a shipment $k \in K$ is accepted. The binary routing variables x_{ijk} define if shipment k is assigned to the arc $(i, j) \in A$ of the service network. The corresponding number of trains on arc $(i, j) \in A$ represents the integer variable y_{ij}.

$$\max Z = \sum_{k \in K} z^k q^k r^k - \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A^H} x_{ij}^k c_{ij}^H q^k - \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A^T} (y_{ij} h_{ij}^{Tr} + q^k c_{ij}^C) \tag{1}$$

s.t.

$$\sum_{(i,j)\in A} x_{ij}^k - \sum_{(i,j)\in A} x_{ji}^k = \begin{cases} z^k & \text{if} \quad i = O(k) \\ -z^k & \text{if} \quad i = D(k) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \qquad \forall k \in K \qquad (2)$$

$$\sum_{k\in K} q^k \cdot x_{ij}^k \leq Cap_j \cdot R_{i,j} \qquad \forall (i,j) \in A_T \qquad (3)$$

$$\sum_{k\in K} x_{ij}^k \cdot q^k \leq y_{ij} \cdot R_{i,j} \qquad \forall (i,j) \in A_T \qquad (4)$$

$$\sum_{(i,j)\in A_h} x_{ij}^k \geq t_j^H \qquad \forall k \in K \quad \forall j \in N \qquad (5)$$

$$x_{ij}^k \in (0,1) \qquad \forall k \in K \quad \forall (i,j) \in A \qquad (6)$$

$$y_{ij} \in \mathbb{Z} \qquad \forall (i,j) \in A \qquad (7)$$

The objective function in (1) is designed to maximize profit. The first term is revenue, is generated when an order is accepted ($z^k = 1$); we also establish different prices for various requirements. The terminal costs, highlighted in the second term, cover both storage and handling expenses. Storage costs are determined by the duration of the containers' stay at the terminals. Transit costs, which are in the third term, include the train cost, $\sum_{(i,j)\in A_T} y_{ij} \cdot h_{ij}^T$ and the container transport cost, $\sum_{k\in K} \sum_{(i,j)\in A^T} q^k c_{ij}^C$, it include the express E and standard services S during the transit, which is also dependent on the volume of containers. Flow Balance constraints (2) ensure that the demand for each commodity is met. Rail services are considered to have a capacity limit due to constraints on rail fleet size, train length, and terminal restrictions (3 and 4). The minimum terminal processing time is dictated by constraint (5). Finally, constraints (6) and (7) give variable-type restrictions.

4 Computational Results

We have established three instances with different orders to represent diverse service requirements. We first established a planning horizon, T=40 daysSpecifically, 20% of all orders aim for a quick total transport time between 15 and 20 days, while the remaining 80% require a total transport time exceeding 20 days. Each order specifies the origin, destination, available release time at the origin terminal, number of containers, and due

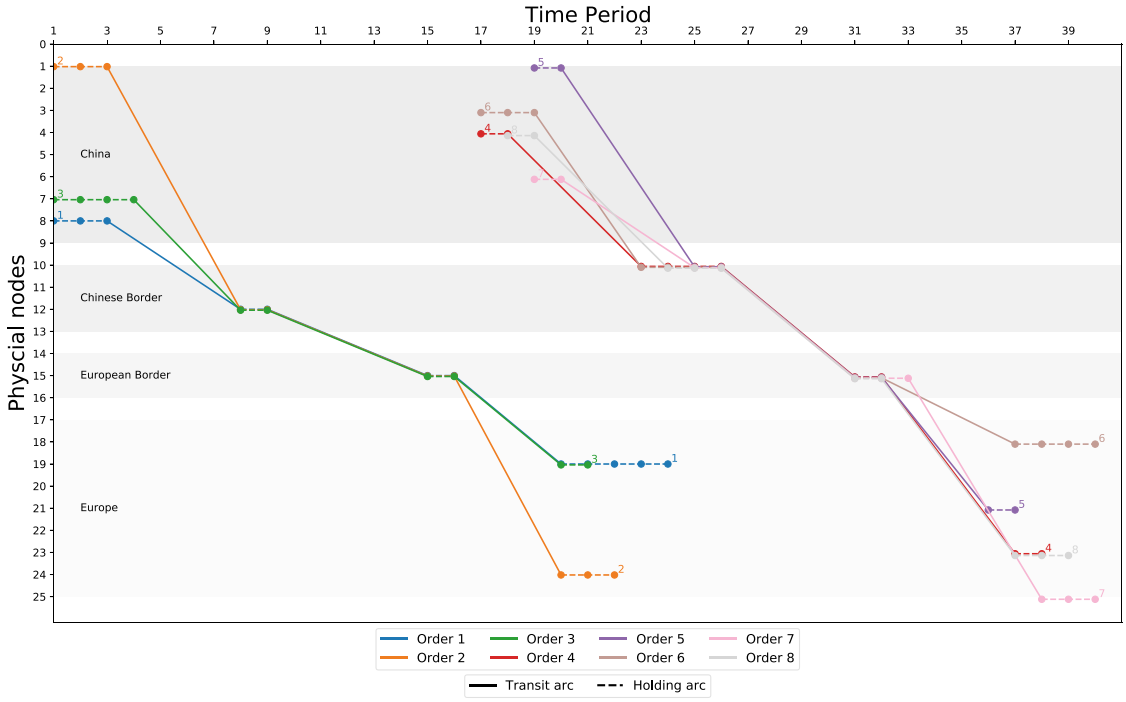


Figure 4: Results of instance 1000_7 *on a time-space network*

times at the destination terminal. Instance 1 and 2 contains ten orders, Instance 3 and 4 includes 500 orders, and Instance 5 and 6 comprises 1,000 orders. We have made these instances publicly available for further research, providing a useful resource for testing our model. [2].

Table 3: Results of instances

Instance	**Profit** ($)	**Revenue** ($)	**Costs** Transit ($)	Terminal ($)	**Containers** (-)	**Orders** (-)	**Gap** %	**Time** (s)
10_1	162.025	1.372.000	1.129.515	80.460	148	9	0	0,5
10_2	129.812	1.211.000	1.012.088	69.100	131	9	0	0,5
10_3	164.418	1.279.000	1.034.442	80.140	135	9	0	0,3
500_4	10,69 m	62,27 m	48,08 m	3,51 m	6775	444	0,051	3617
500_5	10,43 m	60,98 m	47,04 m	3,51 m	6641	441	0,050	3610
500_6	10,53 m	61,93 m	47,93 m	3,47 m	6732	443	0,053	3614
1000_7	45,62 m	262,26 m	202,25 m	14,38 m	28501	884	0,047	3600
1000_8	43,59 m	255,57 m	197,69 m	14,28 m	27891	870	0,054	3600
1000_9	44,93 m	260,32 m	201,01 m	14,39 m	28329	880	0,048	3600

We validate the proposed model through numerical simulations performed using Gurobi Optimizer version 10.0.2 on a computer with an AMD Ryzen 9 5900HX CPU, using

[2]The test cases can be accessed at: `https://github.com/ronnyshan/SSNDAchen`

up to 16 threads. The optimization process was conducted with a time limit of 3600 seconds. The results demonstrate that the model effectively considers each order and its specific release and due time requirements. This I-SSND model successfully coordinates the various demands and treats them differently. Now, the orders are not hastily sent to the destination terminal but are distributed flexibly across the network in multiple terminals, considering each order's requirements. Figure 4 shows an example of 25 terminals over 40 time periods, illustrating the transit and holding arcs. Based on the I-SSND model, some orders extend their stay at the border crossing terminal, such as order 2, a service stays at Terminal 1 for 2 time periods and departs at t=3. It then takes five time periods to arrive at the Chinese border crossing Terminal 12 at t=8 After staying at Terminal 12 for one time period—illustrated by 1 holding arc—the service departs Terminal 12 at t=9. It takes 6 time periods to reach the European border crossing Terminal 15 at t=15. Following a 1 period stay at Terminal 15, represented by 1 holding arc, departs at t=16. It then takes 4 time periods to arrive at the destination, Terminal 24, at t=20, and stay a further 2 time periods. Orders 1 and 3, along with order 2, undergo consolidation at Chinese border crossing terminal 12 and use the same train for the main transit. All orders must remain at the border crossing terminal for at least one day for administrative processes. The duration of stay at the origin or destination terminals varies significantly among the orders. Orders 1 and 3 spend more time at the terminals of origin or destination, whereas orders 4 and 6 spend more time at Chinese border crossing terminal 10. This variation is due to the diverse time requirements associated with each order and the goal of the model. All schedules are synchronized across different rail systems.

Table 3 shows the total number of containers accepted, the number of accepted orders, the total cost of transit and terminal, the revenue generated by the accepted orders, and the profit generated by the entire Eurasian rail network, which is the value of revenue minus all related costs. Orders are selected by the I-SSND model, and not every order is accepted. The instance 1000_7 showed a marked improvement with 28501 containers and 884 orders, transit costs of \$202.25 million, and terminal costs of \$14.38 million. The revenue is \$262.26 million, providing a substantial profit of \$245.62 million. Larger orders require significantly more time to calculate due to their complexity and the more significant number of variables involved. However, the gap is still acceptable, it results in significant improvements in overall network performance and profit generation.

5 Discussion

The contributions of this paper are as follows: We introduce a new scheduled SND model which incorporates factors such as transshipments, release time, delivery due time, varying train lengths, scheduling synchronization, and heterogeneous rail services. The model aims to fulfill the supply chain's diverse service requirements and maximize the entire network's profit simultaneously. In the current Eurasian rail industry, service providers often indiscriminately accept all customer demands, regardless of their specific requirements, and deliver standard services. Our proposed scheduled SND model espouses a more discerning approach, allowing for prioritization and customization of services according to distinct customer needs. It advocates for a more stringent selection process, which is possible by developing loading and unloading plans at terminals and choosing different transit services. Advancements in terminal automation now make it feasible to implement automated control systems that manage the operations of loading and unloading equipment at terminals. These systems can intelligently select and handle containers, making decisions based on factors such as the priority of each order. Non-urgent shipments usually take a few days longer than urgent shipments at the terminals or during transit. Our model also allows non-urgent cargo to travel with urgent orders to subsequent terminals for better resource utilization.

6 Conclusion

This paper aims at developing a scheduled SND model on a time-space network for international rail freight. This model ensures more efficient utilization of resources while simultaneously satisfying heterogeneous service requirements of the supply chain. This model is unique in integrating the transshipment process at border crossing terminals, rejection mechanism, scheduling synchronization across different rail systems, and considering the multiple services during transit. The model also decides both the location and the length of stay of each order at each terminal. The outcomes of the initial application of this model in Eurasian rail freight have shown promising potential for its implementation within the industry. However, there are areas identified for future refinement and research. A noteworthy aspect to be explored is the possibility of order splitting. This feature could provide greater flexibility and efficiency in managing diverse supply chain demands. The developed model could not accept any potential delay that exceeds

the specified due time, necessitating additional investigation. Furthermore, although the model shows great promise, the challenge of dealing with more significant instances remains. Future research must investigate more sophisticated and efficient algorithms that can handle more extensive data sets and complex scenarios, which would continue to advance the model's capabilities and strengthen its real-world applicability in managing sophisticated and varied supply chain demands.

References

[1] J. Andersen and M. Christiansen. Designing new european rail freight services. *Journal of the Operational Research Society*, 60(3):348–360, 2009.

[2] Jardar Andersen, Teodor Gabriel Crainic, and Marielle Christiansen. Service network design with management and coordination of multiple fleets. *European Journal of Operational Research*, 193(2):377–389, 2009.

[3] Lars Backåker and Johanna Törnquist Krasemann. Trip plan generation using optimization: A benchmark of freight routing and scheduling policies within the carload service segment. *JOURNAL OF RAIL TRANSPORT PLANNING & MANAGEMENT*, 2(1-2):1–13, 2012.

[4] Benoit Crevier, Jean-François Cordeau, and Gilles Savard. Integrated operations planning and revenue management for rail freight transportation. *Transportation Research Part B-Methodological*, 46(1):100–119, 2012.

[5] Ioana C. Bilegan, Luce Brotcorne, Dominique Feillet, and Yezekael Hayel. Revenue management for rail container transportation. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 4(2):261–283, 2015.

[6] Ioana C. Bilegan, Teodor Gabriel Crainic, and Yunfei Wang. Scheduled service network design with revenue management considerations and an intermodal barge transportation illustration. *European Journal of Operational Research*, 300(1):164–177, 2022.

[7] Mervat Chouman and Teodor Gabriel Crainic. Freight railroad service network design. In Teodor Gabriel Crainic, Michel Gendreau, and Bernard Gendron, editors, *Network Design with Applications to Transportation and Logistics*, pages 383–426. Springer International Publishing, Cham, 2021.

[8] Mervat Chouman, Teodor Gabriel Crainic, and Bernard Gendron. Commodity representations and cut-set-based inequalities for multicommodity capacitated fixed-charge network design. *Transportation Science*, 51(2):650–667, 2017.

[9] Teodor Gabriel Crainic. Service network design in freight transportation. *European Journal of Operational Research*, 122(2):272–288, 2000.

[10] Teodor Gabriel Crainic. Service design models for rail intermodel transportation. In Jo A.E.E. Nunen, M. Grazia Speranza, and Luca Bertazzi, editors, *Innovations in Distribution Logistics*, volume 619 of *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, pages 53–67. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2009.

[11] Liwei Duan, Lorant A. Tavasszy, and Jafar Rezaei. Freight service network design with heterogeneous preferences for transport time and reliability. *Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review*, 124:1–12, 2019.

[12] Ralf Elbert, Jan Philipp Müller, and Johannes Rentschler. Tactical network planning and design in multimodal transportation – a systematic literature review. *Research in Transportation Business & Management*, 35:100462, 2020.

[13] Mike Hewitt and Fabien Lehuédé. New formulations for the scheduled service network design problem. *Available at SSRN 4232772*, 2022.

[14] Li Li and Sridhar Tayur. Medium-term pricing and operations planning in intermodal transportation. *Transportation Science*, 39(1):73–86, 2005.

[15] T. L. Magnanti and R. T. Wong. Network design and transportation planning: Models and algorithms. *Transportation Science*, 18(1):1–55, 1984.

[16] National Development and Reform Commission. The 2021 china-europe freight trains development report, 2022.

[17] Michael Berliner Pedersen, Teodor Gabriel Crainic, and Oli B. G. Madsen. Models and tabu search metaheuristics for service network design with asset-balance requirements. *Transportation Science*, 43(2):158–177, 2009.

[18] Tobias Pollehn, Moritz Ruf, and Rainer König. Evaluating the effects of automation components in service networks of rail freight. *JOURNAL OF RAIL TRANSPORT PLANNING & MANAGEMENT*, 20:100267, 2021.

[19] Jean-Paul Rodrigue and Theo Notteboom. Dry ports in european and north ameri-

can intermodal rail systems: Two of a kind? *RESEARCH IN TRANSPORTATION BUSINESS AND MANAGEMENT*, 5:4–15, 2012.

[20] M. SteadieSeifi, N. P. Dellaert, W. Nuijten, T. van Woensel, and R. Raoufi. Multimodal freight transportation planning: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 233(1):1–15, 2014.

[21] UTLC. Rates for u west (china-europe) and u east (europe-china), 2022.

[22] Yunfei Wang, Ioana C. Bilegan, Teodor Gabriel Crainic, and Abdelhakim Artiba. Performance indicators for planning intermodal barge transportation systems. *Transportation Research Procedia*, 3:621–630, 2014.

[23] Zujian Wang and Mingyao Qi. Service network design considering multiple types of services. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 126:1–14, 2019.

[24] Nicole Wieberneit. Service network design for freight transportation: a review. *OR Spectrum*, 30(1):77–112, 2007.

[25] Endong Zhu, Teodor Gabriel Crainic, and Michel Gendreau. Scheduled service network design for freight rail transportation. *Operations Research*, 62(2):383–400, 2014.

Session 10
Jing Shan, Henning Preis, Nikola Bešinović, Jörn Schönberger

Authors

Jing Shan M.Sc. (mail: jing.shan1@tu-dresden.de)
Jing Shan, a PhD candidate, has many years of experience working at international rail companies, including Rail Cargo Group (ÖBB), and CRCT (China State Railway Group). He has also published a book titled "Eurasian rail transport: An Experiment of Global Supply Chain Revolution".

Dr. Henning Preis (mail: henning.preis@tu-dresden.de)
Dr. Henning Preis has studied traffic and transportation sciences at TU Dresden. He has a Ph.D. in the field of transport logistics. As a lecturer and academic staff, he specializes in modeling and optimization of transportation networks and logistics processes. His work includes analyzing complex processes, building models, and developing efficient solution strategies. His current research addresses intermodal transportation networks and transshipment operations in classification yards and airport freight hubs.

Dr. Nikola Bešinović (mail: nikola.besinovic@tu-dresden.de)
Dr. Nikola Bešinović's research develops analytics and optimization methodologies to promote efficient, reliable, and sustainable transport systems. His main focus is on railway traffic management systems, where he proposes data-driven decision-making approaches to enhance railway operations, train schedules, and driver behavior. He is also interested in new resilient transport concepts, determining critical infrastructure and operations.

Prof. Jörn Schönberger (mail: joern.schoenberger@tu-dresden.de)
The research interests of Prof. Jörn Schönberger are primarily in the field of model-based optimization and control of complex systems. Therefore, different methods from mathematics, operations research, artificial intelligence, and (business) informatics are applied. The typical scopes of application cover, inter alia, traffic, transport, logistics, and production systems, but also the planning of sports events.

IRSA 2023

SESSION 11

KAPAZITÄTSMANAGEMENT I

CAPACITY MANAGEMENT I

Session 11
Alexander Fink, Fabian Hantsch, Ullrich Martin, Stefan Schmidhäuser, Mario Fietze

Ermittlung der Leistungsfähigkeit für Zugmeldestellen in Eisenbahnnetzen

Fink, Alexander[1]; Hantsch, Fabian[1]; Martin, Ullrich[1]; Schmidhäuser, Stefan[1]; Fietze, Mario[2]

[1]Institut für Eisenbahn- und Verkehrswesen, Universität Stuttgart
[2]Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung (DZSF)

Zusammenfassung

Bei der zielorientierten Weiterentwicklung des Eisenbahnnetzes kommt der Bewertung der Leistungsfähigkeit eine besondere Bedeutung zu. Etablierte Verfahren sind dabei entweder in der Gesamtgröße des zu betrachtenden (Teil-)Netzes oder in der Granularität der Abbildung bahnbetrieblicher Effekte limitiert. Dieser Beitrag stellt ein Berechnungsverfahren vor, welches eine leistungsbestimmende Kenngröße für Zugmeldestellen äquivalent zur Nennleistung von Strecken ermittelt und die genannten Restriktionen überwindet. Damit ist, anders als bei bisherigen Lösungen, eine durchgehende Bewertung der Leistungsfähigkeit auch größerer Netze möglich. Dieses Verfahren wird im Rahmen des DZSF-Projektes „Methodik zur Kapazitätsbewertung des Gesamtsystems und Knotenberechnung“ entwickelt.

Keywords: Kapazität, Nennleistung, Leistungsuntersuchungen, Analytik, Knoten

1 Einleitung

Das deutsche Eisenbahnnetz gehört im weltweiten Vergleich zu den Schienennetzen mit der höchsten Netzdichte. Es stößt bereits heute partiell an seine Belastungsgrenze und in den nächsten Jahren ist im Rahmen der beabsichtigten Verkehrswende mit einem weiteren Anstieg der Belastung zu rechnen. Für die Weiterentwicklung des Bestandsnetzes ist eine präzise Bewertung der Leistungsfähigkeit der vorhandenen und geplanten Infrastruktur notwendig.

Bestehende Ansätze für Leistungsuntersuchungen haben im Allgemeinen mindestens eine der folgenden Restriktionen:

1. Die einzelnen Infrastrukturelemente werden mit ihren Abhängigkeiten detailliert betrachtet, jedoch lassen sich nur überschaubare Netzbereiche untersuchen (insb. bei mikroskopischen Simulationsverfahren).
2. Die Infrastrukturelemente werden vereinfacht abgebildet, damit auch eine netzweite Bewertung möglich ist – jedoch unter Vernachlässigung gegenseitiger Abhängigkeiten (insb. bei analytischen Verfahren).

Im Rahmen des DZSF-Forschungsprojekts „Methodik der Kapazitätsbewertung des Gesamtsystems und Knotenberechnung“ wird deshalb ein Modell erstellt, welches die genannten Restriktionen auflöst. Im Folgenden wird der im Rahmen dieses Projekts am Institut für Eisenbahn- und Verkehrswesen der Universität Stuttgart entwickelte Ansatz zur Bewertung der Leistungsfähigkeit von Zugmeldestellen vorgestellt.

In der Eisenbahnbetriebswissenschaft wird häufig zwischen den Netzelementen Strecke und Knoten unterschieden, wobei Knoten die Infrastrukturelemente sind, die eine Änderung der Reihenfolge der Züge ermöglichen. Dies entspricht auch der Definition von Zugmeldestellen in § 39 Absatz 1 Satz 1 EBO: „Die Folge der Züge wird durch Zugfolgestellen, die Reihenfolge durch Zugmeldestellen, die stets auch Zugfolgestellen sind, geregelt.“. Im Folgenden wird daher statt dem unterschiedlich definierten Begriff Knoten stets der Begriff Zugmeldestelle verwendet. Damit sind neben Bahnhöfen explizit auch andere Zugmeldestellen wie Abzweig- und Überleitstellen eingeschlossen.

Im vorliegenden Artikel wird zunächst erörtert, warum es einen Forschungsbedarf im Bereich der langfristigen Kapazitätsbewertung gibt und warum ein analytischer Ansatz eine geeignete Herangehensweise darstellt. Anschließend wird kurz auf das aktuell angewandte Verfahren zur Bestimmung der außerplanmäßigen Wartezeit und Nennleistung für Strecken nach Schwanhäußer [1] eingegangen, um in Anlehnung daran ein Verfahren für Zugmeldestellen zu entwickeln. Damit wird anschließend eine zur Nennleistung für Strecken äquivalente Kenngröße definiert, die im folgenden Zugmeldestellen-Nennleistung genannt wird.

1.1 Zielstellung und Perspektive

Der hier beschriebene Ansatz soll in erster Linie dazu dienen, Leistungsuntersuchungen mit einer langfristigen Perspektive durchzuführen und so den Zusammenhang zwischen Betriebsqualität und Belastung für ein gegebenes Szenario zu ermitteln. Die Möglichkeit einer Betrachtung hinreichend großer Netzbereiche, beispielsweise eines

Regionalbereichs im deutschen Eisenbahnnetz, erscheint im Sinne der Aufgabenstellung deshalb wichtiger als eine mikroskopische Abbildung der Vorgänge in einzelnen Betriebsstellen. Als Eingangsgröße wird ein grobes Betriebsprogramm unterstellt, d. h. die Art und Anzahl der Modellzüge je Stunde und Relation ist bekannt, während die genauen Fahrlagen der Züge nicht festgelegt sein müssen. Das Ziel besteht darin, bei gegebener Infrastruktur und grobem Betriebsprogramm unter Berücksichtigung auftretender gegenseitiger Behinderungen der Züge eine Aussage zur Leistungsfähigkeit einzelner Betriebsstellen zu treffen. Damit können sowohl Engpässe als auch Bereiche mit Kapazitätsreserven identifiziert werden und so auch Variationen von Fahrplankonzepten untersucht werden. Ein dynamisches Routing der Modellzüge über Alternativstrecken wird dabei zunächst noch nicht berücksichtigt, es soll sich auf die Bewertung eines gegebenen Szenarios beschränkt werden. Eine solche Optimierung des Betriebsprogramms durch Variation der Eingangsparameter bietet sich jedoch als eine sinnvolle Erweiterung des Ansatzes an.

1.2 Wahl der Methodik und Anforderungen

Für den Ansatz wird als analytisches Verfahren ein bedienungstheoretischer Ansatz gewählt. Simulationsverfahren sind wegen der mit wachsendem Untersuchungsgebiet schnell und überproportional anwachsenden Rechenzeiten weniger gut geeignet. Auch sind die Vorteile der mikroskopischen Betrachtung betrieblicher Prozesse in einzelnen Netzelementen für die beschriebene Zielstellung weniger relevant.

Ein analytisches Verfahren stellt die für die Betrachtung großer Netzbereiche notwendigen hinreichend kurzen Rechenzeiten sicher. Auch soll die Anzahl und der Detailgrad der Eingangsparameter überschaubar gehalten werden, um die allgemeine Anwendbarkeit sicherzustellen. Dafür wird in Kauf genommen, dass nur wenige, dafür aber für die Leistungsfähigkeit maßgebliche Kenngrößen ermittelt werden. Für die gewählte langfristige Perspektive mit grobem Betriebsprogramm wird dies als ausreichend erachtet, zumal die Eingangsparameter, wie z. B. konkrete Fahrpläne, in diesem Zusammenhang ohnehin oftmals noch nicht in letzter Detailtiefe vorliegen.

Bestehende analytische Verfahren zur Leistungsuntersuchung haben insbesondere die Einschränkung, dass die einzelnen Netzelemente separat untersucht und mit nicht unmittelbar vergleichbaren Kenngrößen bewertet werden. Die Unterscheidung von Strecken und Zugmeldestellen ist dabei sehr verbreitet, teilweise werden letztere noch

weiter in Gleisgruppen und Fahrstraßenknoten unterteilt und getrennt modelliert (z. B. Schwanhäußer [2], Hertel [3], Mussone [4]). Dementsprechend müssen auch verschiedene Qualitätskriterien zu Grunde gelegt werden. Wünschenswert wären einheitliche Kapazitätskenngrößen der Teilbereiche, um einen einheitlichen Vergleich zu ermöglichen.

Deshalb wurden folgende Anforderungen an das zu entwickelnde Verfahren für Zugmeldestellen gestellt:

1. Da Fahrstraßenknoten und Gleisgruppen in den Zugmeldestellen miteinander interagieren, sollen diese im Rahmen einer Leistungsuntersuchung gemeinsam betrachtet werden.
2. Um eine bessere Vergleichbarkeit von Zugmeldestelle und Strecke zu erreichen, sollen für beide Infrastrukturelemente jeweils einheitliche Kapazitätskenngrößen bestimmt werden.
3. Äquivalent zur bereits etablierten Definition der Nennleistung für Strecken soll eine entsprechende Kenngröße für Zugmeldestellen ermittelt werden.

2 Verfahren zur Ermittlung der Nennleistung

Im Folgenden wird das neu entwickelte Verfahren zur Ermittlung der Nennleistung für Zugmeldestellen vorgestellt. Ausgangspunkt ist dabei das Verfahren von Schwanhäußer für Strecken, welches zunächst kurz erläutert wird.

2.1 Ermittlung der Nennleistung von Strecken nach Schwanhäußer

Für Strecken ist die Nennleistung definiert, also die unter Einhaltung bestimmter Qualitätskriterien und ohne Veränderung des Betriebsprogramms fahrbare Anzahl an Zügen [5]. Berechnet wird diese mit dem von Schwanhäußer 1982 entwickelten und heute allgemein etablierten Ansatz, der einen Zusammenhang zwischen dem Erwartungswert der zulässigen außerplanmäßigen Wartezeit und dem Erwartungswert des Ankunftsabstandes der Züge herstellt [1]:

$$q_Q = \frac{ET_W}{0{,}260 \cdot e^{-1{,}3 p_{Rz}} \cdot ET_A}$$

Dabei ist q_Q der Qualitätsfaktor, ET_W der Erwartungswert der außerplanmäßigen Wartezeit eines Zuges, ET_A der mittlere Ankunftsabstand der Züge und p_{R_z} der

Reisezuganteil am Betriebsprogramm. Außerplanmäßige Wartezeiten sind jene Wartezeiten, die durch Unregelmäßigkeiten im Betrieb entstehen [6]. Im Folgenden wird der von anderen Zügen verursachte Anteil der außerplanmäßigen Wartezeit als behinderungsbedingte Wartezeit bezeichnet.

Bei gegebenem Betriebsprogramm ist der Anteil der Reisezüge bekannt. Aus dem Erwartungswert der Ankunftsabstände lässt sich durch Bildung des Kehrwerts die Anzahl der Züge pro Zeiteinheit bestimmen. Zur Berechnung des Erwartungswerts der außerplanmäßigen Wartezeit kann die ebenfalls allgemein anerkannte STRELE-Formel verwendet werden. Als Eingangsgrößen gehen hier die Mindestzugfolgezeit, die mittlere Pufferzeit, Wahrscheinlichkeit und Mittelwert der Einbruchsverspätung der Züge und die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines gleichrangigen Zugfolgefalls ein, die auf der Zusammensetzung des Betriebsprogramms basiert [2]. Diese Kenngrößen sind aus der Infrastruktur und dem groben Betriebsprogramm bekannt.

Der hier vorgestellte Ansatz ist grundsätzlich offen gestaltet und es kann statt dem Verfahren nach Schwanhäußer auch ein anderes Verfahren zur Berechnung der Streckenleistungsfähigkeit genutzt werden. Im Folgenden wird sich der Anschaulichkeit wegen auf das Verfahren von Schwanhäußer bezogen. Eine vertiefte Beschreibung der Rahmenbedingungen und Einschränkungen der STRELE-Formel findet sich bei Weik et al. [7].

2.2 Berechnung der außerplanmäßigen Wartezeit für Zugmeldestellen

Die von Schwanhäußer entwickelte und oben genannte STRELE-Formel ermittelt als Kenngröße der Betriebsqualität die außerplanmäßige Wartezeit. Im Fall von Zugmeldestellen hat sich eine Trennung derselben in Fahrstraßenknoten und Gleisgruppen etabliert. Für Gleisgruppen gibt es mit dem Verfahren von Hertel einen Ansatz, um die auftretende Wartezeit zu ermitteln. Allerdings liefert dieser nur einen Wert für die gesamte Gleisgruppe, da innerhalb dieser eine gegenseitige Vertretbarkeit der Gleise vorausgesetzt und bei Überlastung eines Gleises eine Disposition der Züge mit Wechsel des Gleises unterstellt wird [3]. Informationen zur Belegung der einzelnen Gleise oder zur Auswirkung einzelner Züge auf die auftretenden Wartezeiten lassen sich nicht direkt ermitteln. Auch die gegenseitigen Beeinträchtigungen der Züge in den Fahrstraßenknoten und deren Einfluss auf die im Betrieb verursachte außerplanmäßige Wartezeit der Zugmeldestelle müssen anderweitig ermittelt werden.

Einen ganzheitlichen Ansatz für Fahrstraßenknoten in Zugmeldestellen (dort Gesamtfahrstraßenknoten genannt) liefert Schwanhäußer: Er verwendet die Verkettungszahl von Potthoff (auch Ausschlussgrad genannt), um die Behinderung der Züge im Fahrstraßenknoten abzubilden und modelliert diesen als einkanaliges Ersatzsystem [8]. Neben der Einschränkung, dass mit diesem Verfahren planmäßige Wartezeiten ermittelt werden, ist vor allem folgende Besonderheit zu beobachten: Für die Berechnung sind detaillierte Informationen über die gegenseitigen Ausschlüsse der einzelnen Züge notwendig, die in einer Ausschlussmatrix festgehalten werden. U. a. daraus wird dann die Verkettungszahl bestimmt. Als Ergebnis liefert dieses Verfahren jedoch nur einen Wartezeitwert für den Fahrstraßenknoten der Zugmeldestelle, modellzugscharfe Ergebnisse sind wegen des einkanaligen Ersatzsystems nicht möglich.

Ziel des hier entwickelten Verfahrens ist deshalb, vergleichbar zur STRELE-Formel für Strecken die außerplanmäßigen Wartezeiten in Zugmeldestellen zu berechnen, wobei jedes Gleis der Gleisgruppe separat betrachtet sowie die Behinderungen im Fahrstraßenknoten berücksichtigt werden. Auch bei den Eingangsparametern werden ähnliche Größen wie bei der STRELE-Formel gewählt, um Zugmeldestellen zu modellieren.

Grundidee für die Modellierung

Jedes Gleis mit planmäßigen Halten bzw. Durchfahrten wird als eigenständiges einkanaliges Wartesystem der Bedienungstheorie mit allgemeinen Verteilungen für den Ankunfts- und Bedienungsprozess modelliert. Dieser Ansatz wurde gewählt, weil die von den einzelnen Zügen verwendeten Fahrstraßen und ihre Konflikte im weiteren Verlauf explizit betrachtet werden sollen. Dazu werden das befahrene Gleis der Gleisgruppe und der gewählte Fahrweg berücksichtigt. Die behinderungsbedingten Wartezeiten, die in der Warteschlange vor dem Einfahrsignal auftreten, werden gemäß der von Gudehus für Eisenbahnen etablierten Kingman-Approximation [9]

$$ET_w \approx \frac{c_a^2 + c_b^2}{2} \frac{1}{\mu} \frac{\rho}{1-\rho}$$

berechnet. Hierbei bezeichnen c_a^2 bzw. c_b^2 die quadrierten Variationskoeffizienten der Ankunftsabstände bzw. der Bedienungszeiten, μ ist die Bedienungsrate sowie ρ der Verkehrswert. Sollte die betrachtete Betriebsstelle über kein Einfahrsignal verfügen, ist das letzte Signal vor dem Fahrstraßenknoten maßgeblich.

Bei der Ankunft sind die Züge bekannten, aber zufälligen Ankunftsverspätungen unterworfen. Bei der Bedienung sind die Züge bekannten, aber zufälligen Urverspätungen (in Form von Haltezeitverlängerungen) und ggf. behinderungsbedingten Einflüssen durch feindliche Fahrten während der Ein- bzw. Ausfahrt unterworfen. Nur diese Störungen sollen Beiträge zur behinderungsbedingten Wartezeit in der Warteschlange vor dem Einfahrsignal liefern, d. h. wenn sowohl Ankunftsverspätungen als auch Urverspätungen und ggf. behinderungsbedingte Einflüsse durch feindliche Fahrten während der Ein- bzw. Ausfahrt gleich Null sind, soll auch $ET_w = 0$ gelten. Um diese Bedingung einzuhalten, sollen planmäßig ungleichmäßige Ankunftszeiten bzw. Bedienungszeiten der Züge in der Zugmeldestelle keinen Beitrag zu den Variationskoeffizienten c_a^2 bzw. c_b^2 liefern. Diese werden im Modell vereinfachend durch konstante planmäßige Ankunftsabstände und Bedienungszeiten abgebildet.

Wie im Rahmen von eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Untersuchungen üblich, werden zur Modellierung von Verspätungen und Störungen (verallgemeinerte) Exponentialverteilungen angesetzt, d. h. mit einer Verteilungsfunktion F_Z der Form:

$$F_Z(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1 - pe^{-t/m}, & t \geq 0 \end{cases}$$

Hierbei entspricht p dem Anteil der gestörten Züge und m dem Mittelwert der Störungsdauer eines gestörten Zuges. Als Kurznotation für diese Verteilung wird im Folgenden $Z \sim Vsp(p, m)$ verwendet. Für den Erwartungswert bzw. die Varianz einer Zufallsvariable Z, welche einer (verallgemeinerten) Exponentialverteilung mit den Parametern (p, m) genügt, gilt:

$$EZ = pm$$

$$V(Z) = p(2 - p)m^2$$

Annahmen für die Berechnung

Die Berechnung der behinderungsbedingten Wartezeit wird wie bereits erwähnt separat für jedes Gleis der Gleisgruppe durchgeführt. Im Folgenden wird die Berechnung für ein betrachtetes Gleis beschrieben.

- Auf dem betrachteten Gleis verkehren die Modellzüge $i = 1, \ldots, n$
- Modellzug i verkehrt durchschnittlich alle $ET_{a,i}$ Minuten, d. h. mit Ankunftsrate $\lambda_i = 1/ET_{a,i}$
- Bezeichne $\lambda = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i$ die Ankunftsrate über alle Modellzüge, so ist der durchschnittliche Ankunftsabstand auf dem betrachteten Gleis $1/\lambda$ Minuten.

- Die relative Häufigkeit des Auftretens des Modellzugs i beträgt $h_i = \lambda_i/\lambda$.
- Die Modellzüge unterliegen (verallgemeinert) exponentialverteilten Ankunftsverspätungen X_i mit den Parametern $(p_{a,i}, m_{a,i})$
- Die Modellzüge unterliegen (verallgemeinert) exponentialverteilten Urverspätungen (Haltezeitverlängerungen) $Y_{h,i}$ mit den Parametern $(p_{b,h,i}, m_{b,h,i})$

Beispiel: Um das beschriebene Verfahren besser zu verdeutlichen, wird im weiteren Verlauf des Artikels ein durchgehendes Beispiel entwickelt. Die dabei untersuchte Zugmeldestelle ist in Abbildung 1 dargestellt. Auf den Gleisen 1 und 2 verkehrt jeweils alle 15 min ein Zug des Schienenpersonennahverkehrs (SPNV) mit einer Ankunftsverspätung von $X_{SPNV} \sim Vsp(60\,\%, 4{,}5\,min)$ *sowie alle 30 min ein Zug des Schienenpersonenfernverkehrs (SPFV) mit einer Ankunftsverspätung von* $X_{SPFV} \sim Vsp(50\,\%, 5\,min)$. *Auf Gleis 1 verkehrt zusätzlich einmal stündlich ein Güterzug (SGV) mit einer Ankunftsverspätung von* $X_{SGV} \sim Vsp(60\,\%, 10\,min)$, *der beim Ausfahren aus der Zugmeldestelle Gleis 2 kreuzt. Sowohl SPFV als auch SGV durchfahren die Zugmeldestelle lediglich, während die Züge des SPNV halten und einer Haltezeitverlängerung von* $Y_{h,SPNV} \sim Vsp(10\,\%, 1\,min)$ *unterliegen. Betrachtet wird im Rahmen des Beispiels Gleis 1.*

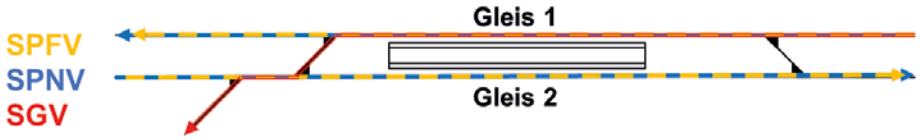


Abbildung 1: Aufbau der im Beispiel betrachteten Zugmeldestelle

Für die Ankunftsraten von Gleis 1 ergeben sich folgende Werte: $\lambda_{SPNV} = 4/h$, $\lambda_{SPFV} = 2/h$, $\lambda_{SGV} = 1/h$ *sowie* $\lambda = 7/h$. *Die relativen Auftrittshäufigkeiten berechnen sich zu:* $h_{SPNV} = 0{,}57$, $h_{SPFV} = 0{,}29$ *und* $h_{SGV} = 0{,}14$.

Betrachtung des Ankunftsprozesses

Wie oben beschrieben werden im ungestörten Fall konstante planmäßige Ankunftsabstände von $1/\lambda$ Minuten unterstellt. Das Auftreten des Zugfolgefalls ij wird über folgende relative Häufigkeiten beschrieben:

$$h_{ij} = h_i h_j = \frac{\lambda_i \lambda_j}{\lambda^2}$$

Beispiel: Für den Zugfolgefall SPFV auf SPNV ergibt sich unter Zuhilfenahme der zuvor bestimmten Ankunftsraten $h_{SPNV,SPFV} = 0{,}16$.

Wie in Abbildung 2 dargestellt, gilt für den gestörten zufälligen Ankunftsabstand $T_{a,ij}$ des Zugfolgefalls ij:

$$T_{a,ij} = \frac{1}{\lambda} + X_j - X_i$$

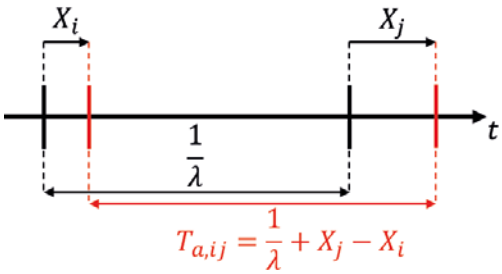


Abbildung 2: Der gestörte Ankunftsabstand $T_{a,ij}$ weicht vom ungestörten Fall durch die Verspätungen X_i und X_j der beiden beteiligten Züge i und j ab.

Für den gestörten zufälligen Ankunftsabstand T_a, in welchem der Zugfolgefall ij mit relativer Häufigkeit h_{ij} auftritt, gilt demnach unter Verwendung von $h_{ij} = h_{ji}$ und der anzunehmenden stochastischen Unabhängigkeit der Ankunftsverspätungen:

$$ET_a = \sum_{i,j=1}^{n} h_{ij}\, ET_{a,ij} = \frac{1}{\lambda}$$

$$V(T_a) = 2\sum_{i=1}^{n} h_i V(X_i) + \sum_{i,j=1}^{n} h_{ij}\left[EX_j - EX_i\right]^2$$

Für den quadrierten Variationskoeffizienten der Ankunftsabstände folgt:

$$c_a^2 = \frac{V(T_a)}{(ET_a)^2} = 2\lambda\sum_{i=1}^{n} \lambda_i V(X_i) + \sum_{i,j=1}^{n} \lambda_i\lambda_j\left[EX_j - EX_i\right]^2$$

Beispiel: Es folgt $ET_a = 8{,}57\ min$ sowie $V(T_a) = 56{,}94\ min^2$. Entsprechend berechnet sich der quadrierte Variationskoeffizient der Ankunftsabstände zu $c_a^2 = 0{,}78$.

Betrachtung des Bedienungsprozesses

Zur Abbildung des Bedienungsprozesses wird die Bedienungszeit im Sinne der zeitlichen Inanspruchnahme des Bedienungskanals für einen Bedienvorgang benötigt. Die Bedienungszeit entspricht dem kleinsten zeitlichen Abstand, in welchem zwei Modellzüge ohne Behinderung bei der Belegung des betrachteten Gleises aufeinander folgen können. Dieser zeitliche Abstand hängt im Allgemeinen vom jeweiligen Zugfolgefall ij ab und wird mit $ET_{b,ungestört,ij}$ bezeichnet.

Wie oben beschrieben sollen im ungestörten Fall konstante Bedienungszeiten für alle ankommenden Züge unterstellt werden. Diese konstanten ungestörten Bedienungszeiten werden als gewichteter Mittelwert der ungestörten Bedienungszeiten aller auftretenden Zugfolgefälle bestimmt:

$$ET_{b,ungestört} = \sum_{i,j=1}^{n} h_{ij} ET_{b,ungestört,ij}$$

Beispiel: Für Zugfolgefälle, in denen ein Zug des SPFV vorausfährt, wird eine ungestörte Bedienungszeit von $2{,}0\ min$ *angenommen, für vorausfahrende Züge des SGV von* $3{,}0\ min$ *und des SPNV von* $3{,}5\ min$*, wobei hier die Haltezeit mit eingeschlossen ist. Damit ergibt sich im gewichteten Mittel* $ET_{b,ungestört} = 3{,}0\ min$.

Die Bedienungszeit des Modellzugs i unterliegt zwei Störeinflüssen: den im Halt auftretenden Urverspätungen (in Form von Haltezeitverlängerungen), die bereits über (verallgemeinert) exponentialverteilte Zufallsvariablen $Y_{h,i}$ mit den Parametern $(p_{b,h,i}, m_{b,h,i})$ vollständig beschrieben sind, sowie den behinderungsbedingten Einflüssen durch feindliche Fahrten während der Ein- und Ausfahrt, die ebenfalls als geeignete Störungen in Analogie zu den Urverspätungen überschläglich einbezogen werden sollen. Diese Störungen werden als Verlängerungen der Vor- bzw. Nachbelegungszeit über (verallgemeinert) exponentialverteilte Zufallsvariablen $Y_{v,i}$ mit den Parametern $(p_{b,v,i}, m_{b,v,i})$ bzw. $Y_{n,i}$ mit den Parametern $(p_{b,n,i}, m_{b,n,i})$ modelliert.

Zur Bestimmung der Parameter $(p_{b,v,i}, m_{b,v,i})$ bzw. $(p_{b,n,i}, m_{b,n,i})$ wird für jeden Modellzug i jeweils separat der genutzte Fahrweg bei der Ein- und Ausfahrt betrachtet. Relevant sind Behinderungen durch Fahrten auf feindlichen Fahrwegen, die weder den gleichen Start- noch Zielpunkt wie der betrachtete Fahrweg des Modellzugs i haben. Diese Einschränkungen sind für das vorgestellte Modell nötig, da im Falle von über dasselbe Streckengleis einfahrenden oder im selben Gleis der Zugmeldestelle endenden Zügen die gegenseitigen Ausschlüsse bereits in der Betrachtung des Ankunftsprozesses der jeweiligen Gleise der Zugmeldestelle enthalten sind. Ähnliches gilt für Züge, welche die Zugmeldestelle über dasselbe Gleis verlassen. Für in einem derartigen Fall auftretende gegenseitige Behinderungen wird angenommen, dass diese als Teil des Ankunftsprozesses des angrenzenden Streckenabschnitts betrachtet werden (bspw. als Eingangsverspätung im Rahmen des Verfahrens nach Schwanhäußer).

Beispiel: Dies bedeutet, dass die in Abbildung 3 dargestellten Züge des SPFV und SPNV auf Gleis 2 feindliche Fahrten für die Züge des SGV sind.

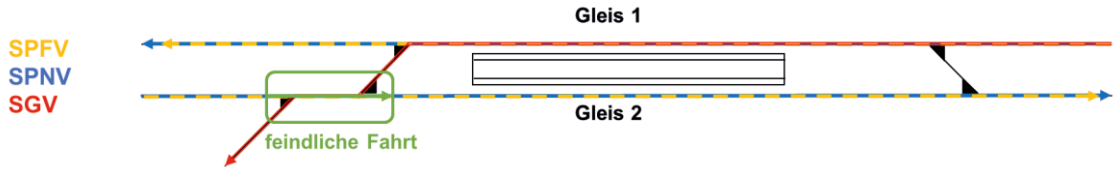


Abbildung 3: Feindliche Fahrten des betrachteten Beispiels

Für den genutzten Fahrweg eines Modellzugs i bei der Ein- oder Ausfahrt seien die behindernden Fahrwege durch $f_1^b, \dots, f_k^b$ bezeichnet, die jeweiligen Belegungen dieser Fahrwege treten mit Ankunftsraten $\lambda_1^b, \dots, \lambda_k^b$ auf und dauern jeweils $t_{Sp1}^b, \dots, t_{Spk}^b$. Die Belegungsdauer t_{Spj}^b bezieht sich auf den Zugfolgefall, in dem der Modellzug i unmittelbar auf einen Modellzug auf dem behindernden Fahrweg f_j^b folgt.

Es wird im Folgenden vereinfachend angenommen, dass der genutzte Fahrweg des Modellzugs i bei der Ein- oder Ausfahrt zu einem zufälligen, über den Betrachtungszeitraum gleichverteilten Zeitpunkt angefordert wird (vgl. entsprechende Annahme in der Potthoff'schen Behinderungstheorie [10]).

Eine Behinderung einer Fahrt auf dem genutzten Fahrweg des Modellzugs i bei der Ein- oder Ausfahrt durch Fahrten auf dem feindlichen Fahrweg $f_j^b, j = 1, \dots, k$, tritt daher mit folgender Wahrscheinlichkeit auf:

$$p_{beh,j} = \min\{\lambda_j^b t_{Spj}^b; 1\}$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass eine Fahrt des Modellzugs i durch Fahrten auf irgendeinem feindlichen Fahrweg behindert wird, hängt davon ab, in welcher Art und Weise die Belegungen auf den feindlichen Fahrwegen auftreten. Es wird im Folgenden eine unabhängige Belegung der feindlichen Fahrwege betrachtet (keine Abstimmung der einzelnen Belegungen). In diesem Fall tritt eine Behinderung einer Fahrt auf dem genutzten Fahrweg des Modellzugs i bei der Ein- oder Ausfahrt durch Fahrten auf irgendeinem feindlichen Fahrweg mit folgender Wahrscheinlichkeit auf:

$$p_{beh} = 1 - \prod_{j=1}^{k} (1 - p_{beh,j})$$

Falls eine Fahrt des Modellzugs i durch eine feindliche Fahrt behindert wird, so muss jene (auf Grund des gleichverteilten Anforderungszeitpunkts) im Mittel die Hälfte der durchschnittlichen Belegungszeit aller feindlichen Fahrten warten:

$$m_{beh} = \frac{1}{2}\frac{\sum_{j=1}^{k}\lambda_j^b t_{Spj}^b}{\sum_{j=1}^{k}\lambda_j^b}$$

Durch Bestimmung der Parameter (p_{beh}, m_{beh}) für jeden Modellzug i und jeweils dem genutzten Fahrweg bei der Ein- bzw. Ausfahrt erhält man die Parameter $(p_{b,v,i}, m_{b,v,i})$ bzw. $(p_{b,n,i}, m_{b,n,i})$.

Beispiel: Der auf Gleis 1 verkehrende SGV wird nach Bestimmung der feindlichen Fahrten bei der Ausfahrt durch die Fahrten des SPFV und SPNV auf Gleis 2 behindert (siehe Abbildung 3). Für die Belegungsdauern der feindlichen Fahrwege t_{SpSPFV}^b *bzw* t_{SpSPNV}^b *werden jeweils* $2{,}0\ min$ *angenommen. Gemeinsam mit den zuvor bestimmten Ankunftsraten* λ_{SPFV} *und* λ_{SPNV} *ergeben sich* $p_{beh,SPFV} = 0{,}07$ *sowie* $p_{beh,SPNV} = 0{,}13$ *und insgesamt* $p_{beh} = 0{,}19$ *sowie* $m_{beh} = 1{,}0\ min$.

Die Störung der Bedienungszeit des Modellzugs i wird mit Y_i bezeichnet. Diese setzt sich zusammen aus einer möglichen Behinderung in der Ein- und Ausfahrt (Vor- und Nachbelegung) sowie der Bedienungszeit in der Gleisgruppe:

$$Y_i = Y_{v,i} + Y_{h,i} + Y_{n,i}$$

Beispiel: Für SPFV und SPNV sowie die Einfahrt des SGV existieren keine feindlichen Fahrten. Deshalb gilt $Y_{v,SPFV} = Y_{n,SPFV} = Y_{v,SPNV} = Y_{n,SPNV} = Y_{v,SGV} = 0\ min$. *Da lediglich der SPNV in der Zugmeldestelle hält, gilt* $Y_{h,SPFV} = 0\ min$, $Y_{h,SGV} = 0\ min$ *und* $Y_{h,SPNV} \sim Vsp(10\ \%, 1\ min)$. *Aufgrund der feindlichen Fahrten bei Ausfahrt des SGV ist* $Y_{n,SGV} \sim Vsp(19\ \%, 1\ min)$. *Insgesamt ergibt sich für die Störungen der Bedienungszeit der einzelnen Züge* $Y_{SPFV} = 0\ min$, $Y_{SPNV} \sim Vsp(10\ \%, 1\ min)$ *und* $Y_{SGV} \sim Vsp(19\ \%, 1\ min)$.

Für die gestörte zufällige Bedienungszeit $T_{b,i}$ des Modellzugs i gilt:

$$T_{b,i} = ET_{b,ungestört} + Y_i$$

Für die gestörte zufällige Bedienungszeit T_b gilt demnach insgesamt:

$$ET_b = ET_{b,ungestört} + \sum_{i=1}^{n} h_i EY_i$$

$$V(T_b) = \sum_{i=1}^{n} h_i(V(Y_i) + [EY_i]^2) - \left(\sum_{i=1}^{n} h_i EY_i\right)^2$$

Für den quadrierten Variationskoeffizienten der Bedienungszeiten folgt:

$$c_b^2 = \frac{V(T_b)}{(ET_b)^2} = \frac{\sum_{i=1}^{n} h_i(V(Y_i) + [EY_i]^2) - (\sum_{i=1}^{n} h_i EY_i)^2}{\left(ET_{b,ungestört} + \sum_{i=1}^{n} h_i EY_i\right)^2}$$

Beispiel: Für Gleis 1 folgt $ET_b = 3{,}08\,min$ *sowie* $V(T_b) = 0{,}16\,\text{min}^2$. *Entsprechend berechnet sich der quadrierte Variationskoeffizient der Bedienungszeit zu* $c_b^2 = 0{,}02$. *Dieser Wert ist wesentlich kleiner als der Variationskoeffizient der Ankunftsabstände mit* $c_a^2 = 0{,}78$. *Die Bedienung wird maximal einmal pro Stunde durch die Einfahrt des Güterzuges gestört, deshalb werden die Verspätungen in der Zugmeldestelle durch die Ankunftsverspätungen der Züge dominiert.*

Bestimmung der behinderungsbedingten Wartezeiten

Aus der Ankunftsrate $\lambda = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i$ und der Bedienungsrate $\mu = (ET_b)^{-1} = \left(ET_{b,ungestört} + \sum_{i=1}^{n} h_i EY_i\right)^{-1}$ lässt sich unmittelbar der Verkehrswert ableiten:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \left(\sum_{i=1}^{n} \lambda_i\right)\left(ET_{b,ungestört} + \sum_{i=1}^{n} h_i EY_i\right)$$

Ist $\rho \geq 1$, dann ist das betrachtete System überlastet und die Wartezeiten wachsen gegen unendlich - ein stabiler Betrieb ist unmöglich. Deshalb ist dies ein im Rahmen der langfristigen Kapazitätsplanung nicht anzustrebender Zustand und wird hier im Folgenden nicht weiter betrachtet.

Falls $\rho < 1$, so lässt sich durch Einsetzen mittels der Kingman-Approximation eine Näherung für die behinderungsbedingten Wartezeiten in der Warteschlange vor dem Einfahrsignal bestimmen:

$$ET_w \approx \frac{c_a^2 + c_b^2}{2} \frac{1}{\mu} \frac{\rho}{1-\rho}$$

Beispiel: Die Bedienungsrate des Beispiels beträgt aufbauend auf den vorausgehenden Berechnungen $\mu = 0{,}32/min$. *Gemeinsam mit* $\lambda = 0{,}12/min$ *erhält man den Verkehrswert* $\rho = 0{,}36$. *Mit den zuvor berechneten* $c_a^2 = 0{,}78$ *und* $c_b^2 = 0{,}02$ *ergibt sich für Gleis 1 die behinderungsbedingte Wartezeit in der Warteschlange* $ET_w \approx 0{,}69\,min$.

Dieser Wert ist als bedienungstheoretischer Mittelwert für alle Modellzüge auf dem betrachteten Gleis gleich. Die behinderungsbedingten Wartezeiten in der Zugmeldestelle beinhalten neben den Wartezeiten vor dem Einfahrsignal zusätzlich noch die modellzugabhängigen behinderungsbedingten Wartezeiten durch feindliche Fahrten auf den Einfahr- bzw. Ausfahrweichen. Insgesamt beträgt die modellzugabhängige behinderungsbedingte Wartezeit für den Modellzug i:

$$ET_{w,i} = ET_w + EY_{v,i} + EY_{n,i} = \frac{c_a^2 + c_b^2}{2}\frac{1}{\mu}\frac{\rho}{1-\rho} + p_{b,v,i}m_{b,v,i} + p_{b,n,i}m_{b,n,i}$$

Diese modellzugscharfen behinderungsbedingten Wartezeiten bilden die Grundlage für die Bestimmung einer Nennleistung für Zugmeldestellen.

Beispiel: Da weder der auf Gleis 1 verkehrende SPFV noch der SPNV in unserem Beispiel feindlichen Fahrten ausgesetzt ist, entsprechen deren modellzugscharfe behinderungsbedingte Wartezeiten dem zuvor bestimmten, gleisscharfen $ET_{w,SPFV} = ET_{w,SPNV} \approx 0{,}69\,min$. *Im Gegensatz hierzu wird der SGV potentiell bei der Ausfahrt durch die auf Gleis 2 verkehrenden Züge behindert* ($Y_{n,SGV} \sim Vsp(19\,\%, 1\,min) \rightarrow EY_{n,SGV} = 0{,}19\,min$), *wodurch sich dessen modellzugabhängige behinderungsbedingte Wartezeit zu* $ET_{w,SGV} \approx 0{,}69\,min + 0{,}19\,min = 0{,}88\,min$ *berechnet.*

2.3 Ansatz zur Bestimmung einer Zugmeldestellen-Nennleistung

Definition der Nennleistung nach Schwanhäußer

Für die Bewertung von Wartezeiten in analytischen Berechnungen wird eine sog. zulässige Summe der außerplanmäßigen Wartezeiten vor einer Strecke/vor einem Teilfahrstraßenknoten wie folgt definiert [5]:

$$zul\sum t_{w,a} = q_Q \cdot 0{,}260e^{-1{,}3p_{Rz}}t_U\frac{1}{\varphi}$$

Dabei ist t_U der Untersuchungszeitraum in Minuten, p_{Rz} der Reisezuganteil, φ die Verkettungszahl des Fahrstraßenknotens und q_Q der Qualitätsfaktor. Dieser erlaubt eine qualitative Einordnung mittels folgender Bewertungsskala:

Tabelle 1: Qualitätsfaktor nach [1]

Lage des Qualitätsfaktors	Qualitative Bewertung des Betriebs

$q_Q < 0{,}5$	Premiumqualität/Besser als erforderlich
$0{,}5 \leq q_Q \leq 1{,}2$	Wirtschaftlich optimal (Nennleistung bei $q_Q = 1$)
$1{,}2 < q_Q \leq 1{,}5$	Risikobehaftet
$1{,}5 < q_Q$	Mangelhaft

Prämissen für die Anwendung der Nennleistung für Zugmeldestellen

Die betrachtete Zugmeldestelle bestehe aus den Gleisen $g = 1, \dots, N$. Auf Gleis g verkehren die Modellzüge $i = 1, \dots, n_g$ mit den behinderungsbedingten Wartezeiten $ET_{w_{g,i}}$ und Belastung $\lambda_{g,i}$.

Die Bestimmung der Verkettungszahl φ der Zugmeldestelle erfolgt, wie üblich, über die Ausschlussmatrix A mit den Einträgen $\left(a_{(g_1,i_1),(g_2,i_2)}\right)$, welche beschreibt, ob sich Fahrten des Zugfolgefalls $(g_1, i_1) \rightarrow (g_2, i_2)$ gegenseitig ausschließen. Dabei werden für diese Anwendung (im Gegensatz zur üblichen Definition der Ausschlussmatrix) zwei Fahrten nur dann als ausschließend gekennzeichnet, wenn die zugehörigen Fahrwege

- über dasselbe Gleis der Zugmeldestelle führen oder
- falls sie nicht über dasselbe Gleis der Zugmeldestelle führen, sich in mindestens einem Fahrstraßenknoten kreuzen, aber anschließend nicht in dasselbe Streckengleis führen.

Diese Definition greift den Gedanken des vorhergehenden Abschnitts auf, nur solche Ausschlüsse in die Berechnung einzubeziehen, die nicht bereits durch die Verkettung auf der angrenzenden Strecke abgebildet sind.

Die tatsächliche Summe der behinderungsbedingten Wartezeiten in der Zugmeldestelle innerhalb des Zeitraums t_U beträgt:

$$\sum t_{w,a} = \sum_{g=1}^{N} \sum_{i=1}^{n_g} ET_{w_{g,i}} t_U \lambda_{g,i} = t_U \sum_{g=1}^{N} \sum_{i=1}^{n_g} ET_{w_{g,i}} \lambda_{g,i}$$

Für den Qualitätsfaktor der Zugmeldestelle erhält man damit:

$$q_Q = \frac{t_U \sum_{g=1}^{N} \sum_{i=1}^{n_g} ET_{w_{g,i}} \lambda_{g,i}}{0{,}260 e^{-1{,}3 p_{Rz}} t_U \frac{1}{\varphi}} = \varphi \frac{\sum_{g=1}^{N} \sum_{i=1}^{n_g} ET_{w_{g,i}} \lambda_{g,i}}{0{,}260 e^{-1{,}3 p_{Rz}}}$$

Beispiel: Für das Beispiel erhält man mit einer Verkettungszahl $\varphi = 0{,}57$ und einem Reisezuganteil $p_{R_Z} = 0{,}92$ einen Qualitätsfaktor von $q_Q = 0{,}87$. Die Belastung liegt also noch etwas unter der Zugmeldestellen-Nennleistung, die bei $q_Q = 1{,}00$ erreicht wird. Die Berechnung des Qualitätsfaktors ist in Anlehnung an das von Schwanhäußer entwickelte Verfahren [5] entstanden und legt den für Strecken ermittelten Faktor von 0,260 zu Grunde, der für Zugmeldestellen ggf. noch angepasst werden muss.

3 Fazit und Ausblick

Der hier vorgestellte Ansatz zur Berechnung der behinderungsbedingten Wartezeiten innerhalb einer Zugmeldestelle berücksichtigt durch deren ganzheitliche Betrachtung sowohl die gegebenen Besonderheiten der Zugmeldestellen sowie der gegenseitigen Abhängigkeiten zwischen Gleisgruppen und Fahrstraßenknoten. Letztere sind bei der in bisherigen Modellen getrennten Betrachtung beider Bereiche nur bedingt erfassbar.

Unter Anwendung der bereits etablierten STRELE-Formel sowie des hier beschriebenen Verfahrens stehen behinderungsbedingte Wartezeiten als Kenngröße der Leistungsfähigkeit sowohl für Zugmeldestellen als auch diese verbindenden Streckenabschnitte zur Verfügung. Basierend auf dieser einheitlichen Grundlage wird eine zusammenhängende Betrachtung auch von größeren Netzbereichen und insbesondere der in diesen herrschenden Abhängigkeiten möglich. Hierzu wird der vorgestellte Ansatz um einen speziellen Propagationsalgorithmus [11] erweitert, dessen Ziel es ist, gegenseitige Einflüsse benachbarter Infrastrukturelemente direkt über die Fortschreibung der berechneten Kenngrößen zu berücksichtigen. Die auftretenden behinderungsbedingten Wartezeiten beeinflussen die Betriebsqualität der Modellzüge nicht nur im betrachteten Netzelement, sondern auch im weiteren Fahrtverlauf. Anstatt in den benachbarten Netzelementen Standardwerte für die Eingangsgrößen zu verwenden, kann die prognostizierte Betriebsqualität bei der Leistungsbestimmung zu Grunde gelegt und so das Zusammenwirken der Netzelemente hinreichend beschrieben werden.

Der Ansatz berücksichtigt keine dispositiven Gleisverlegungen in Bahnhöfen. Dies ist zum einen durch die langfristige Perspektive nicht gewollt – es soll ein gegebenes grobes Betriebsprogramm bewertet und kein dynamisches Betriebsgeschehen simuliert werden. Ein Wechsel des Zielgleises führt in der Regel zu veränderten Behinderungen in den Fahrstraßenknoten bei der Ein- und Ausfahrt, dies ist durch die verwendete Bedienungstheorie nicht direkt abbildbar und wird angesichts der deutlichen Vorteile des

Ansatzes als nachrangig eingestuft. Zum einen kann jedoch auf Basis der errechneten Nennleistung eine Vorauswahl für mit anderen Verfahren näher zu untersuchender Betriebsstellen stattfinden, zum anderen gäbe es im Rahmen einer automatisierten Bewertung die Möglichkeit, weniger belastete Alternativgleise vorzuschlagen, sodass auch die vergleichende Bewertung eines im Verfahren optimierten Betriebsprogramms möglich ist.

Neben dem Propagationsalgorithmus ist auch im Bereich der Zugmeldestellen-Nennleistung weitere Forschungsarbeit notwendig, u. a. die bereits erwähnte Kalibrierung. In diesem Zusammenhang ist auch die Vergleichbarkeit dieser mit der für Strecken definierten Nennleistung zu bewerten. Auch die Anwendung des Ansatzes zur Bewertung größerer Netzbereiche ist noch Gegenstand weiterer Untersuchungen.

Literatur

[1] B. Kogel: *Leistungsfähigkeit von Eisenbahnstrecken unter Berücksichtigung der Anzahl an Überholungsgleisen und von Mindestabständen für betriebliche Kreuzungen*, Dissertation, RWTH Aachen, 2021

[2] W. Schwanhäußer: *Die Bemessung der Pufferzeiten im Fahrplangefüge der Eisenbahn*, Dissertation, Schriftenreihe des Verkehrswissenschaftlichen Instituts der RWTH Aachen, Heft 20, 1974

[3] K. Fischer, G. Hertel: *Bedienungsprozesse im Transportwesen. Grundlagen und Anwendungen der Bedienungstheorie*, Transpress-Verlagsgesellschaft mbH, Berlin, 1990

[4] L. Mussone, R. Wolfler Calvo: *An analytical approach to calculate the capacity of a railway system*, European Journal of Operational Research 228, Ausgabe 1, S. 11 - 23, Juli 2013

[5] DB Netz AG (Hrsg.): *Richtlinie 405 – Fahrwegkapazität*, Berlin, 2008

[6] J. Pachl: *Systemtechnik des Schienenverkehrs: Bahnbetrieb planen, steuern und sichern*, 11. Aufl., Verlag Springer Vieweg 2022.

[7] N. Weik, N. Niebel, N. Nießen: *Capacity analysis of railway lines in Germany e A rigorous discussion of the queueing based approach*, Journal of Rail Transport Planning & Management 6, S. 99-115, Elsevier, Amsterdam 2016

[8] W. Schwanhäußer: *Die Ermittlung der Leistungsfähigkeit von großen Fahrstraßenknoten und von Teilen des Eisenbahnnetzes*, Archiv für Eisenbahntechnik 33, S. 7 - 18, Hestra-Verl., Darmstadt, 1978

[9] T. Gudehus: *Staueffekte vor Transportknoten*, Zeitschrift für Operations Research, 20 (6): B207–B252, Physica, Heidelberg, 1976

[10] G. Potthoff: *Verkehrsströmungslehre*, Transpress, VEB Verlag für Verkehrswesen, Bd. 1, Berlin, 1964

[11] A. Fink, F. Hantsch, U. Martin, S. Schmidhäuser, M. Fietze: *Verfahren zur Leistungsuntersuchung von Knoten unter Berücksichtigung der Einflüsse aus dem umgebenden Netz*, ETR – Eisenbahntechnische Rundschau, 72. Jahrgang, Ausgabe 5, S. 18 – 22, DVV Media Group GmbH, Hamburg, 2023

Autoren

Institut für Eisenbahn- und Verkehrswesen, Universität Stuttgart

Pfaffenwaldring 7, 70569 Stuttgart

M.Sc. Fink, Alexander

Alexander Fink ist seit 2022 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Eisenbahn- und Verkehrswesen der Universität Stuttgart (IEV). Er hat Verkehrsingenieurwesen an der Universität Stuttgart und der Technischen Universität Berlin studiert und beschäftigt sich am IEV mit Kapazitätsbewertung im Schienenverkehr und Eisenbahnsicherungstechnik.

alexander.fink@ievvwi.uni-stuttgart.de

Dr. rer. nat. Hantsch, Fabian

Fabian Hantsch ist seit 2012 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Eisenbahn- und Verkehrswesen der Universität Stuttgart (IEV) und akademischer Oberrat. Nach einem Studium und Promotion am Fachbereich Mathematik der Universität Stuttgart beschäftigt er sich am IEV u.a. mit Leistungsuntersuchungen im spurgeführten Verkehr und kundenbezogener Pünktlichkeit.

fabian.hantsch@ievvwi.uni-stuttgart.de

Prof. Dr.-Ing. Martin, Ullrich

Prof. Dr.-Ing. Ullrich Martin ist seit 2001 Direktor des Instituts für Eisenbahn- und Verkehrswesen der Universität Stuttgart (IEV) sowie Direktor des Verkehrswissenschaftlichen Instituts an der Universität Stuttgart. Die verkehrsträgerübergreifende Verkehrssystemgestaltung mit dem Fokus auf den spurgeführten und öffentlichen Verkehr sowie die Prozesssteuerung in Verkehrssystemen bilden die Grundlage für seine inhaltlichen Schwerpunkte, die im Bereich Bewertungsverfahren, Prozessregelung und Disposition, Leistungsuntersuchungen und Betriebsverfahren liegen.

ullrich.martin@ievvwi.uni-stuttgart.de

Dipl.-Inf. Stefan Schmidhäuser

Stefan Schmidhäuser ist seit 2017 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Eisenbahn- und Verkehrswesen der Universität Stuttgart (IEV). Zuvor war er bei der Verkehrswissenschaftlichen Institut Stuttgart GmbH tätig. Stefan Schmidhäuser hat Informatik an der Universität Stuttgart studiert und beschäftigt sich derzeit am IEV mit den Bereichen Verkehrssicherung und Kapazitätsbewertung.

stefan.schmidhaeuser@ievvwi.uni-stuttgart.de

Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung beim Eisenbahn-Bundesamt (DZSF)

August-Bebel-Str. 10, 01219 Dresden

Mario Fietze

Mario Fietze studierte Physik und Verkehrswissenschaften an der TU-Dresden. Er bearbeitet als Forschungsreferent beim Deutschen Zentrum für Schienenverkehrsforschung Fragen zu den Themen Bahnenergieversorgung, Leit- und Sicherungstechnik sowie zur Kapazität des Schienennetzes.

fietzem@dzsf.bund.de

Session 11
Jonathan Hecht, Janecek David

Erweiterte Ansätze zur Ermittlung der Mehrbelastung auf Umleiterstrecken für die netzweite Präventionsplanung unter Verwendung der Infrastrukturnutzung

Hecht, Jonathan[1], David, Janecek[1]

[1]VIA Consulting & Development GmbH, Römerstr. 50, 52064 Aachen,
E-Mail: {j.hecht, d.janecek}@via-con.de

Zusammenfassung

Durch die aktuelle und zukünftig steigende Anzahl an großräumigen Sperrungen zum Ausbau und Optimierung des Schienennetzes werden umliegende Strecken ungewöhnlich stark mehrbelastet. Diese Mehrbelastung der Umleiterstrecken erfordert eine angepasste, zielgerichtete und vor allem frühzeitige Präventionsplanung und -strategie, sodass die Robustheit dieser Umleiterstrecken weiterhin gewährleistet werden kann.

Zur Ermittlung geeigneter präventiver Maßnahmen müssen zuerst der umgeleitete Mehrverkehr skizziert werden, falls dieser nicht aus externen Quellen bereits zur Verfügung steht. Darauf aufbauend können anschließend die resultierenden Differenzen der Infrastrukturbelastung im Vergleich zum Ist-Zustand identifiziert werden.

Im Fall bereits vorhandenen Mehrverkehrsströme von externen Quellen kann mit Hilfe von „Modellzügen“ in LUKS® der angedachte Fahrplan effizient auf das Netz ausgerollt werden. Mindestvoraussetzung an die Daten ist dabei, dass diese einen Laufweg sowie die Anzahl (und idealerweise die Art) an Mehrverkehren vorgeben. Diese Art der Modellierung ermöglicht eine einfache Handhabung der zu generierenden Mehrverkehre entlang der Umleiterstrecken, befindet sich bereits in konkreter Anwendung und soll in diesem Artikel anhand erster Erfahrungen konzeptionell erweitert und diskutiert werden.

Bei einer noch abstrakten und nicht im Detail einzuschätzenden Situation des Mehrverkehrs bzw. noch fehlenden Planung kann ein angepasster Prozess angewendet werden. Allein auf Grundlage von Infrastruktur- und Fahrpandaten sowie den vorgesehenen Sperrungen kann mit Hilfe des Moduls OptDis der Software LUKS® (Leistungsuntersuchungen von Knoten und Strecken) ein konzeptioneller Fahrplan erarbeitet werden, welcher in seiner ersten Ausprägung einen Teil des Netzes sperrt und betroffene Züge automatisch auf umliegenden Strecken verteilt.

Der so berechnete und angepasste „Umleitungs"-Fahrplan dient als Ausgangspunkt für die Berechnung der Infrastrukturnutzung in LUKS®. Diese liefert auf Basis von betrieblichen Fahrplan- und Infrastrukturdaten eine Vielzahl an Kennzahlen [1], welche zur Bewertung der Betriebswichtigkeit einzelner Infrastrukturelemente herangezogen werden können, und von welchen eine geeignete Präventionsstrategie abgeleitet werden kann. Die ergänzende Gegenüberstellung der Ist- und Umleitungs-Belastungen der einzelnen Infrastrukturelemente ergibt letztendlich eine angepasste Präventionsstrategie für den Umleiterfall.

Eine Automatisierung der beiden Varianten stellt den logischen Folgeschritt im Prozess dar. Mit Hilfe von Skriptdateien ist ein geeignetes Format zur Festlegung des zu sperrenden Infrastrukturbereichs zu definieren, die Berücksichtigung der Mehrverkehre einzubinden und Parameter zur Berücksichtigung der Mehrverkehre festzulegen. So wäre es dann zukünftig denkbar, vollautomatisch bei lediglich vorliegenden betriebliche Fahrplan- und Infrastrukturdaten sowie Sperrungsinformationen eine „Mehrbelastungs"-Ebene auf die einzelnen Infrastrukturelemente zu legen und detailliert Differenzen in den berechneten Kennzahlen aufzuzeigen.

Keywords: Präventive Instandhaltung, Umleiter, Infrastrukturnutzung, Life-Cycle-Management, eisenbahnbetriebswissenschaftliche Untersuchungen, EBWU, LUKS, OptDis

1 Einleitung

Eisenbahninfrastrukturen stellen komplexe Netze dar, die kontinuierlich und im laufenden Betrieb verändert und gewartet werden. In vielen Fällen gehen Infrastrukturmaßnamen mit Sperrungen einzelner Bereiche des Netzes einher, welche wiederum die umgebenden Bereiche beeinflussen. Wird ein Teil des Schienennetzes für einen längeren Zeitraum großräumig gesperrt, so hat dies zur Konsequenz, dass Zugfahrten entfallen oder umliegende Strecken diesen Mehrverkehr aufnehmen müssen. Bei der Planung von beispielsweise Baumaßnahmen sind entsprechende Umleiter zu berücksichtigen und die jeweiligen Fahrpläne anzupassen. Für die jeweilige Infrastruktur bedeuten diese zusätzlichen Zugfahrten eine Mehrbelastung. Ist die betroffene

Infrastruktur nicht präventiv auf diese Mehrbelastung vorbereitet und es kommt zu Ausfällen wie beispielsweise dem Defekt einer Weiche, ist mit Störungen und Ausfälle im umgebenden Netzbereich zu rechnen, die großräumig den Betrieb beeinträchtigen können

Dieser Artikel beschreibt zwei Ansätze, um eine angepasste und zielgerichtete Präventionsplanung im Sperrungsfall zu unterstützen und somit die Robustheit der Infrastruktur zu verbessern. Der erste Ansatz basiert auf extern bereitgestellten Mengengerüsten von Umleiterverkehren. In einer prototypischen Anwendung wurden die externen Daten einer großflächigen Sperrung analysiert, die resultierenden Umleiter in LUKS® modelliert und zugehörige Kennzahlen berechnet. Die Ergebnisse ermöglichten einen Vergleich der Ist- und Sperrungs-Belastung und somit eine Anpassung der Präventionsplanung.

Als zweiter Ansatz wird in diesem Artikel eine Erweiterung des bisher angewendeten Verfahrens skizziert: diese beinhaltet die automatische Berechnung des Mehrverkehrs in LUKS® (Leistungsuntersuchungen von Knoten und Strecken) im Moduls OptDis [2], sodass die Abhängigkeit zu einer externen Quelle entfällt und somit eine vollständige Automatisierung des Prozesses bei vorhandenen Eingangsdaten möglich wird. Beide Ansätze sind in Abbildung 1 dargestellt:

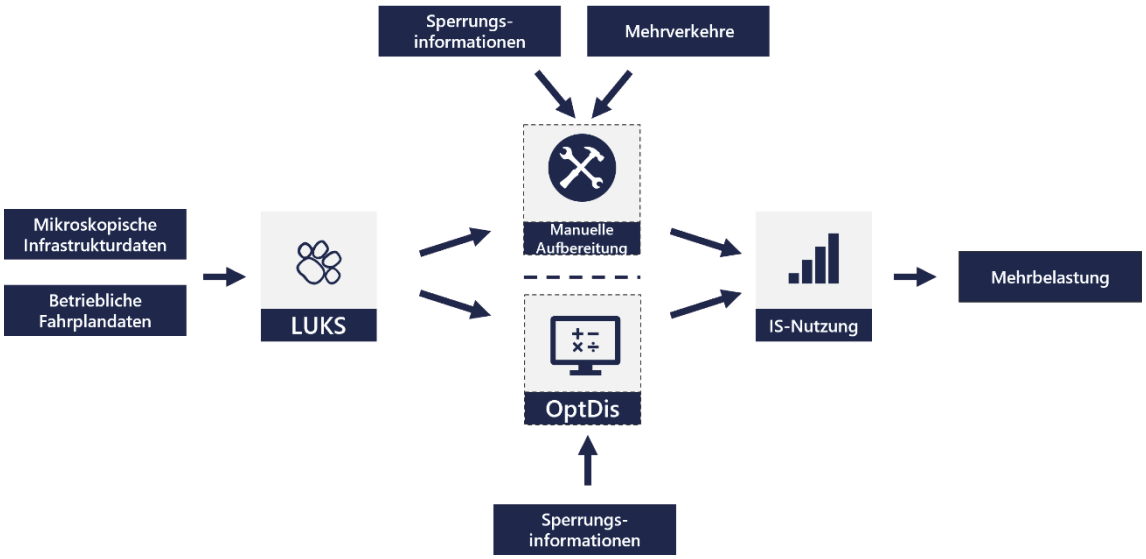


Abbildung 1: Gesamtprozess zur Berechnung der Mehrbelastung

2 Eingangsdaten

Die beiden vorzustellenden Verfahren nutzen weitestgehend die gleichen Eingangsdaten: Die Basis stellen die mikroskopischen Infrastrukturdaten dar, welche über

unterschiedliche Importschnittstellen (beispielsweise im Format XML-ISS- oder railML Infrastructure) importiert werden können. Für einen korrekten Vergleich der Belastung im Ist- und im Sperrungsfall ist zu beachten, dass in beiden Situationen die gleichen Infrastrukturdaten zu Grunde liegen, welche sich idealerweise nur durch gesperrte Abschnitte unterscheiden.

Aufbauend auf der Infrastruktur sind passfähige Fahrplandaten erforderlich, welche unter anderem in den Formaten XML-KSS oder railML Timetable importiert werden können. Diese beiden Datensätze ermöglichen bereits die Ermittlung der momentanen Ist-Belastung der Infrastruktur.

Zur Berechnung der Sperrungs-Belastung sind die gesperrten Abschnitte sowie ggf. Informationen zu den erwarteten Mehrverkehren notwendig. Der bislang umgesetzte Ansatz mit externen Datenquellen basiert auf einer verhältnismäßig einfachen Liste von erhöhten Zugzahlen auf einzelnen Infrastrukturabschnitten. Diese muss daneben Laufwege sowie eine Aufteilung in Personen- und Güterverkehr der Umleiterstrecken enthalten, um diese später entsprechend sinnvoll in LUKS® modellieren zu können. Um die Ergebnisqualität zu erhöhen, sollten auch Parameter wie Triebfahrzeuge, Längen und Massen bereitgestellt werden.

Wird unter Nutzung des zweiten Ansatzes hingegen der Mehrverkehr in LUKS® über das Modul OptDis berechnet, entfallen alle diese Angaben, da konkrete Zugfahrten des Ist-Fahrplan auf Basis der Sperrungsangaben umgeroutet werden.

3 Ermittlung des Mehrverkehrs auf Umleiterstrecken

Bevor die beiden Verfahren zur Ermittlung des Mehrverkehrs dargestellt werden, wird als Beispiel ein Infrastrukturnetz mit unterstellten Zugfahrten zur Illustration eingeführt.

3.1 Einführung eines Beispielnetzes

Zur Illustration der Verfahren wird das folgende abstrakte Beispielnetz genutzt, in dem eine Sperrung eine Mehrbelastung der Umleiterstrecken verursacht. Das Beispielnetz ohne eine Sperrung ist in Abbildung 2 zu sehen. Dabei entspricht jede farbliche Linie einem Laufweg und jeder dunkelblaue Knoten einer Betriebsstelle. Zur Vereinfachung wird angenommen, dass alle Laufwege von links nach rechts verlaufen.

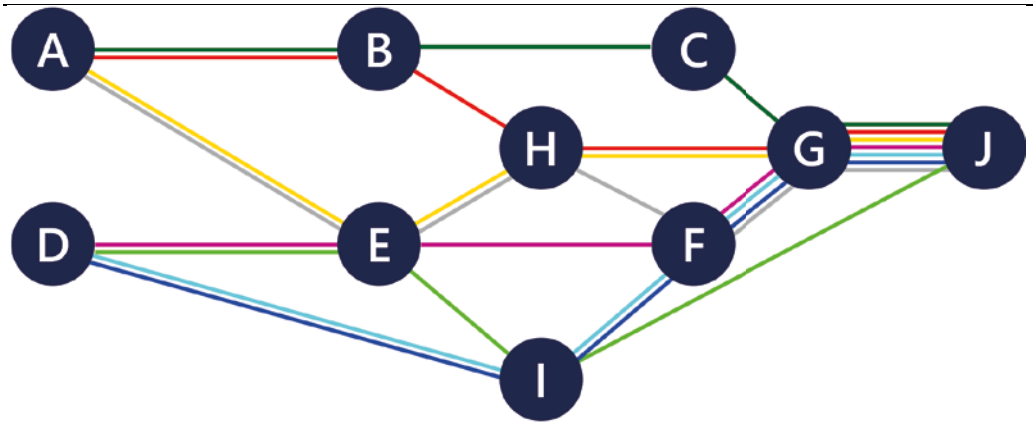


Abbildung 2: Beispielnetzen mit farblich gekennzeichneten Laufwegen ohne Sperrung

Die einzelnen Laufwege und deren Farben sind in Tabelle 1 aufgelistet: der grüne Zug 1 aus der Tabelle fährt von Betriebsstelle A über Betriebsstelle B, C und G bis zur Zielbetriebsstelle J.

Tabelle 1: Laufwege und deren farbliche Codierung

Zug#	Laufweg
1	A,B,C,G,J
2	A,B,H,G,J
3	A,E,H,G,J
4	D,E,F,G,J
5	D,E,I,J
6	D,I,F,G,J
7	D,I,F,G,J
8	A,E,H,F,G,J

Die Strecke, welche zwischen den Betriebsstellen D, E, H und G verläuft, wird nun großräumig gesperrt (siehe Abbildung 3). Dies führt dazu, dass nicht mehr alle Zugfahrten ihren ursprünglich geplanten Laufweg verwenden können und umgeroutet werden müssen. Die nicht mehr fahrbaren Passagen des Laufweges sind entsprechend gestrichelt gekennzeichnet.

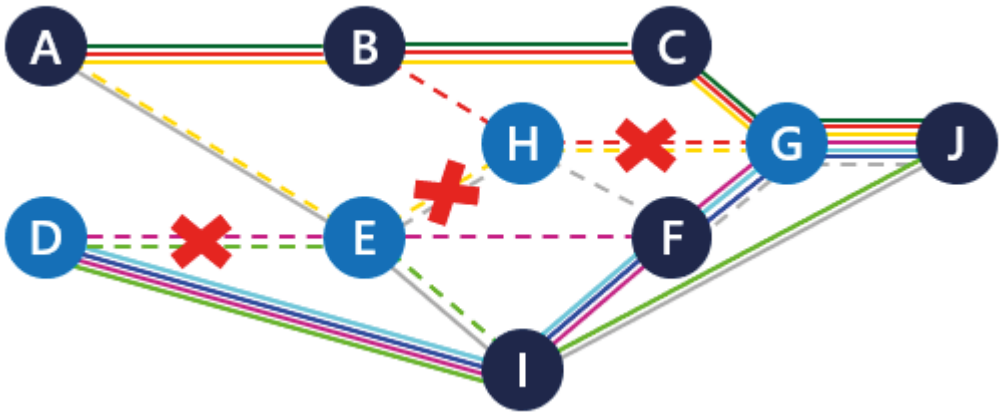


Abbildung 3: Sperrung entlang der Strecke zwischen D, E, H und G führt zu umgeleiteten Laufwegen

Die beispielhaften Umleitungen der Laufwege sind in Tabelle 2 beschrieben. Zur Vereinfachung der Illustration ist die einzige Bedingung für die Umleitung, dass der Zug weiterhin von seiner Startbetriebsstelle zu seiner Endbetriebsstelle gelangt.

Zug 2, rot dargestellt, ist auf den Abschnitten B-H und H-G von der Sperrung betroffen, sodass dieser umgeleitet werden muss. Eine mögliche Umleitung ist die Abfolge A, B, C, G und J, was in der Abbildung durch die durchgängige rote Linie dargestellt ist. Somit entfällt aufgrund der Sperrung der Teillaufweg B, H, G.

Tabelle 2: Laufwege und mögliche Umleitungen

Zug#	Laufweg	Umleitung
1	A,B,C,G,J	-
2	A,B,H,G,J	A,B,C,G,J
3	A,E,H,G,J	A,B,C,G,J
4	D,E,F,G,J	D,I,F,G,J
5	D,E,I,J	D,I,J
6	D,I,F,G,J	-
7	D,I,F,G,J	-
8	A,E,H,F,G,J	A,E,I,J

3.2 Daten zum Mehrverkehr aus externer Quelle

Die initiale Analyse von Umleitern und resultierenden Mehrbelastungen und die damit einhergehende prototypische Anwendung basierte auf einfachen Daten einer externen Quelle. Neben der Liste der gesperrten Abschnitte wurde lediglich abschnittsweise aufgelistet, welche Erhöhung der Zuganzahl als Mehrverkehr auf der jeweiligen Infrastruktur zu erwarten ist. Für eine mikroskopische, elementgenaue Analyse mussten diese Daten manuell aufbereitet werden, um zuverlässig als Eingangsdaten dienen zu können:

- Die genauen Laufwege, welche die Züge im Falle der Sperrung über die mikroskopische Infrastruktur nehmen, sind in dem Mengengerüst der Mehrverkehre nicht gegeben. Daher wurden Algorithmen entwickelt, um aus den lückenhaften Betriebsstellenreihungen passende mikroskopische Fahrwege abzuleiten, welche die gelisteten Betriebsstellen durchqueren und damit die mikroskopische Zugfahrt in LUKS® analog den externen Daten widerspiegelt. Auch wenn ein Großteil der Aufbereitung mit Heuristiken und Algorithmen bearbeitet werden kann, ist eine nachfolgende Überprüfung der Passfähigkeit erforderlich.
- Die verfügbaren Daten enthielten weiterhin keine Angaben zur Verteilung zwischen Güter- und Personenverkehr. Hier wurden zur Weiterverarbeitung Annahmen getroffen, welche gemeinsam mit Anwendern abgestimmt wurden.
- Nicht zu unterschätzen ist der Abstimmungsaufwand, insbesondere wenn Rückfragen zu den Mengengerüsten und unterstellten Annahmen aufkommen. Weiterhin hat dieser Ansatz den Nachteil, dass eine kurzfristige Umplanung nicht integriert möglich ist und extern mit entsprechendem Vorlauf und Aufwand erfolgen muss.

In der prototypischen Umsetzung wurde folgender (automatischer) Prozess etabliert, um die Daten entsprechend in die mikroskopische LUKS®-Welt zu transformieren:

1. Analyse der Abschnittsangaben zu Mehrverkehren und Festlegung von Linien, die diese Verkehre abbilden.
2. Definition von sogenannten Modellzüge entlang der Linien als Zugfahrten ohne feste Abfahrtszeiten, die als Rohling für konkrete Einzelzugfahrten dienen. Der Modellzug übernimmt die mit dem Kunden abgestimmten Werte bezüglich Triebfahrzeug, Länge und Masse.

3. Der mikroskopische Laufweg, quasi eine Abfolge von Fahrwegen, wird aus der makroskopischen Definition der Mehrverkehrsdaten gebildet: Der grüne Zug 1 sei in den Eingangsdaten als Abfolge A, C, J gegeben. Aus diesen Angaben wird der detaillierte Laufweg A, B, C, G, J gebildet und anschließend seine Fahrbarkeit geprüft. Es kann hier allerdings schnell zu Ungenauigkeiten kommen, wenn es trotz weiterer Angaben wie einer zu befahrenden Streckennummer mehrere Möglichkeiten gibt, die gegebene Betriebsstellenreihung mikroskopisch zu durchqueren.

   Zur Bildung des detaillierten Laufweges nutzt LUKS® die im Datenmodell vorhandenen Fahrwege mit ihren unterschiedlichen Prioritäten und bevorzugt beim implementierten automatischen Routing Fahrwege mit höherer Priorität, welche regulär über das jeweilige Hauptgleis verkehren. Um diese Annahme des Verfahrens abzumildern und eine realistischere Nutzung der Infrastruktur abzubilden, wurde in der prototypischen Umsetzung ergänzt, dass 20 % der Zugfahrten Nebengleise mit geringerer Priorität verwenden und 80 % entsprechend über das Hauptgleis fahren.
4. Nach der algorithmischen Wahl der konkreten Laufwege der Modellzüge auf Basis der extern bereitgestellten Mehrverkehre muss die Infrastruktur entlang des Laufwegs auf ihre Eignung überprüft werden. In diesem Schritt wird sichergestellt, dass beispielsweise das gewählte Halteregime erfüllt werden kann (es müssen passfähige Halteplatz-Elemente im Modell vorhanden sein) oder die entsprechenden Bereiche der Infrastruktur elektrifiziert sind. Die notwendigen Anpassungen an den Eingangsdaten erfolgen automatisiert.
5. Als letzter Schritt werden für jeden Modellzug die von ihm gemäß Mehrverkehrsdaten repräsentierten einzelnen Zugfahrten erstellt. Der daraus resultierende Fahrplan wird nicht weiter auf Fahrbarkeit und damit auf die zeitliche Lage überprüft, da dies bei externer Quelle als korrekt unterstellt wird, d.h. die angegebene Menge von Mehrverkehr über die entsprechenden Laufwegen gelten als fahrbar.

3.3 Automatische Ermittlung des Mehrverkehrs mit OptDis

Der bislang realisierte Ansatz umfasst einzelne manuelle Arbeitsschritte in LUKS® und hängt maßgeblich von externen Datenquellen ab, deren Bereitstellung ebenfalls mit Aufwand verbunden ist. Daher wird in diesem Abschnitt die naheliegende Kombination der beiden LUKS-Module zur Infrastrukturnutzung und OptDis als Weiterentwicklung

des Ansatzes vorgestellt. Die Weiterentwicklung basiert auf der direkten Bestimmung des Mehrverkehrs im Modul OptDis von LUKS® und nutzt lediglich Fahrplandaten und Informationen zu Sperrungen.

Das Modul OptDis ergänzt LUKS® um Funktionen zur globalen Optimierung eines beliebigen Fahrplans. Es unterstützt den Anwender bei der zeitaufwändigen manuellen Erstellung von mikroskopischen Fahrplänen, indem die folgenden Funktionen vollautomatisch durchgeführt werden können: Auflösung vorhandener Belegungskonflikte, Erfüllung von Taktzeiten und Anschlüssen sowie Maximierung von Pufferzeiten und Fahrzeitreserven. OptDis ist vollständig in LUKS® integriert, d.h. alle Eingabedaten und die Ergebnisse der Optimierung können mit den bekannten Editoren bearbeitet und nachgenutzt werden.

Um aus dem importierten Ist-Fahrplan und den zu untersuchenden Sperrungen den abgeleiteten Umleitungs-Fahrplan zu erstellen, sind die Sperrungen lediglich zu importieren und anschließend eine vollautomatische Fahrplankonstruktion durch OptDis zu erstellen, welche diese Sperrungen im Fahrplan berücksichtigt und Zugfahrten bei Bedarf umroutet. Das Ergebnis dieser Berechnung ist immer ein mikroskopisch konfliktfreier Fahrplan, so dass eine Fahrbarkeit unterstellt werden kann.

Der Vergleich des erstellten mit dem importierten Fahrplan ergibt direkt die Mehrbelastung auf einzelnen Abschnitten und liefert im gleichen Arbeitsschritt die umgerouteten Zugfahrten; die im anderen Ansatz notwendige Modellierung und Validierung von Modellzügen entfällt. Des Weiteren sind nachträgliche Änderungen etwa an der Sperrung selbst oder dem Betriebsprogramm einfach möglich, da diese direkt eingepflegt werden können, ohne auf externe Prozesse angewiesen zu sein. Es ist allerdings zu beachten, dass der automatisch erstellte Fahrplan ggf. durch geeignete Parameterwahl in OptDis mit dem gewünschten Betriebskonzept abzugleichen ist.

4 Mehrbelastung der Umleiterstrecken

In Abschnitt 4.1 werden die bisherigen Berechnungen der Mehrbelastung vorgestellt, inklusive einem kurzen Überblick über den allgemeinen Umfang und Aufbau der Infrastrukturnutzung und deren Kennzahlen. Im darauffolgenden Abschnitt wird die Automatisierung des Gesamtprozesses als Ausblick skizziert.

4.1 Berechnung der Mehrbelastung

Die Mehrbelastung der Infrastruktur wird im Modul Infrastrukturnutzung in LUKS® berechnet: das Modul ermöglicht die Bestimmung von Kennzahlen für die netzweite Präventionsplanung in verschiedenen Dimensionen, etwa für Weichenknoten oder im generischen Ansatz anlagenscharf und mit Richtungsbezug für alle Gewerke, wie in [1] vorgestellt.

Für die Bestimmung der Mehrbelastung werden die Kennzahlen „Summe Masse“ und „Anzahl Züge“ einzelner Infrastrukturelemente ausgewertet. Dabei ergibt sich die Mehrbelastung aus dem Abgleich zwischen der Ist-Belastung und der Belastung im Sperrungsfall.

Aus Abbildung 2 ergeben sich damit folgende hypothetische Anzahlen an Zügen für das Beispielnetz ohne Sperrung:

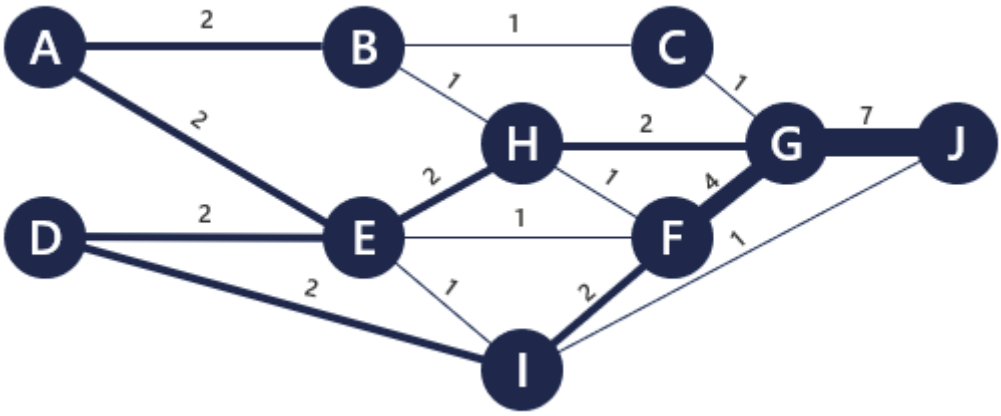


Abbildung 4: Belastung (Anzahl Züge) der Infrastruktur für das Beispielnetz ohne Sperrung

Wenn nun wie in Abbildung 3 bzw. Tabelle 2 die definierten Umleitungen aufgrund der Sperrungen vorgenommen werden, so verändern sich die Belastungen der Infrastruktur. Wie in Abbildung 5 zu sehen, werden die umliegenden Strecken stärker belastet und einzelne Abschnitte aufgrund der Sperrung nicht mehr oder weniger stark belastet: so fahren zwischen B und C nun statt einem Zug etwa drei Züge.

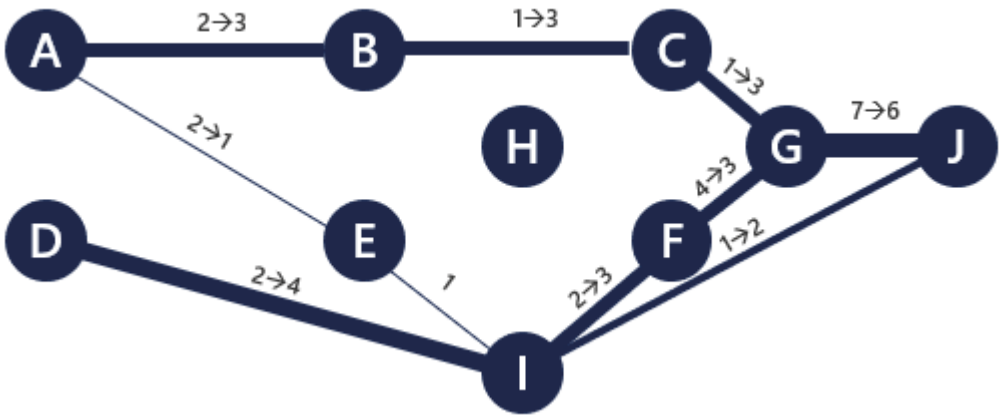


Abbildung 5: Veränderung der Belastung (Anzahl Züge) für das Beispielnetz im Falle der Sperrung

Die Ausgabe der Infrastrukturnutzung in LUKS® wiederum umfasst Kennzahlen zu allen Infrastrukturelementen zwischen Betriebsstelle B und C. So werden beispielsweise für ein in steigender Richtung geltendes Hauptsignal für die Kennzahl „Anzahl Züge“ im Ist-Fall der Wert „eins“ und im Sperrungsfall der Wert „drei“ ausgegeben. Analog verändert sich die Kennzahl „Summe Masse“, die im Beispiel nicht explizit aufgeführt ist, jedoch für die nachfolgende Präventionsplanung relevant ist, aus der Masse aller Triebfahrzeuge, die über dieses spezifische Infrastrukturelement fahren.

Erstellt man nun aus diesen beiden Abbildungen ein Differenzbild, ergibt sich die Mehrbelastung der einzelnen Strecken (siehe Abbildung 6). Analog resultiert die Mehrbelastung der Infrastruktur aus der Differenz der beiden Kennzahlberechnungen des Moduls Infrastrukturnutzung.

Diese Mehrbelastung kann zu einer angepassten Präventionsplanung und -strategie für die betrachteten Umleiterstrecken führen, um auf die veränderten Nutzungen einzelner Gewerke rechtzeitig reagieren zu können.

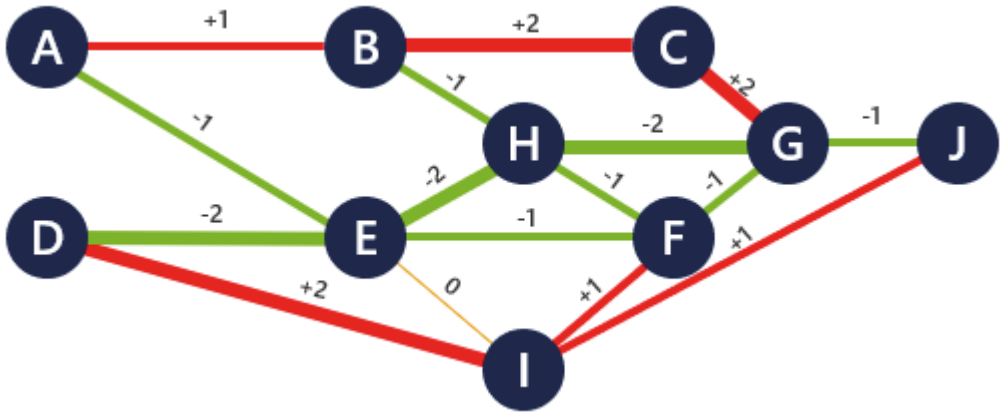


Abbildung 6: Differenz der Belastungen ohne Sperrung und mit Sperrung

4.2 Automatisierung des Gesamtprozess

Nach weiteren Validierungen der vorgestellten Ansätze wird die Automatisierung des Gesamtprozesses ohne manuelle Vor- oder Nachbereitung der Daten angestrebt. LUKS® verfügt bereits jetzt über die Möglichkeit automatisiert Importe und Infrastrukturnutzungsberechnungen über eine Skriptdatei durchzuführen und zu exportieren. Die in den vorherigen Abschnitten vorgestellten Ansätze benötigen aktuell jedoch noch manuelle Nachbearbeitungen, welche zukünftig automatisch durchgeführt werden sollen. Hierbei ist insbesondere der Vergleich der Ist- und Sperrungs-Belastung sowie nachgelagerte Formen der Darstellung zu nennen.

5 Fazit und Ausblick

Mit dem vorgestellten Verfahren lassen sich bereits Mehrbelastungen der Infrastruktur bei großräumigen Sperrungen berechnen, welche eine bessere, zielgerichtete Präventionsplanung unterstützen können. Durch die dargestellte Erweiterung des Verfahrens hinzu einer Automatisierung des Gesamtprozesses können Vergleichsszenarien mit deutlich weniger Aufwand bereitgestellt werden. Dies bietet eine Unterstützung auf dem Weg zu einer modernen, zuverlässigen und robusten Bahninfrastruktur, deren Wartung ein kontinuierlicher Prozess ist.

Die vorgestellte Automatisierung unter Integration von OptDis und der Infrastrukturnutzung in LUKS® wird aktuell prototypisch auf Basis der bestehenden Strukturen umgesetzt. Darauf aufbauend sind Erweiterungen zur passfähigen Visualisierung, Variantenbetrachtung und Historisierung denkbar.

Literatur

[1] Hecht, J.; Lochner, D.; Janecek, D.; Koriath, H.: „Ein generischer Ansatz zur Bestimmung der anlagenscharfen Infrastrukturnutzung für die netzweite Präventionsplanung“ - Talk at: 3. International Railway Symposium Aachen (IRSA), Aachen, 21.-23.11.2021.

[2] Weymann, F.; Nießen, N.: „Unterstützung der Fahrplanfeinkonstruktion mit Optimierungsverfahren“ In: Eisenbahntechnische Rundschau 64 (2015) 3, S. 16 –19

Autoren

Hecht, Jonathan
Softwareentwickler bei VIA Consulting & Development GmbH.

Janecek, David
Geschäftsführer der VIA Consulting & Development GmbH.

Session 11
Maren Maus, Bastian Kogel, Fabian Schröter, Nils Nießen, Mario Fietze

Kapazitätsbestimmung von Eisenbahnstrecken unter Berücksichtigung von Netzeffekten

Maus, Maren[1], Kogel, Bastian[1], Schröter, Fabian[1], Nießen, Nils[1], Fietze, Mario[2]

[1]Verkehrswissenschaftliches Institut der RWTH Aachen (VIA)
[2]Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung beim Eisenbahn-Bundesamt (DZSF)

Zusammenfassung

Bei der langfristigen Dimensionierung von Eisenbahninfrastruktur nimmt die zur Verfügung stehende Kapazität eine entscheidende Rolle ein. Die Ermittlung der Kapazität mit Hilfe analytischer Verfahren beschränkt sich derzeit jedoch auf einzelne Strecken und Elemente des Knotens. Die Wechselwirkungen zwischen diesen Infrastrukturelementen werden dabei nicht berücksichtigt. In diesem Beitrag wird ein Einblick in eine Methode zur Kapazitätsbestimmung von Eisenbahnstrecken unter Berücksichtigung von Netzeffekten gegeben, welche im Rahmen des durch das Deutsche Zentrum für Schienenverkehrsforschung (DZSF) initiierten Projektes „Methodik der Kapazitätsbewertung des Gesamtsystems und Knotenberechnung“ entwickelt wird.

Keywords: Kapazität, Eisenbahnnetz, Eisenbahnbetriebswissenschaft, Optimierung

1 Ausgangslage und Motivation

Kapazitätsuntersuchungen stellen ein wichtiges Werkzeug zur langfristigen Planung von Eisenbahninfrastruktur dar. In Deutschland kommen hierbei nach aktuellem Stand der Technik insbesondere analytische Verfahren zur Anwendung. Diese unterscheiden sich für Strecken, Gleisgruppen und Fahrstraßenknoten, sodass Kapazitäten i. d. R. jeweils separat für diese Infrastrukturelemente bestimmt werden. Durch die unterschiedlichen

Berechnungsansätze sind die ermittelten Kapazitätswerte einerseits nicht direkt miteinander vergleichbar und andererseits werden Wechselwirkungen mit den umliegenden Infrastrukturelementen bei der Ermittlung der Kapazitäten nicht ausreichend berücksichtigt. Eine Betrachtung größerer Eisenbahnnetze unter Einbezug von Wechselwirkungen ist mit Hilfe von Simulationen grundsätzlich möglich. Im Gegensatz zu analytischen Verfahren erfordern Simulationen jedoch detaillierte Eingangsdaten in Form eines konkreten Fahrplans. Dementsprechend sind Simulationen nicht für die langfristige Dimensionierung der Infrastruktur geeignet und sowohl aufwändig als auch rechenintensiv, sodass die Größe der untersuchbaren Netze begrenzt ist. Neben analytischen Verfahren, Simulationen und konstruktiven Verfahren, welche insbesondere international gemäß UIC Code 406 [1] bei der Fahrplanerstellung Anwendung finden, werden seit einigen Jahren vermehrt auch Methoden aus dem Bereich der mathematischen Optimierung in der eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Forschung eingesetzt. In [2] und [3] wird beispielsweise die Kapazität einer Eisenbahnstrecke mittels ganzzahliger linearer Programme untersucht. Bei beiden Ansätzen werden zur Modellierung zeitexpandierte Netzwerke genutzt, wobei sich die konkret untersuchte Fragestellung sowie der Detaillierungsgrad der Modellierung unterscheiden. Ebenfalls auf Basis von zeitexpandierten Netzwerken werden in [4] und [5] Restkapazitäten in Eisenbahnnetzen bestimmt. Hierbei werden jeweils bestehende Fahrpläne vorausgesetzt, während das Ziel der hier vorliegenden Fragestellung die Ermittlung netzweiter Kapazitäten unabhängig von konkreten Fahrplänen ist. Ein anderer Ansatz wird in [6] dargestellt. Hierin wird unter Berücksichtigung des Fahrzeugumlaufs die maximal mögliche Anzahl an Fahrgästen in einem Netz mithilfe eines Zeit-Raum-Netzwerks ermittelt. Die bisherigen Verfahren aus dem Bereich der Optimierung basieren folglich auf konkreten Fahrplänen und unterschätzen die Kapazität für langfristige Infrastrukturplanungen tendenziell, konzentrieren sich auf wenig komplexe Infrastrukturen oder beziehen den aktuellen Stand der Technik nicht ein. In diesem Beitrag wird daher ein Optimierungsmodell entwickelt, welches die mögliche Auslastung von Eisenbahnstrecken unter Berücksichtigung von Netzeffekten untersucht. Dabei basiert das Modell auf zeitexpandierten Netzwerken und vergleicht die möglichen Zugzahlen mit den Nennleistungen der einzelnen Strecken, die gemäß aktuellem Stand der Technik mithilfe der STRELE-Formel ([7], [8]) berechnet werden. Hierbei steht im Gegensatz zu den zuvor erläuterten Ansätzen insbesondere die Anwendung für langfristige Infrastrukturplanungen bezogen auf Netzstrukturen im Fokus. Gleichzeitig soll das zu entwickelnde Verfahren konsistent zu aktuell in Deutschland angewendeten Verfahren zur Kapazitätsermittlung von Strecken sein.

Der Beitrag gliedert sich wie folgt: In Abschnitt 2 wird zunächst der Aufbau des entwickelten Modells beschrieben, welches in Abschnitt 3 einer Sensitivitätsanalyse unterzogen wird. Diese stellt den Einfluss verschiedener Infrastruktur- und Betriebsprogrammeigenschaften auf die Kapazitäten im Netz und die Rechenzeit des Modells heraus. Schließlich werden in Abschnitt 4 der Weiterentwicklungsbedarf des Modells abgeleitet und in Abschnitt 5 die Ergebnisse zusammengefasst sowie ein Ausblick auf die nächsten Schritte gegeben.

2 Aufbau des Optimierungsmodells zur netzweiten Kapazitätsermittlung

Zur Ermittlung der nutzbaren Kapazitäten von Eisenbahnstrecken unter Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen einzelnen Strecken und Knoten wird ein lineares Optimierungsmodell formuliert. Dieses maximiert die Anzahl der Zugfahrten im untersuchten Netz unter möglichst exakter Beibehaltung eines vorgegebenen Mischungsverhältnisses der Zugfahrten und unter Berücksichtigung eisenbahnspezifischer Randbedingungen. Nachfolgend werden in Abschnitt 2.1 zunächst die für die Optimierung benötigten Eingangsgrößen beschrieben. In Abschnitt 2.2 wird anschließend das Modell formuliert, ehe in Abschnitt 2.3 die Erläuterung der Ergebnisauswertung erfolgt.

2.1 Eingangsgrößen und Grundlagen der Modellierung

Das entwickelte Optimierungsmodell basiert auf einer Modellierung der untersuchten Infrastruktur in Form eines Graphen. Hierbei werden Bahnhöfe über Knoten und Strecken durch gerichtete Kanten dargestellt, sodass es je Strecke und Fahrtrichtung jeweils eine Kante gibt. Die über die Infrastruktur hinaus erforderlichen Größen zur Ermittlung von Kapazitäten gehen in Form von Kanten- und Knotengewichten sowie zugspezifischen Größen in das Modell ein. Als kantenspezifische Größen werden hierbei für die Kante zwischen Knoten i und j mittlere Mindestzugfolgezeiten $\bar{z}_{ij}$, Mindestpufferzeiten $t_{p,ij}^{min}$ und auf den Tageszeitraum (6-22 Uhr) bezogene Nennleistungen $n_{ij,16h}^{opt}$ berücksichtigt, welche in einem vorgelagerten Schritt jeweils mikroskopisch ermittelt werden. Zur Berechnung der Nennleistung wird dabei ein festes Mischungsverhältnis je Kante unterstellt, welches ebenfalls an das Modell übergeben wird und im Rahmen der Modellanwendung möglichst exakt eingehalten werden soll. Knotenspezifische Eingangsgrößen stellen u. a. die Anzahl der für haltende Züge zur Verfügung stehenden

Gleise g_i dar. Die zugspezifischen Größen beinhalten weiterhin Mindest- und Maximalhaltezeiten $(h^k_{min,i}, h^k_{max,i})$ in den Knoten i, die Start-Ziel-Relationen (o^k, d^k) sowie die Streckenverläufe A^k der Zugfahrten k als Folge von Kanten. Zusätzlich sind aus den fahrzeugspezifischen Daten Fahrzeiten $\tau_{ij}^{l(k)}$ je Zug k für die einzelnen Kanten $(i,j) \in A$ mikroskopisch und somit realitätsnah zu ermitteln. Definiert werden hierbei als Eingangsgröße für das Modell sogenannte Modellzüge $l(k)$, die jeweils Einzelzüge k mit gleichen Eigenschaften zusammenfassen.

Die Zeitkomponente wird über ein sogenanntes zeitexpandiertes Netzwerk $G^T = (V^T, A^T)$ integriert. Dabei werden der untersuchte Zeitraum T in diskrete Zeitschritte unterteilt und die Knoten des Netzes für jeden dieser Zeitschritte erzeugt und dargestellt. Die Knotenmenge V^T enthält somit für jeden Zeitschritt eine Kopie der Knotenmenge V des ursprünglichen Netzwerks. Die Kantenmenge A^T enthält die entsprechend der räumlich und zeitlich möglichen Fahrbeziehungen in das Netzwerk eingefügten Kanten. Die Modellierung der Bereit- und Abstellung von Zugfahrten erfolgt über sogenannte Quellen $(i,-)$ und Senken $(i,+)$ für jeden Bahnhof $i \in V^T$. Da nur diejenigen Zugfahrten, deren gesamter Laufweg innerhalb des Zeithorizonts gelegen ist, in der Optimierung Berücksichtigung finden, ist das Netz zu Beginn und zum Ende des modellierten Zeithorizonts leer. Um die Auswertung eines gleichmäßig ausgelasteten Zeitraums sicherzustellen, wird daher innerhalb des Zeithorizonts zusätzlich ein Auswertezeitraum T_A definiert. Die Einhaltung der Nennleistung wird sowohl auf den gesamten Zeithorizont als auch auf den Auswertezeitraum bezogen.

Zur Maximierung der Anzahl an Zugfahrten im Netz ist zunächst eine Menge an Zugfahrten, aus denen im Modell ausgewählt werden kann, zur Verfügung zu stellen (Abbildung 1, Schritt 2). Hierzu wird die Menge an Einzelzügen je Modellzug entsprechend der minimalen Nennleistung entlang seines Laufweges bestimmt. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass eine ausreichende Anzahl an Zugfahrten zur Verfügung steht, um das Netz maximal auszulasten. Gleichzeitig wird die Zuganzahl jedoch auch nach oben hin begrenzt, sodass die Rechenzeit nicht unnötig erhöht wird. Aus diesen Zugfahrten werden anschließend die maximal im Netz umlegbare Anzahl ermittelt (Abbildung 1, Schritt 3) und unter Einhaltung dieser Zuganzahl anschließend die Summe der Abweichungen der Zugzahlen vom in das Modell eingehenden Mischungsverhältnis über alle Kanten minimiert (Abbildung 1, Schritt 4). Als Ergebnis des Optimierungsprozesses werden schließlich die eingeplanten Zugfahrten und ihre zeitlichen Lagen ausgegeben (Abbildung 1, Schritt 5).

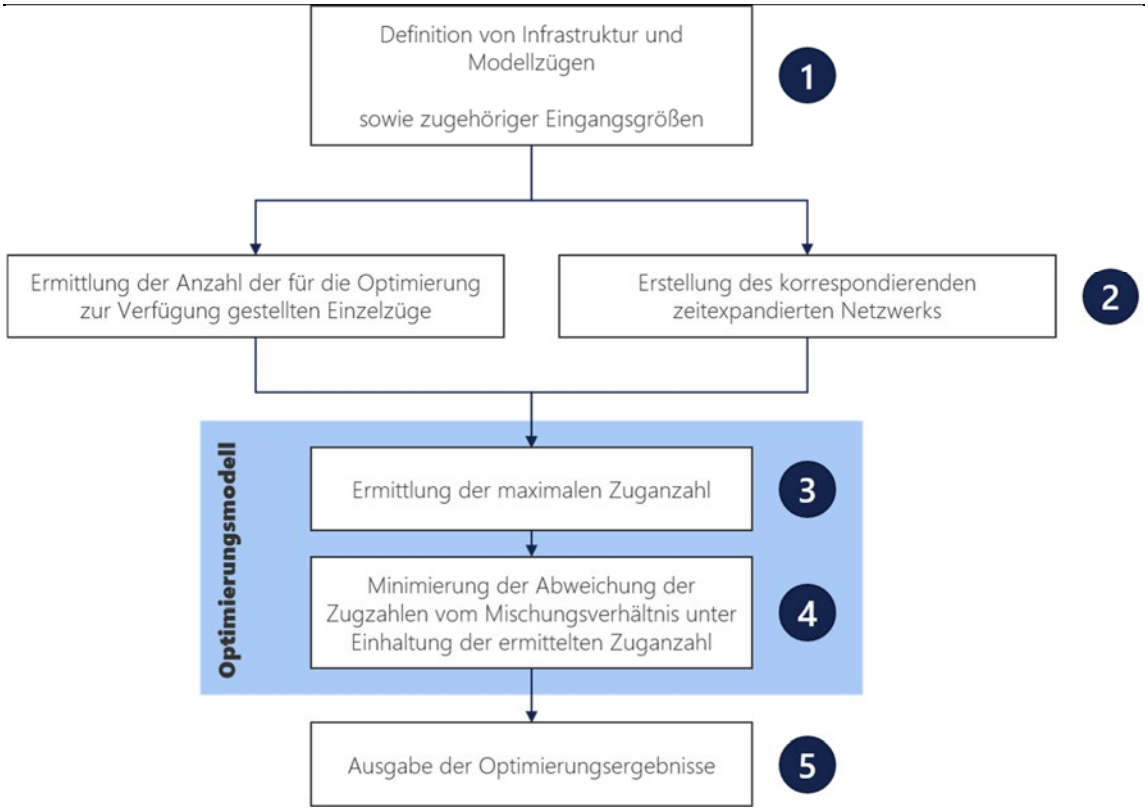


Abbildung 1: Schritte des Optimierungsprozesses.

2.2 Entscheidungsvariablen, Nebenbedingungen und Zielfunktionen der Optimierung

Zur Formulierung des ganzzahligen linearen Programms (ILP), mit welchem die Optimierung umgesetzt wird, werden zwei verschiedene binäre Entscheidungsvariablen definiert. Für jeden Zug $k \in K$ und jede Kante $a \in A^{T,k}$ des zeitexpandierten Netzwerks $G^T = (V^T, A^T)$, die im Laufweg A^k dieses Zuges enthalten ist, wird eine Variable x_a^k eingeführt, für die gilt:

$$x_a^k = \begin{cases} 0, & \text{falls Kante } a \in A^T \backslash A^{T,k} \\ 1, & \text{falls Zug } k \in K \text{ Kante } a \in A^{T,k} \text{ befährt} \end{cases}$$

Durch die Variable y^k wird außerdem für jeden Zug angegeben, ob dieser im betrachteten Zeithorizont im Netz verkehrt:

$$y^k = \begin{cases} 0, & \text{falls Zug } k \in K \text{ nicht eingeplant wurde} \\ 1, & \text{falls Zug } k \in K \text{ eingeplant wurde} \end{cases}$$

Basierend auf diesen Entscheidungsvariablen und den in Abschnitt 2.1 beschriebenen Eingangsgrößen wird schließlich das Optimierungsmodell formuliert. Dieses berücksichtigt, wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, zwei verschiedene Zielfunktionen, welche nacheinander optimiert werden. Die erste Zielfunktion besteht darin, die Anzahl der Zugfahrten im gesamten Netz zu maximieren, d. h.

$$\max \sum_{k \in K} y^k$$

Unter Einhaltung der ermittelten maximalen Zuganzahl soll mittels der zweiten Zielfunktion anschließend die Summe der Abweichungen vom Mischungsverhältnis über alle Kanten minimiert werden. Hierbei werden in dem Modell grundsätzlich Züge des Fernverkehrs (SPFV), Nahverkehrs (SPNV) und Güterverkehrs (SGV) unterschieden. Die Abweichung der Zuganzahl einer Verkehrsart auf einer Kante (i, j) ist durch $\Delta_{x \in \{SPFV,SPNV,SGV\},\, ij} = n_{x,\, ij} - p_{x,\, ij,Soll} \cdot n_{ges,\, ij}$ gegeben. Hierbei steht $n_{x,ij}$ bzw. $n_{ges,ij}$ für die jeweilige tatsächliche Zuganzahl auf der Kante und der vorgegebene Anteil einer Zugart am Mischungsverhältnis ist durch $p_{x,ij,Soll}$ definiert. Die Minimierung der Abweichungen vom Mischungsverhältnis über alle Kanten wird dann über

$$\min \sum_{(i,\, j) \in A} \Delta_{SPFV,\, ij} + \Delta_{SPNV,\, ij} + \Delta_{SGV,\, ij}$$

vorgenommen. Falls das Mischungsverhältnis nicht exakt eingehalten werden kann (d. h. $\Delta_{x,\, ij} \neq 0$), gelten für die folgenden Einschränkungen:

- Auf Strecken, auf denen zwei verschiedene Zugarten verkehren, darf die Zuganzahl der höherrangigen Zugart nur nach oben vom vorgegebenen Mischungsverhältnis abweichen.
- Auf Strecken, auf denen alle drei Zugarten verkehren, dürfen die Zuganzahlen des Personenverkehrs nur nach oben abweichen, während die Zuganzahl des Güterverkehrs nur nach unten abweichen darf.

Diese Annahmen sind für eine lineare Formulierung der zweiten Zielfunktion notwendig. Durch die Linearität wird die Lösung im Vergleich zu nichtlinearen Optimierungsproblemen i. d. R. vereinfacht. Im Rahmen der Optimierung sind eine Reihe von Nebenbedingungen einzuhalten, welche insbesondere die eisenbahnspezifischen Besonderheiten abbilden. Diese Nebenbedingungen sind nachfolgend aufgeführt:

(1) Die definierten Entscheidungsvariablen sind binär.

$$y_k, x_a^k \in \{0, 1\} \qquad \forall\, k \in K, \forall\, a \in A^T$$

(2) Jeder Zug, der im Zeitverlauf eingeplant wird, muss an seinem Startbahnhof bereitgestellt und an seinem Zielbahnhof abgestellt werden.

$$\sum_{t=0}^{T} x^k_{((o^k,-),(o^k,t))} = \sum_{t=0}^{T} x^k_{((d^k,t),(d^k,+))} = y^k \qquad \forall\, k \in K$$

(3) Jeder Zug, der im Zeitverlauf eingeplant wird, befährt jede Kante seines Laufwegs genau einmal.

$$\sum_{t=0}^{T-\tau_{ij}^{l(k)}} x^k_{((i,t),(j,t+\tau_{ij}^{l(k)}))} = y^k \qquad \forall\, k \in K, \forall (i,j) \in A^k \colon i \neq j$$

(4) Für jeden Zug gilt mit Ausnahme der Quellen und Senken an allen Knoten des zeitexpandierten Netzwerks Flusserhaltung. $\delta^+((i,t))$ bzw. $\delta^-((i,t))$ stellen hierbei die Menge der aus dem Knoten $(i,t) \in V^T$ aus- bzw. in diesen Knoten eingehenden Kanten dar. Hierdurch wird gleichzeitig sichergestellt, dass der Zug seinem definierten Laufweg folgt.

$$\sum_{\substack{a \in \delta^+((i,t)) \\ a \in A^{T,k}}} x^k_a - \sum_{\substack{a \in \delta^-((i,t)) \\ a \in A^{T,k}}} x^k_a = 0 \qquad \begin{array}{l} \forall\, (i,t) \in V^T, \\ \forall\, \mathrm{t} \in \{0, \dots, \mathrm{T}\}, \forall\, k \in K \end{array}$$

(5) Die Mindest- und Maximalhaltezeit eines Zuges in einem Bahnhof V^k entlang seines Laufweges werden eingehalten.

$$h^k_{min,i} \cdot y^k \leq \sum_{t=0}^{T-1} x^k_{((i,t),(i,t+1))} \leq h^k_{max,i} \qquad \begin{array}{l} \forall\, i \in V^k, \\ \forall\, \mathrm{t} \in \{0, \dots, \mathrm{T}\}, \forall\, k \in K \end{array}$$

(6) In einem Bahnhof dürfen zu keiner Zeit mehr Züge halten, als Gleise für haltende Züge zur Verfügung stehen.

$$\sum_{\substack{k \in K: \\ i \in V^k}} x^k_{((i,t),(i,t+1))} \leq g_i \qquad \forall\, i \in V, \forall\, \mathrm{t} \in \{0, \dots, \mathrm{T}-1\}$$

(7) Auf keiner der Kanten darf die Nennleistung der Strecke überschritten werden. Dies gilt sowohl für den gesamten Zeithorizont T als auch für den Auswertezeitraum T_A. T_B und T_E bezeichnen hierbei den Beginn bzw. das Ende der betrachteten Zeitperiode und K_{ij} die Menge der Züge, deren Laufweg die betrachtete Kante enthält.

$$\sum_{k \in K_{ij}} \sum_{t=\min\{0, T_B - \tau_{ij}^{l(k)}\}}^{T_E} x^k_{\left((i,\, t-\tau_{ij}^{l(k)}),\, (j,\, t)\right)} \leq \left\lfloor \frac{n^{\mathrm{opt}}_{ij,16h} \cdot (T_E - T_B)}{16 \cdot 60} \right\rfloor \qquad \forall\, (i,j) \in A$$

(8) Zwischen zwei Zügen, die eine Kante befahren, müssen stets die mittlere Mindestzugfolgezeit auf der Kante sowie zusätzlich eine Mindestzugfolgepufferzeit eingehalten werden.

$$\sum_{k \in K_{ij}} \sum_{\substack{t'=t \\ t'+\tau_{ij}^{l(k)} \leq T}}^{t+\bar{z}_{ij}+t_{p,ij}^{min}-1} x^{k}_{((i,t'),(j,t'+\tau_{ij}^{l(k)}))} \leq 1 \qquad \forall (i,j) \in A, \forall\, t \in \{0, \ldots, T\}$$

2.3 Auswertung der Optimierungsergebnisse

Als Ergebnis der Optimierung werden die zeitlichen Lagen der eingeplanten Zugfahrten ausgegeben. Um die Kapazitäten, die durch die geplanten Zugfahrten beansprucht werden, auszuwerten, wird für jede Kante ermittelt, wie viele Zugfahrten diese Kante innerhalb des Auswertezeitraums befahren. Wird eine Kante nur teilweise innerhalb des Auswertezeitraums befahren, werden alle Belegungen, die innerhalb des Auswertezeitraums enden, berücksichtigt. Abbildung 2 veranschaulicht diese Regelung anhand von fünf exemplarischen Zugfahrten und stellt dar, für welche Kanten diese jeweils gezählt werden.

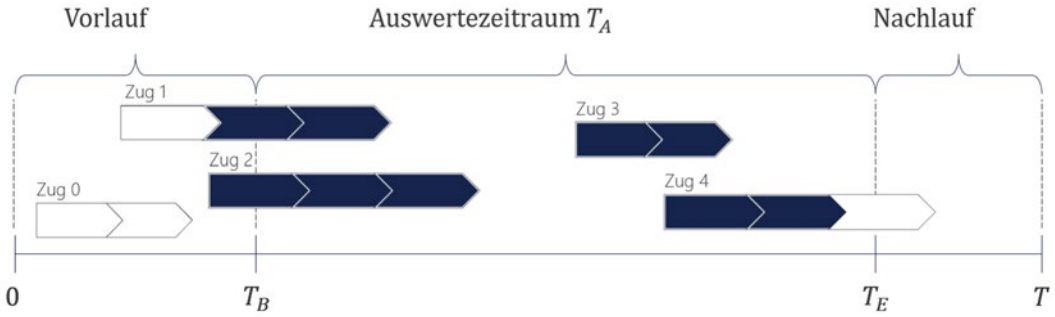


Abbildung 2: Kantenbelegungen, die in die Auswertung der Kapazitäten eingehen (blau).

3 Sensitivitätsanalyse des entwickelten Modells

Zur Untersuchung des Einflusses verschiedener Eingangsgrößen auf die Ergebnisse der Optimierung sowie auf die Rechenzeiten wird das Modell einer Sensitivitätsanalyse unterzogen. Hierzu werden verschiedene Szenarien analysiert, welche sich bezüglich ihrer Infrastruktur und ihres Betriebsprogramms unterscheiden.

Die betrachteten Szenarien werden in Abschnitt 3.1 vorgestellt. In Abschnitt 3.2 werden die Ergebnisse der Modellanwendung dargestellt, während in Abschnitt 3.3 die Rechenzeiten für die einzelnen Szenarien aufgeführt sind.

3.1 Untersuchte Szenarien

Für die Sensitivitätsanalyse werden acht Infrastrukturvarianten definiert, die sich hinsichtlich ausgewählter Infrastruktureigenschaften unterscheiden. Die betrachteten Netze und mögliche Linienverläufe sind Abbildung 3 zu entnehmen.

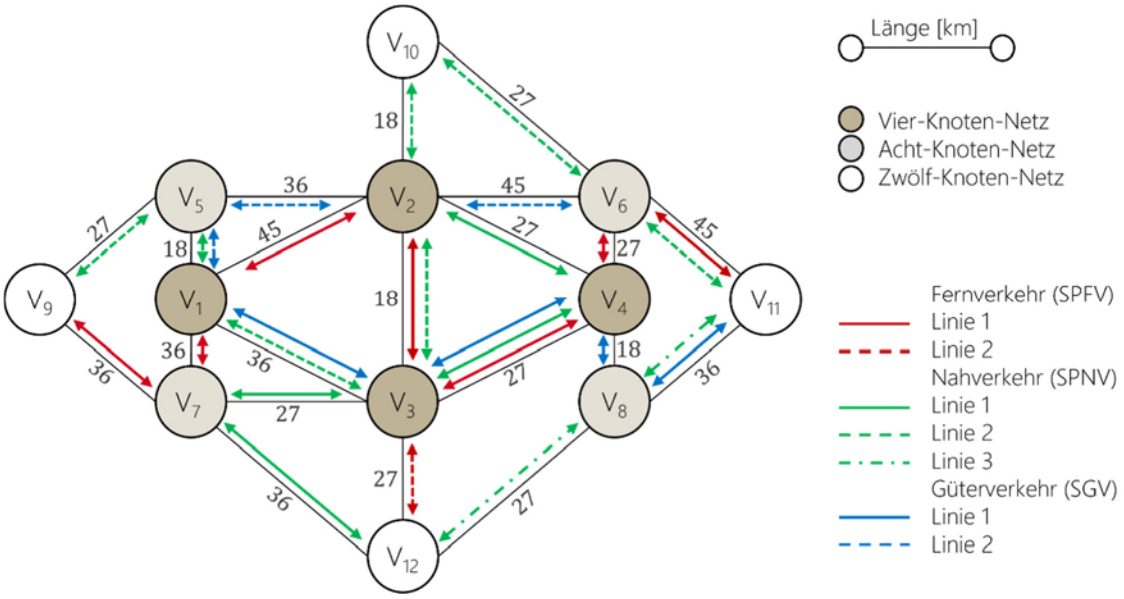


Abbildung 3: Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse untersuchte Szenarien.

Es werden ausschließlich zweigleisige Strecken betrachtet, sodass jeweils eine Kante je Fahrtrichtung modelliert ist, welche in Abbildung 3 vereinfacht als Einzellinien abgebildet sind. Grundlegend werden im Rahmen der Sensitivitätsanalyse drei unterschiedliche Netzgrößen betrachtet. So umfassen die Netze vier, acht oder zwölf Knoten. Die zu den drei verschiedenen Netzgrößen gehörigen Knoten sind in Abbildung 3 entsprechend unterschiedlich eingefärbt. Zudem wird zwischen Netzen, in denen alle Kanten eine konstante Länge von 27 km aufweisen, und solchen mit variablen Kantenlängen unterschieden. Für den Fall variabler Kantenlängen sind die Längen in Abbildung 3 als Kantengewichte angegeben. Neben den dargestellten großen Knoten werden in der Modellierung zusätzlich Überholbahnhöfe auf den jeweiligen Kanten unterstellt, welche im Abstand von jeweils neun Kilometern angeordnet sind und bei der Ermittlung der Eingangsgrößen berücksichtigt werden. Während Züge des Fernverkehrs die Kanten ohne Halt befahren, ist für den Nahverkehr jeweils ein Halt in den

Überholbahnhöfen mit konstanter Haltezeit vorgesehen, welche in der Fahrzeit für die jeweilige Kante berücksichtigt wird. Züge des Nah- und Güterverkehrs können jeweils in den Überholbahnhöfen überholt werden. Weiterhin unterscheiden sich die Knotentypen in den Infrastrukturvarianten. Alle Knoten weisen ein durchgehendes Hauptgleis je Fahrtrichtung auf, welche entweder durch zwei (Knotentyp 4+2) oder durch drei Haltegleise je Fahrtrichtung ergänzt werden (Knotentyp 6+2). Bei den Infrastrukturvarianten IS5 bis 8 sind sowohl Knoten des Typs „4+2“ als auch des Typs „6+2“ enthalten. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die acht für die Analyse ausgewählten Infrastrukturvarianten.

Tabelle 1: Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse untersuchte Infrastrukturvarianten.

Variante	Knotenanzahl	Kantenlänge	Knotentyp
IS1	4	konstant (27 km)	4+2
IS2	4	variabel	4+2
IS3	4	konstant (27 km)	6+2
IS4	4	variabel	6+2
IS5	4	konstant (27 km)	variabel
IS6	4	variabel	variabel
IS7	8	variabel	variabel
IS8	12	variabel	variabel

Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse werden zudem die drei in Tabelle 2 aufgeführten Betriebsprogrammvarianten untersucht (BP1 bis BP3). Diese weisen unterschiedliche Mischungsverhältnisse der Verkehrsarten auf.

Tabelle 2: Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse untersuchte Betriebsprogrammvarianten.

Variante	p_{SPFV}	p_{SPNV}	p_{SGV}
BP1	20 %	40 %	40 %
BP2	40 %	60 %	-
BP3	-	60 %	40 %

Aus der Kombination der acht Infrastruktur- und der drei Betriebsprogrammvarianten ergeben sich insgesamt 24 Szenarien, auf die das Modell im Rahmen der Sensitivitätsanalyse angewendet wird.

3.2 Einfluss von Infrastruktur und Betriebsprogramm auf die nutzbaren Kapazitäten

Im Folgenden werden die Ergebnisse und wesentliche ableitbare Erkenntnisse, die sich aus der Anwendung des in Abschnitt 2 vorgestellten Modellansatzes auf die Szenarien ergeben, erläutert. Zunächst werden die Ergebnisse eines beispielhaft gewählten Szenarios analysiert. Als Beispiel-Szenario wird die Variante IS6-BP1 gewählt, da diese sowohl variable Kantenlängen als auch Knotengrößen aufweist und somit der Realität am nächsten kommt. Die hierfür resultierenden optimalen Kantenbelastungen je Auswertungsrichtung sind in Abbildung 4 dargestellt.

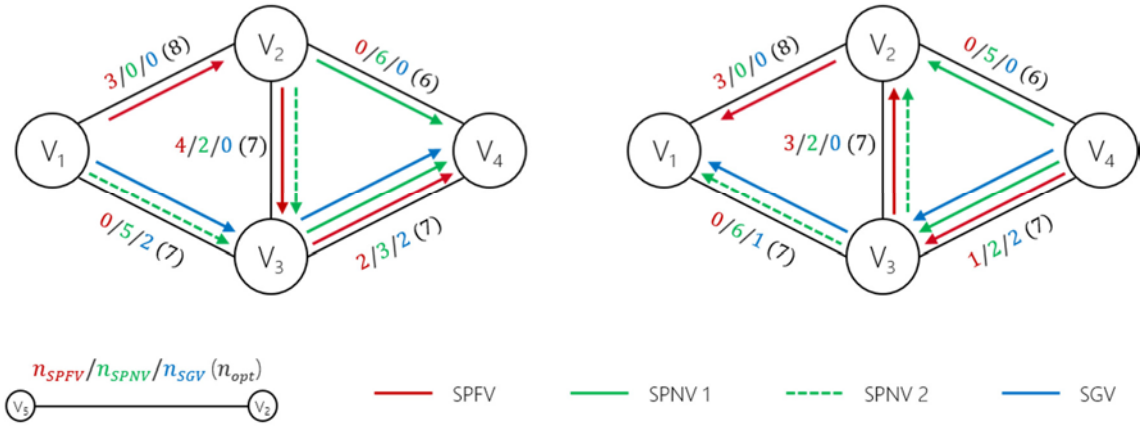


Abbildung 4: Optimale Zuganzahl je Zugart in Richtung 1 (links) und Richtung 2 (rechts).

Es zeigt sich, dass die Nennleistung auf den meisten Kanten in beiden Fahrtrichtungen weitgehend genutzt werden kann. Den geringsten Nutzungsgrad weist in beiden Richtungen die nur durch den SPFV befahrene Kante (v_1, v_2) auf. Dies lässt sich durch die nachfolgend aufgeführten Netzeffekte erklären: Neben der Ausnutzung der Nennleistung stellt das Verhältnis der Verkehrsarten ein Optimierungskriterium dar. Auf den Mischverkehrskanten (v_2, v_3) sowie (v_3, v_4) wird das angestrebte Verhältnis in beiden Richtungen annähernd bis vollständig eingehalten. Zusätzliche Fernverkehrsfahrten würden die Auslastung der Kante (v_1, v_2) erhöhen, jedoch unter Umständen ebenfalls zusätzliche Fahrten auf den anderen Kanten des Laufweges bedeuten. So würden beispielsweise andere Fahrten auf der Kante (v_3, v_4) verdrängt, da

sonst die hierfür geltende Nennleistung überschritten wird. Dies hätte wiederum Auswirkungen auf das Mischungsverhältnis der Kante sowie auf die Belastung weiterer Kanten des Netzes, sodass diese Lösung in Bezug auf das gesamte Netz schlechter wäre. In der Realität ist die Kopplung von reinen Fernverkehrs- mit Mischverkehrskanten jedoch i. d. R. nicht vorgesehen, sodass die deutliche Unterauslastung der Fernverkehrskante auch ein Ergebnis der Konstruktion des generischen Netzes ist.

Für Richtung 2 des Szenarios IS6-BP1 wäre es bezogen auf die in Abbildung 4 dargestellte Nennleistung auf den Kanten (v_4, v_3), (v_3, v_2) und (v_2, v_1) möglich, eine weitere Fahrt des Fernverkehrs einzuplanen. Dass dies nicht erfolgte, liegt daran, dass die Nennleistung auch bezogen auf den Zeithorizont einzuhalten ist: Für die Auslastung einer Kante zählen nur solche Zugfahrten, welche ihre Fahrt auf der Kante innerhalb des Auswertezeitraums abschließen (vgl. Abschnitt 2.3). Im dargestellten Beispiel sind einige Zugfahrten so gelegen, dass ihre Kantenbelegungen nicht mehr in den Auswertezeitraum fallen, während die Nennleistung im Zeithorizont jedoch bereits erreicht ist.

Für den in Abbildung 5 dargestellten Vergleich aller Szenarien wird die Kante (v_3, v_4) für die aus vier Knoten bestehenden Netze analysiert, da diese Kante im gewählten generischen Netz als einzige von allen Zugarten befahren wird und somit für alle Szenarien den Engpass des Netzes darstellt.

Für BP1 sind die Ergebnisse in Richtung 2 für alle Szenarien identisch mit einem stets exakt erfüllten Mischungsverhältnis. Dabei liegt der Nutzungsgrad durch die Einplanung von fünf der sieben möglichen Fahrten lediglich bei 71 %. In Richtung 1 wird die Nennleistung in allen Infrastrukturvarianten erreicht, die Zugzahlen der drei Verkehrsarten weisen jedoch zwischen den verschiedenen Szenarien Unterschiede von bis zu einer Fahrt auf. So variiert auch das Mischungsverhältnis, weicht dabei allerdings nur geringfügig vom angestrebten Verhältnis ab.

Für BP2 ergeben sich in beiden Richtungen für alle berechneten Infrastrukturvarianten dieselben Kantenbelastungen und die Nennleistung von sieben Zügen wird stets erreicht. Die Anteile der Verkehrsarten betragen für den SPFV 43 % und für den SPNV 57 %. Dies kommt unter der Einschränkung ganzzahliger Zugzahlen nächstmöglich an die angestrebten Anteile von 40 % bzw. 60 % heran. Das Szenario IS5-BP1 konnte aufgrund einer Überschreitung der maximalen Rechenzeit nicht ausgewertet werden.

Für BP3 sind die optimalen Zugzahlen in Richtung 2 ebenfalls in allen Szenarien identisch und lasten die Nennleistung vollständig aus. Mit 71 % und 29 % weichen die Anteile von SPNV und SGV hier jedoch etwas stärker von den Zielwerten 60 % bzw.

40 % ab. Aufgrund der Formulierung der zweiten Zielfunktion stellt das Ergebnis aber auch hier das bestmöglich erreichbare Verhältnis dar. Die Kante weist in beiden Richtungen Unterschiede hinsichtlich des Verhältnisses von SPNV und SGV auf. So verkehren in Richtung 2 in allen Szenarien mehr Güterverkehrszüge als in Richtung 1.

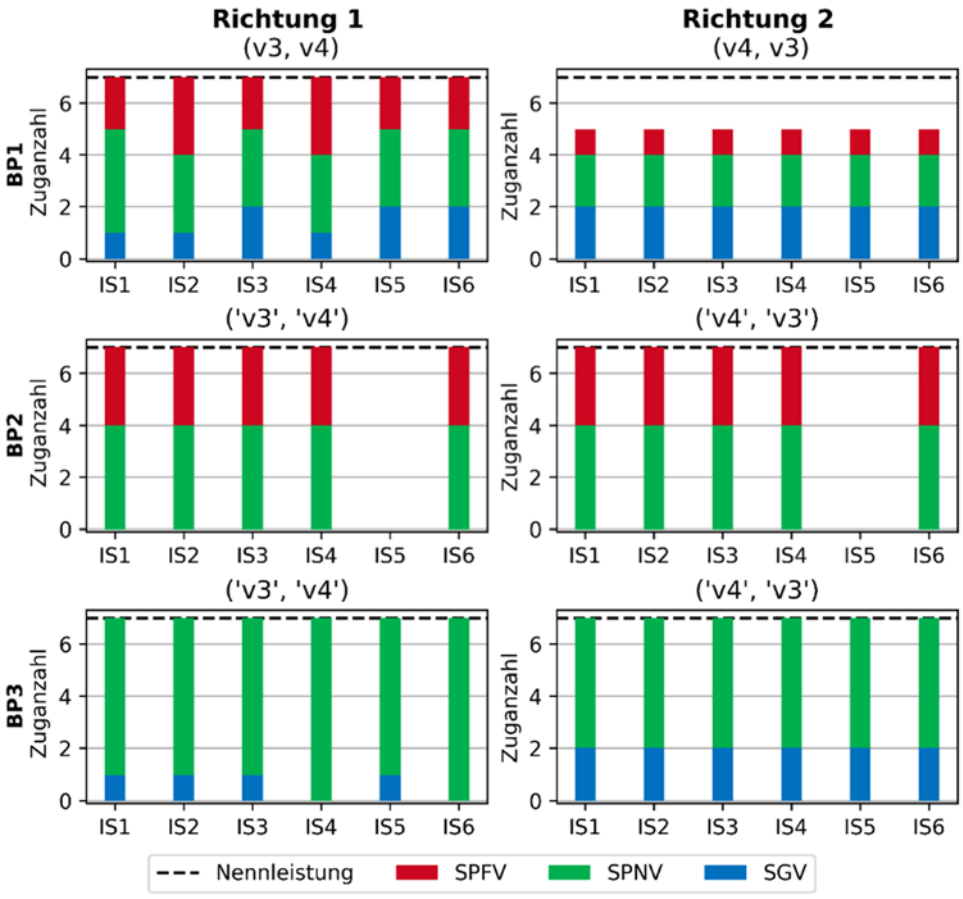


Abbildung 5: Optimale Zugzahlen aller Szenarien auf der Kante (v_3,v_4).

Sowohl bei der detaillierten Betrachtung des Beispiel-Szenarios als auch im kantenbezogenen Vergleich fallen Unterschiede zwischen den ermittelten optimalen Kantenbelastungen für die beiden Richtungen auf. Derartige Abweichungen waren durch die identische Infrastruktur und das Betriebsprogramm nicht zu erwarten. Den entscheidenden Einfluss hierfür stellen vermutlich der Laufweg bzw. die Reihenfolge, in welcher die Kanten befahren werden, dar, da Fahrten nur in die Kantenbelastung eingehen, wenn das Ende der Kante im Auswertezeitraum erreicht wird. Es ist jedoch noch detaillierter zu prüfen, welche Modelleigenschaften Richtungsunterschiede begünstigen und wie dem entgegengewirkt werden kann. In der Realität wären derart ungleich auf die Fahrtrichtungen verteilte Zugfahrten betrieblich nicht sinnvoll.

Die Ergebnisse der Szenarien zeigen, dass keine eindeutigen Zusammenhänge zwischen bestimmten Eigenschaften der Infrastruktur, wie zum Beispiel den Knotentypen oder Kantenlängen im Netz, abgeleitet werden können. Anzumerken ist dabei, dass die Knoten in den untersuchten Netzen eher großzügig bemessen sind und somit keine Engpässe der Netze darstellen. Im weiteren Projektverlauf soll anstelle der verfügbaren Gleisanzahl eine Knotenkapazität verwendet werden, die mithilfe eines parallel im Projekt entwickelten Verfahrens ermittelt wird und den Knoten detailliert modelliert [9].

3.3 Einfluss von Infrastruktur und Betriebsprogramm auf die Rechenzeit

Für die Berechnung der 24 Szenarien wird Hardware mit fünf CPUs und 24 GB RAM genutzt. Als Solver für die Optimierung kommt die Software Gurobi [10] zum Einsatz.

Die Modellanwendung umfasst die vier Schritte Einlesen der Eingangsdaten, Modellerstellung, Optimierung und Auswertung der Optimierungsergebnisse. Die Aufschlüsselung der benötigten Rechenzeit zeigt, dass sich diese in allen Szenarien hauptsächlich aus der Modellerstellung und der Optimierung zusammensetzt. Einlesen und Auswertung nehmen keinen signifikanten Anteil der Rechenzeit ein. Die Zeitbedarfe für Modellerstellung und Optimierung können Abbildung 6 entnommen werden.

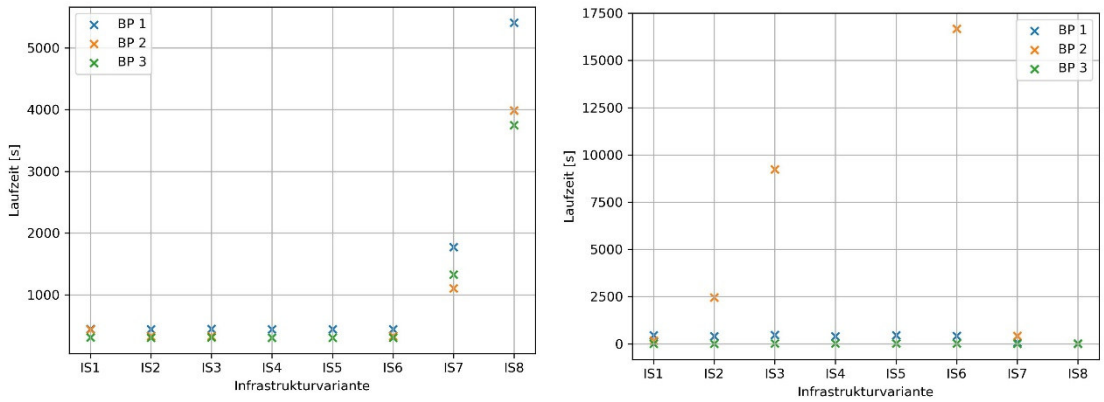


Abbildung 6: Benötigte Rechenzeit für die Schritte Modellerstellung (links) und Optimierung (rechts).

Bei der Modellerstellung liegen die Zeitbedarfe für die kleinen Netze IS1 bis IS6 für BP1 bis BP3 auf einem ähnlichen Niveau. Betrachtet man zusätzlich die größeren Netze IS7 und IS8, lässt sich unabhängig vom Betriebsprogramm mit zunehmender Knotenzahl ein exponentielles Anwachsen der Rechenzeit beobachten. Aufgrund der Modellierung mit

zeitexpandierten Graphen ist dies plausibel, da der zugrunde liegende Graph für jeden Zeitschritt erweitert wird und somit mit zunehmender Knotenzahl immer komplexer wird.

In drei Szenarien, welche BP2 betreffen, übersteigen die Rechenzeiten für die Optimierung deutlich die Werte der übrigen Szenarien. Eine mögliche Erklärung besteht darin, dass BP2 lediglich Personenverkehr umfasst und es so in den kleinen Netzen eine hohe Symmetrie, d. h. eine Vielzahl sehr ähnlicher Lösungen, gibt, die durchsucht werden müssen. Es lässt sich jedoch nicht eindeutig ableiten, weshalb die Werte ausgerechnet für diese Infrastrukturvarianten derartig abweichen und nicht in allen BP2-Szenarien. Vergleicht man die Varianten BP1 (alle Verkehrsarten) und BP3 (kein SPFV), lässt sich beobachten, dass BP3 im Mittel eine geringere Rechenzeit für die Optimierung erfordert als BP1. Dies könnte daran liegen, dass für BP3 lediglich das Verhältnis von Nah- und Güterverkehr optimiert werden muss und für BP1 durch drei zu berücksichtigende Verkehrsarten komplexere Zusammenhänge vorliegen.

Bei der Optimierung ist hingegen mit zunehmender Knotenzahl kein Anstieg der Rechenzeit zu beobachten, auch wenn dies aufgrund des komplexeren Netzes zu erwarten gewesen wäre. Dies ist auf die Bedingung, dass Zugfahrten im Rahmen der Optimierung nur eingeplant werden können, wenn der gesamte Laufweg innerhalb des Zeithorizonts befahren wird, zurückzuführen: Die für das Zurücklegen der vollständigen Laufwege erforderlichen Fahrzeiten wachsen in den größeren Netzen deutlich an, weshalb nur vergleichsweise wenige Zugfahrten in der Optimierung Berücksichtigung finden. Aufgrund dessen nimmt die Komplexität der Lösungsfindung trotz steigender Netzgröße ab. Dieser Effekt ist aufgrund des im Sinne einer akzeptablen Rechenzeit gering gewählten Zeithorizonts so groß, dass die Ergebnisse von IS7 und IS8 für die Bewertung der Netzkapazitäten und die Analyse nur eine geringe Aussagekraft besitzen.

4 Weiterentwicklungsbedarf des entwickelten Modells

Die in Abschnitt 3 beschriebene Sensitivitätsanalyse hat gezeigt, dass die Anwendung des entwickelten Modells insbesondere durch lange Rechenzeiten limitiert ist. Da im Rahmen der praktischen Anwendung des Modells vor allem die Untersuchung größerer Netze von Interesse ist, stellt die deutliche Verringerung der Rechenzeit somit einen wesentlichen Weiterentwicklungsbedarf dar. Hier könnte einerseits untersucht werden, ob die Anzahl der für die Optimierung zur Verfügung gestellten Zugfahrten stärker begrenzt werden kann, sodass weniger Variablen generiert und Nebenbedingungen formuliert werden müssen. Andererseits ist zu prüfen, ob die Rechenzeit durch die Ausnutzung von Symmetrien, d. h. durch die Nutzung von Zusammenhängen, die die

Betrachtung eines Teils des Problems redundant machen, reduziert werden kann. Zu einem Großteil ist die lange Rechenzeit jedoch in der grundsätzlichen Modellierung auf Basis des zeitexpandierten Netzwerks begründet, da die Größe des Netzes mit jedem modellierten Zeitschritt wächst. Folglich ist es sinnvoll, im weiteren Projektverlauf auch weitere Modellierungsansätze für die untersuchte Fragestellung zu analysieren.

5 Fazit und Ausblick

Der vorliegende Beitrag beschreibt einen ersten Ansatz zur Ermittlung der möglichen Auslastung von Eisenbahnstrecken unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen mit dem umliegenden Netz. Der Ansatz basiert dabei auf einer Modellierung mittels zeitexpandierter Netzwerke. Zur Analyse der Sensitivität der Rechenzeit und der Ergebnisse des entwickelten Modells gegenüber verschiedenen Infrastruktur- und Betriebsprogrammeigenschaften wurden unterschiedliche Szenarien untersucht. Hierbei hat sich gezeigt, dass die nutzbaren Kapazitäten insbesondere von der Anzahl der betrachteten Zugarten und deren Laufwegen abhängig sind. Für unterschiedliche Infrastrukturvarianten sind in den untersuchten Szenarien hingegen keine signifikanten Einflüsse auf die Kapazitäten erkennbar, während die Rechenzeit exponentiell mit der Größe des betrachteten Netzes und des modellierten Zeithorizonts ansteigt.

Zur Reduzierung der Rechenzeit ist im weiteren Projektverlauf unter anderem eine Umformulierung des Modells vorgesehen, welche die Modellierung von kleineren Zeitschritten, größeren Netzen und längeren Zeiträumen ermöglichen soll. Hierbei wird eine Formulierung des Modells mit Hilfe von Variablen, die für jeden Zug und jede Kante Abfahrts- und Ankunftszeiten oder Taktmuster angeben, angestrebt. Da im Rahmen der hier untersuchten Fragestellung lediglich eine Aussage über die insgesamt im Untersuchungszeitraum fahrbaren Zugzahlen auf Strecken unter Berücksichtigung der umliegenden Netzelemente getroffen werden soll, ist zusätzlich zu prüfen, welche der bisher detailliert abgebildeten Eigenschaften im Rahmen der untersuchten Fragestellung ggf. vernachlässigt werden können.

Durch die beschriebene Umformulierung ist zu erwarten, dass die Größe des Modells nur noch über die Anzahl der Zugfahrten von der Zeitkomponente abhängig ist und nicht mehr mit jedem modellierten Zeitschritt um ein Vielfaches anwächst, sodass sich die Abbildung größerer Netze und Zeiträume realisieren ließe. Neben der Umformulierung ist die Anwendung von Heuristiken zur Reduzierung der Rechenzeit zu untersuchen. Weiterhin ist die Integration von Knotenkapazitäten, die auf Basis des in [9] entwickelten Verfahrens bestimmt werden, vorgesehen.

Literatur

[1] International Union of Railways (UIC), „UIC Code 406. Capacity," 2013.

[2] M. Yaghini, N. Nikoo und H. R. Ahadi, „An integer programming model for analysing impacts of different train types on railway line capacity," *Transport,* pp. 28-35, 2014.

[3] A. Arani, F. Jolai und M. Nasiri, „A multi-commodity network flow model for railway capacity optimization in case of line blockage," *International Journal of Rail Transportation,* pp. 297-320, 2019.

[4] V. Cacchiani, A. Caprara und P. Toth, „Scheduling extra freight trains on railway networks," *Transportation Research Part B: Methodological,* pp. 215-231, 2010.

[5] N. Weik, E. Hemminki und N. Nießen, „The effective residual capacity in railway networks with predefined train services," *Operations Research Proceedings ,* 2019.

[6] Z. Liao, H. Li, J. Miao und F. Corman, „Railway capacity estimation considering vehicle circulation: Integrated timetable and vehicles scheduling on hybrid time-space networks," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies,* 2021.

[7] W. Schwanhäußer, „Die Bemessung der Pufferzeiten im Fahrplangefüge der Eisenbahn," *Veröffentlichungen des verkehrswissenschaftlichen Institutes der RWTH Aachen,* 1974.

[8] N. Weik, N. Niebel und N. Nießen, „Capacity analysis of railway lines in Germany – A rigorous discussion of the queueing based approach," *Journal of Rail Transport Planning & Management,* pp. 99-115, 2016.

[9] A. Fink, F. Hantsch, U. Martin, S. Schmidhäuser und M. Fietze, „Verfahren zur Leistungsuntersuchung von Knoten unter Berücksichtigung der Einflüsse aus dem umgebenden Netz," *Eisenbahntechnische Rundschau (ETR),* pp. 18-22, 2023.

[10] Gurobi Optimization, LLC, *Gurobi Optimizer Reference Manual,* "https://www.gurobi.com", 2023.

[11] J. Ning, Q. Peng, Y. Zhu, Y. Jiang und O. Nielsen, „A bi-objective optimization model for the last train timetabling problem," *Journal of Rail Transport Planning & Management,* 2022.

Session 11

Maren Maus, Bastian Kogel, Fabian Schröter, Nils Nießen, Mario Fietze

---

Autoren

Maus, Maren

Maren Maus studierte bis 2020 Physik an der RWTH Aachen und arbeitet seitdem als Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Verkehrswissenschaftlichen Institut der RWTH Aachen im Bereich Eisenbahnbetriebswissenschaft.

Kogel, Bastian

Dr.-Ing. Bastian Kogel ist seit 2009 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Verkehrswissenschaftlichen Institut der RWTH Aachen, wo er seit 2014 zusätzlich die Funktion der Institutsvertretung innehat. Nach dem Studium des Bauingenieurwesens an der RWTH Aachen war er als Team- und Projektleiter im Bereich Technologie der DB Netz AG tätig.

Schröter, Fabian

Fabian Schröter studiert Verkehrsingenieurwesen und Mobilität an der RWTH Aachen und war bis 2023 Wissenschaftliche Hilfskraft am Verkehrswissenschaftlichen Institut der RWTH Aachen.

Nießen, Nils

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Nils Nießen leitet seit 2013 das Verkehrswissenschaftliche Institut der RWTH Aachen. Nach dem Studium des Bauingenieurwesens und der Wirtschaftsgeographie an der RWTH Aachen promovierte er dort 2008. Anschließend war er Projektingenieur bei HaCon und Geschäftsführer der VIA Consulting & Development GmbH.

Fietze, Mario

Mario Fietze studierte Physik und Verkehrswissenschaften an der TU-Dresden. Er bearbeitet als Forschungsreferent beim Deutschen Zentrum für Schienenverkehrsforschung Fragen zu den Themen Bahnenergieversorgung, Leit- und Sicherungstechnik sowie zur Kapazität des Schienennetzes.

IRSA 2023

SESSION 12

KAPAZITÄTSMANAGEMENT II

CAPACITY MANAGEMENT II

Session 12
Jan Eisold, Frank Maciejewicz, Oliver Freitag

Entwicklung eines Dimensionierungsverfahrens für Zugbildungsbahnhöfe auf Basis der mathematischen Optimierung

Eisold, Jan[1]; Maciejewicz, Frank[2]; Freitag, Oliver[3]

[1]Technische Universität Dresden; Jan.Eisold@tu-dresden.de
[2]NEOMOBIL; Frank.Maciejewicz@neomobil.eu
[3]NEOMOBIL; Oliver.Freitag@neomobil.eu

Zusammenfassung

Vor dem Hintergrund notwendiger Kapazitätssteigerungen im Eisenbahnverkehr kommt auch der eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Untersuchung (EBWU) von Zugbildungsbahnhöfen eine wachsende Bedeutung zu. Einen Schwerpunkt bildet dabei die optimale Gestaltung und Dimensionierung der Infrastruktur für künftige Leistungsanforderungen. Die bislang in der EBWU verfügbaren Verfahren stoßen hierbei jedoch insbesondere bei der Betrachtung komplexerer Betriebsstellen an ihre Grenzen. Neuartige Verfahren auf Basis der mathematischen Optimierung können diese Grenzen überwinden und damit einen wesentlichen und notwendigen Beitrag zur Weiterentwicklung der Verfahrenslandschaft für EBWU und die Lösung aktueller Fragestellungen liefern.

Keywords: EBWU, Knoten, mathematische Optimierung, Rangierbahnhof, Zugbildung

1 Einleitung

Um die ehrgeizigen Ziele der Verkehrs- und Klimapolitik umzusetzen ist eine deutliche Steigerung der Verkehrsleistung im Eisenbahnverkehr erforderlich. Dies führt zu einer erheblichen Zunahme der Zugfahrten im Netz, da insbesondere auf den heute bereits hoch belasteten Korridoren die technisch möglichen Restriktionen für die maximale Länge und Last von Güterzügen oft bereits weitgehend ausgeschöpft werden und im Reiseverkehr das Angebot maßgeblich auch durch Taktverdichtungen erhöht werden soll. Der somit an vielen Stellen notwendige grundlegende Kapazitätsausbau der Eisenbahninfrastruktur betrifft dabei jedoch nicht nur die Strecken, sondern ebenso auch die zugehörigen Knoten.

In diesem Kontext besitzen die Zugbildungsbahnhöfe des Reise- und Güterverkehrs eine entscheidende Bedeutung, denn zur Durchführung der zunehmenden Zahl von Zugfahrten auf den Strecken sind in gleichem Maße auch entsprechende Prozesse für die Bildung, Behandlung und Auflösung der Züge sowie die Abstellung, Reinigung und Instandhaltung der benötigten Fahrzeuge umzusetzen. Da die bestehenden Zugbildungsbahnhöfe jedoch gerade in den heute schon hoch belasteten Bereichen des Eisenbahnnetzes oftmals ebenfalls bereits an ihre kapazitiven Grenzen gelangt sind, besteht ein erheblicher Bedarf im Aus- und Neubau entsprechender Anlagen.

2 Eisenbahnbetriebswissenschaftliche Untersuchungen beim Aus- und Neubau von Zugbildungsbahnhöfen

Die zukunfts- und marktfähige Gestaltung der Zugbildungsbahnhöfe erfordert auf Grund der hohen betrieblich-infrastrukturellen Komplexität und der Langlebigkeit der Anlagen eine optimale Gestaltung von Betriebsprozessen und Infrastruktur. Eine zentrale Fragestellung bei Neu- und Ausbauvorhaben stellt vor allem die Dimensionierung und Gestaltung der Gleisanlagen dar. Daraus ergibt sich ein Anwendungsschwerpunkt für eisenbahnbetriebswissenschaftliche Untersuchungen (EBWU) in Zugbildungsbahnhöfen.

Allerdings sind die bisher hierfür verfügbaren Werkzeuge nur bedingt in der Lage, diese Fragestellung für komplexe Zugbildungsbahnhöfe im erforderlichen Maße zu bearbeiten: Während die Anwendung der Konstruktiven Methode schon auf Grund des hohen Aufwands und der eingeschränkten Szenarienfähigkeit praktisch ausscheidet, können mathematisch-analytische Verfahren die komplexen betrieblich-infrastrukturellen Abhängigkeiten schlicht nicht in der notwendigen Tiefe abbilden und sind somit nur für eine isolierte Untersuchung einzelner Teilprobleme geeignet. Überdies sind die heute für EBWU etablierten Simulationswerkzeuge häufig nicht für eben diesen Untersuchungsfall, sondern vor allem für die Simulation der Betriebsdurchführung auf Strecken und in Teilnetzen ausgelegt, wobei die Prozesse in den Zugbildungsbahnhöfen bestenfalls vereinfacht abgebildet werden. Zudem können mit der Simulation höchstens iterativ geeignete Infrastrukturkonstellationen ermittelt werden, während eine zielgerichtete optimale Gestaltung und Dimensionierung der Infrastruktur nicht möglich ist. Dies trifft auch auf Simulationswerkzeuge ohne speziellen EBWU-Zuschnitt zu, die unter mehr oder weniger starker Vereinfachung der tatsächlichen eisenbahnbetrieblichen Zusammenhänge gelegentlich für bestimmte Fragestellungen im Zusammenhang mit Zugbildungsbahnhöfen genutzt werden.

Es besteht somit die Notwendigkeit zur Weiterentwicklung der EBWU-Verfahren für Zugbildungsbahnhöfe. Einen erfolgversprechenden Ansatz dafür bietet die Nutzung der mathematischen Optimierung. Insbesondere für betriebliche Untersuchungen in Zugbildungsbahnhöfen konnten damit bereits erste Verfahren entwickelt und in den Praxiseinsatz überführt werden [1], [2]. Auf Basis der dabei gewonnenen Erkenntnisse befindet sich gegenwärtig ein Verfahren zur Infrastrukturbemessung in Zugbildungsbahnhöfen in der fortgeschrittenen Entwicklung.

3 Neues EBWU-Verfahren für Zugbildungsbahnhöfe: DimA

3.1 Zielstellung und Randbedingungen

Grundansatz des neuen Verfahrens zur Dimensionierungsanalyse für Anlagen des Schienengüterverkehrs (DimA) ist die mathematische Optimierung der Gleisanzahl nach einer gegebenen Zielfunktion. Anwendungsfeld ist dabei die optimale Bemessung und Gestaltung der Infrastruktur in Zugbildungsbahnhöfen für Aus- und Neubauvorhaben in der strategischen Planungsebene. Dabei kann auf bestehende Ansätze aus der taktischen Betriebsplanung (also der Ermittlung des notwendigen Ressourceneinsatzes zur Erfüllung konkreter Leistungsanforderungen bei vorgegebener Infrastruktur) aufgebaut werden, die bereits erfolgreich in den Praxiseinsatz überführt wurden [1].

Im Gegensatz zur taktischen Betriebsplanung ergeben sich für die Anwendung der DimA jedoch deutlich abweichende Zielstellungen und Randbedingungen:

1. Die (optimale) Infrastruktur ist nicht gegeben, sondern soll ermittelt werden. Hierfür sind lediglich *mögliche* Konfigurationen von Gleisen und Gleisgruppen sowie ggf. bestimmte obere Schranken für die Gleisanzahl bekannt.
2. Die Bemessung der optimalen Anzahl von Personalen und Betriebsmitteln ist keine Zielstellung, stattdessen kann auf die Abbildung ihres Einsatzes verzichtet werden, so lange sich aus diesem keine signifikanten Engpässe für den Betrieb des jeweiligen Zugbildungsbahnhofs ergeben[1].
3. Es liegen typischer Weise keine genau definierten Leistungsanforderungen und insbesondere keine konkreten Fahrpläne vor, da diese in der strategischen Planungsebene noch nicht bekannt sind.

[1] Sofern bestimmte Ressourcen nur in begrenzter Anzahl zur Verfügung stehen, sind diese und die entsprechenden Betriebsprozesse detailliert abzubilden. Ein Beispiel hierfür ist die oft beschränkte maximale Anzahl an Lokomotiven, die gleichzeitig mit einem Ablaufsteuerrechner verbunden werden kann.

Weiterhin sind zwei mögliche Anwendungsfälle des neuen Verfahrens zu unterscheiden, nämlich einerseits die Ermittlung des (zusätzlichen) Infrastrukturbedarfs beim Ausbau eines bestehenden und andererseits die Bestimmung der optimalen Infrastrukturkonfiguration beim Neubau eines Zugbildungsbahnhofs. Der erstgenannte Anwendungsfall kommt derzeit deutlich häufiger vor als der zweitgenannte und zeichnet sich dadurch aus, dass die Bestandsinfrastruktur zugrunde gelegt werden muss. Darüber hinaus gehende, d. h. gegenwärtig noch nicht vorhandene oder bereits geplante, aber perspektivisch herstellbare Infrastruktur[2] wird in Form so genannter Zusatzgleise abgebildet.

3.2 Aufbau und Funktionsweise

Das Verfahren DimA besitzt drei wesentliche Bestandteile (vgl. Abbildung 1). Zunächst sind die notwendigen Eingangsdaten strukturiert zu erfassen und in einem Datenmodell abzubilden. Dieses setzt sich aus dem Anlagenmodell, dem Verkehrsmodell und dem Betriebsmodell zusammen. Es liefert die notwendigen Eingangsdaten für die nachfolgende mathematische Optimierung. Schließlich sind die dabei erzielten Ergebnisse geeignet aufzubereiten und auszuwerten.

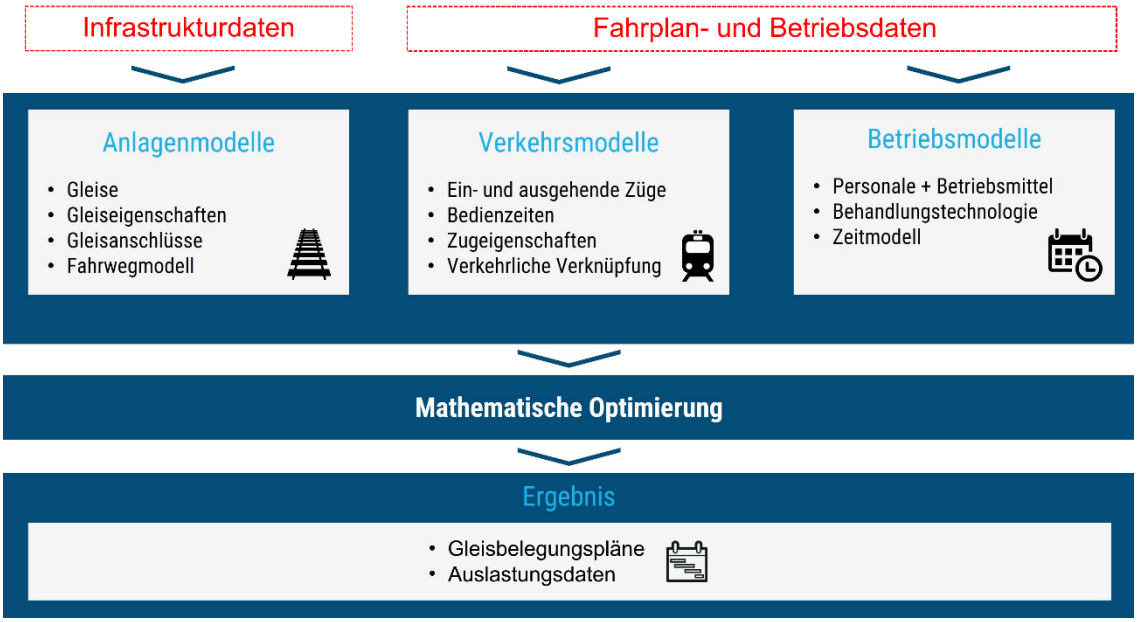


Abbildung 1: Systemschaubild zu Datenstruktur und Bestandteilen in DimA

Das Anlagenmodell erfasst die notwendigen Eigenschaften der Infrastruktur einschließlich deren spezifischer Nutzbarkeit und Erreichbarkeit. Das Verkehrsmodell beschreibt

[2] neu zu errichtende oder bezüglich Nutzbarkeits- bzw. Erreichbarkeitseigenschaften veränderte Gleise

die Leistungsanforderungen und das Betriebsmodell enthält die betriebstechnologischen Randbedingungen. Die in Anlagen- und Betriebsmodell abgebildeten Informationen werden durch die Auswertung von Planunterlagen, Analysen des Betriebsablaufs sowie ergänzende Expertengespräche gewonnen. Grundlage des Verkehrsmodells sind anlagenspezifische Zugzahlprognosen, wobei wesentliche Struktureigenschaften der Leistungsanforderungen wie Tagesganglinie, Zuglängenverteilung, Fahrrelationen, Behandlung-/Belegungsdauerverteilung usw. verkehrsartenspezifisch hinterlegt und die Anteile der einzelnen Verkehrsarten ebenfalls beschrieben sind.

Die verkehrsartenspezifische Unterteilung der Leistungsanforderungen und deren differenzierte Abbildung im Verkehrsmodell erlaubt die explizite Berücksichtigung auch sehr unterschiedlicher betrieblicher Anforderungen bei den Untersuchungen. Da hierfür getrennte Einzelwerte bzw. Werteverteilungen berücksichtigt werden können, ergibt sich eine deutlich höhere Genauigkeit als bei der Abbildung nur *eines* gesamthaften Forderungsstroms, wie er beispielsweise in analytischen EBWU-Verfahren auf Basis der Bedienungstheorie angewandt wird. Abbildung 2 zeigt exemplarisch eine mögliche verkehrsartenspezifische Unterteilung der Leistungsanforderungen in einem Zugbildungsbahnhof des Schienengüterverkehrs (vgl. auch [3]). Je nach konkretem Anwendungsfall kann eine abweichende oder ggf. noch feinere Unterteilung sinnvoll sein.

Abbildung 2: Unterteilung der Leistungsanforderungen eines Zugbildungsbahnhofs

Im Zuge der mathematischen Optimierung wird entsprechend des gewählten Ansatzes analog zur Vorgehensweise in der taktischen Betriebsplanung grundsätzlich pro Optimierungsrechnung immer die optimale Lösung für genau *einen* Fahrplan gesucht. Es handelt sich also im Kern um ein fahrplanabhängiges EBWU-Verfahren.

Bei der Anwendung der DimA in der strategischen Infrastrukturplanung stehen jedoch in der Regel keine detaillierten Fahrpläne als Eingangsgrößen zur Verfügung. Für langfristige Prognosehorizonte fehlen vielmehr üblicherweise gerade im Güterverkehr verlässliche und hinreichend strukturierte Angaben zu den zu erwartenden Verkehrsströmen

und örtlichen Betriebsprogrammen. Der sich dadurch ergebenden Unsicherheit in den künftigen Leistungsanforderungen muss daher durch Szenarienbildung und die Untersuchung von vielfältigen, aber systematisch erzeugten Fahrplanvarianten begegnet werden. Insofern ist die Optimierung der Infrastruktur anhand eines einzelnen Fahrplanes weder möglich noch ausreichend, sondern es ist im Zuge einer so genannten Mehrfachoptimierung eine Vielzahl möglicher Fahrplanvarianten zu untersuchen, die die Unsicherheiten in den Leistungsanforderungen entsprechend berücksichtigt. Dieses Konzept ist vergleichbar mit der Untersuchung von Fahrplan- oder Störungsvarianten durch Mehrfachsimulation, die ebenfalls dazu dient eine möglichst große Vielfalt möglicher Realisierungen stochastischer Einflussgrößen abzubilden und daraus statistisch belastbare Aussagen und Kenngrößen abzuleiten.

Bei der Betrachtung einer zu geringeren Anzahl von Einzelfahrplänen können statistisch selten auftretende extreme Wertekombinationen in den Eingangsdaten einzelner Fahrplanvarianten immer noch zu einer merklichen Beeinflussung der Ergebnisse führen. In der bisherigen Anwendung des Verfahrens DimA hat sich gezeigt, dass sich in der Regel bei einer niedrigen bis mittleren dreistelligen Anzahl von Einzelfahrplänen stabile Ergebnisse einstellen. Nur bei sehr komplexen Szenarien mit hoher Unsicherheit in den Eingangsdaten sind mehr Einzelfahrpläne zu untersuchen. Damit liegt die notwendige Fahrplananzahl ungefähr im selben Bereich wie bei einer Mehrfachsimulation.

In DimA wird für jedes zu untersuchende Szenario mit Hilfe eines Generators die notwendige Zahl von Einzelfahrplänen erzeugt. Dabei werden entsprechend der abstrakten Beschreibung des Verkehrsmodells konkrete Züge bzw. Rangierfahrten mit entsprechenden Eigenschaften generiert und verkehrlich miteinander verknüpft[3]. Diesen können dann unter Nutzung des Betriebsmodells auch die entsprechenden Behandlungsprozesse bzw. Infrastrukturbelegungen sowie deren Zeitdauern zugeordnet werden.

Im Rahmen der mathematischen Optimierung werden danach für die Einzelfahrpläne jeweils Gleisbelegungspläne erzeugt, die entsprechend der jeweiligen Zielfunktion optimal sein sollen. Sie zeigen die Bedarfe an vorhandenen bzw. geplanten Gleisen oder Zusatzgleisen auf und können statistisch je Szenario über alle Einzeloptimierungsrechnungen ausgewertet werden. Neben der benötigten Gleisanzahl je Kategorie und deren Auslastung lassen dabei je nach gewählter Zielfunktion ggf. noch weitere Kenngrößen ableiten, die letztlich die Grundlage für eine Entscheidungsunterstützung zum erforderlichen Aus- bzw. Neubau der Infrastruktur darstellen.

[3] Zum Beispiel zur Abbildung geplanter Wagen- oder Triebfahrzeugübergänge.

3.3 Mathematische Modellierung

Entsprechend der veränderten Zielstellungen und Randbedingungen kann der mathematische Modellansatz aus der taktischen Betriebsplanung nicht unverändert für die DimA übernommen werden, sondern ist zu modifizieren. Die grundlegende Berücksichtigung der betriebstechnologischen Abhängigkeiten in einem Zugbildungsbahnhof, wie Sie beispielsweise in dem mathematischen Optimierungsmodell nach *Preis et al.* formuliert sind [4], muss auch in der strategischen Planungsebene erfolgen.

Betriebsmittel und Personale müssen hingegen nur noch in wenigen Fällen, oftmals gar nicht mehr modelliert werden. Damit einhergehend kann die Abbildung der Betriebsprozesse vereinfacht werden, da statt aller Einzelprozesse, die sich in der Zuweisung zu unterschiedlichen Betriebsmitteln bzw. Personalen unterscheiden, praktisch nur noch die resultierenden Belegungen der Infrastruktur berücksichtigt werden müssen. Somit können aufeinander folgende Einzelprozesse im selben Gleis zu *Gleisnutzungen* zusammengefasst werden. Dies reduziert den Umfang der Variablen und Nebenbedingungen gegenüber der taktischen Betriebsplanung erheblich.

In den bisherigen Anwendungsfällen lag die Anzahl der Variablen je Einzelfahrplan im vier- bis fünfstelligen Bereich. Hierbei wurde jeweils das Mengengerüst über mehrere Verkehrstage abgebildet und untersucht. Je nach Problemumfang, Szenario und genutzter Rechentechnik ergeben sich dabei pro Einzelfahrplan unterschiedliche Rechenzeiten für die Optimierung. In vielen bisherigen Anwendungsfällen konnten die Einzelfahrpläne auf einem leistungsfähigen PC in wenigen Minuten optimal gelöst werden. Teilweise treten jedoch, insbesondere bei Szenarien mit hoher betrieblicher Komplexität, auch bei der Nutzung noch leistungsfähigerer Rechentechnik deutlich größere Rechenzeiten auf. Die weitere Reduzierung der Rechenzeiten stellt damit immer noch eine wesentliche Aufgabe für die künftige Verbesserung des Verfahrens dar.

Ausgehend von den (makroskopischen) Einzelprozessen sind bei der Ermittlung der Dauer einer Gleisnutzung nicht nur die Dauern der Einzelprozesse aufzusummieren, sondern auch dazwischen zu erwartende Wartezeiten auf die weitere Behandlung zu berücksichtigen[4]. Diese sind zumindest vereinfacht unter Berücksichtigung des zu erwartenden Betriebsmittel- und Personaleinsatzes sowie der Belegung der maßgeblichen Fahrstraßenknoten und der anschließenden Streckengleise abzuschätzen. Für bestehende Bahnhöfe ist bei gleichbleibender Art der Zugbehandlung alternativ auch eine Hochrechnung anhand der im Betrieb gemessenen Verteilungen von Gleisnutzungsdauern

[4] Bei einer vollständigen Modellierung aller Ressourcen ergäben sie sich direkt in der Lösung des Modells.

möglich. In beiden Fällen ergeben sich verkehrsartenspezifische Verteilungen der Gleisnutzungsdauern, die entsprechend im Verkehrsmodell hinterlegt werden.

In die Zielfunktion gehen nur noch Merkmale der Infrastruktur, nicht jedoch der Betriebsmittel oder Personale ein. Im einfachsten Fall werden die spezifischen Kosten der genutzten Gleise aufsummiert. Es können jedoch auch weitere Kriterien berücksichtigt werden, was bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen ist und ggf. zu unterschiedlichen Optimierungsstrategien führt.

Bisher wurden in DimA drei verschiedene Zielfunktionen (jeweils als Minimierungsproblem) angewandt:

Tabelle 1: Bisher in DimA angewandte Zielfunktionen

Bezeichnung	Formulierung
Gleisanzahl	Bewertung aller Gleise mit individuellen Kostensätzen, bei Untersuchungen des Ausbaubedarfs erhalten i. d. R. nur die Zusatzgleise Kosten
Gleisnutzungen Anzahl	Bewertung der Anzahl von Gleisnutzungen auf den dafür ausgewählten Gleisen (z. B. nur auf den Zusatzgleisen)
Gleisnutzungen Dauer	Bewertung der Belegungsdauer auf den dafür ausgewählten Gleisen (z. B. nur auf den Zusatzgleisen)

Die Zielfunktion "Gleisanzahl" minimiert die Anzahl der benötigten Gleise bezüglich der Gleisnutzungskosten. Bei den für jedes Gleis hinterlegten Kosten handelt es sich um fixe Kosten. Sobald ein Gleis zu einem beliebigen Zeitpunkt für eine beliebige Dauer genutzt wird, fallen die für dieses Gleis hinterlegten Kosten an. Die Betrachtung von gleisfixen Kosten führt dazu, dass ein einmal genutztes Gleis mit beliebig vielen weiteren Gleisnutzungen belegt werden kann, ohne dass sich dadurch der Zielfunktionswert erhöht, auch wenn für diese Gleisnutzungen andere Gleise zur Verfügung stünden. Es erfolgt somit keine Minimierung der Belegungen auf einem Gleis. Somit ist es nicht möglich, belastbare Aussagen darüber zu treffen, für wie viele Gleisnutzungen ein Gleis wirklich mindestens benötigt wird. Kurzzeitige Belastungsspitzen einer Gleisgruppe führen damit vermeintlich zu einem erhöhten Gleisbedarf über den gesamten Betrachtungszeitraum.

Die Zielfunktion "Gleisnutzungen Anzahl" minimiert die Anzahl der Gleisnutzungen auf Gleisen mit Kosten größer null. Bei den für ein Gleis hinterlegten Kosten handelt es sich um Kosten, die je Gleisnutzung anfallen. Es wird also nicht das pauschale Nutzen eines Gleises bestraft, sondern jede einzelne Belegung eines Gleises. Da jede weitere Gleisnutzung zu einer Erhöhung des Zielfunktionswertes führt, wird ein genutztes Gleis nicht

mehr mit beliebig vielen weiteren Gleisnutzungen belegt, für die günstigere Gleise zur Verfügung stehen. Dies ermöglicht eine deutlich bessere Einschätzung der Auslastung vor allem von Zusatzgleisen als mit der Zielfunktion „Gleisanzahl“. Allerdings werden mit dieser Zielfunktion lange Gleisnutzungen auf einem Gleis genauso bewertet wie kurze, was dazu führt, dass auf Gleisen mit hohen Kostensätzen vorzugsweise lange Gleisnutzungen geplant werden.

Die Zielfunktion "Gleisnutzungen Dauer" minimiert die Dauer der Gleisnutzungen auf Gleisen mit Kosten größer null. Bei den für ein Gleis hinterlegten Kosten handelt es sich um Kosten, die je Zeiteinheit einer Gleisnutzung anfallen. Jede weitere Zeiteinheit einer solchen Gleisnutzung erhöht also den Zielfunktionswert. Die Verwendung dieser Zielfunktion führt zu einer weiteren Verbesserung der Aussagekraft der Berechnungsergebnisse. Der Zusatzgleisbedarf kann somit vor allem bezogen auf die zeitliche Auslastung der erforderlichen Zusatzgleise noch realistischer bewertet werden.

3.4 Anwendung des Verfahrens und Interpretation der Ergebnisse

Die Auswahl der zu nutzenden Zielfunktion ist von der Aufgabenstellung des jeweiligen Untersuchungsfalls abhängig. Hierbei ist relevant, ob konkrete Machbarkeitsuntersuchungen erfolgen sollen oder die Ermittlung geeigneter Infrastruktureigenschaften hinsichtlich Anzahl, Länge, Anbindung etc. durchzuführen ist.

Die Resultate der Optimierungsrechnungen können nach verschiedenen Gesichtspunkten ausgewertet werden. In Anlehnung an die in der DB-Richtlinie 405 definierte Wartewahrscheinlichkeit vor Gleisgruppen (vgl. Modul 0403 Abschnitt 5(8) und 7(6) in [5]) kann beispielsweise der Anteil nicht realisierbarer Gleisnutzungen über alle Einzelfahrpläne berechnet werden, indem die Gleisnutzungen ausgewertet werden, die nur auf (weiteren) Zusatzgleisen realisierbar sind. Die Wirksamkeit von Ausbaumaßnahmen kann in diesem Kontext durch vergleichende Analyse des Anteils nicht realisierbarer Gleisnutzungen je Ausbauszenario bewertet werden (vgl. Abbildung 3). Liegt der Anteil bei 0%, können alle Gleisnutzungen nachfragegerecht eingeplant werden.

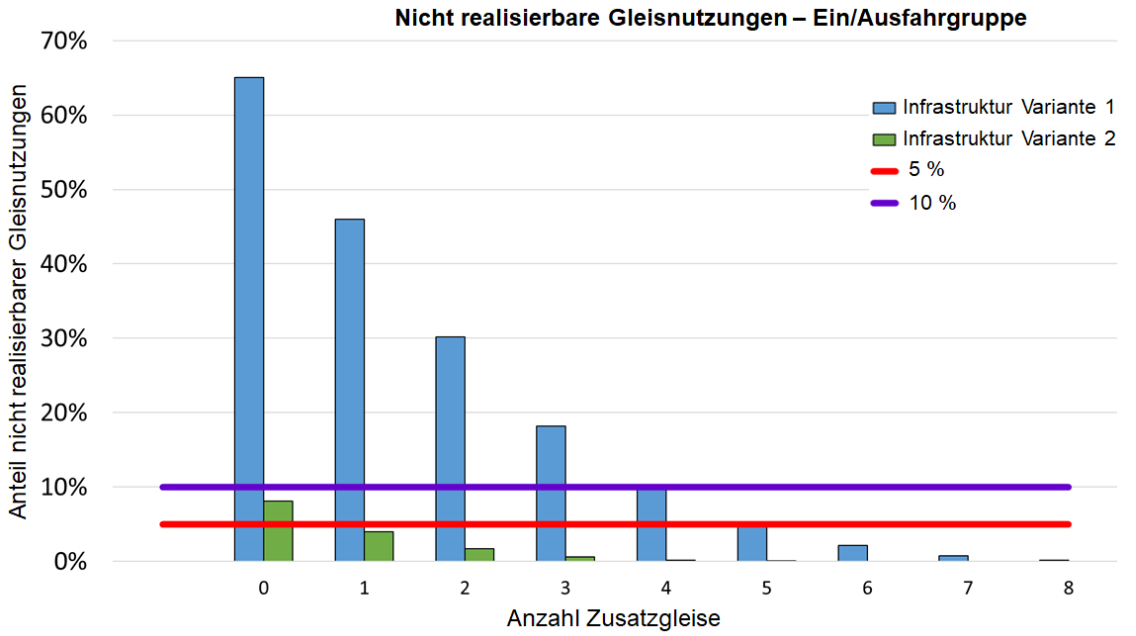


Abbildung 3: Anteil nicht realisierbarer Gleisnutzungen über der Anzahl Zusatzgleise

Hierbei ist allerdings hervorzuheben, dass der mit DimA ermittelbare Anteil nicht realisierbarer Gleisnutzungen inhaltlich nicht identisch mit der Wartewahrscheinlichkeit vor einer Gleisgruppe ist, wie sie mit Verfahren der Bedienungstheorie bestimmt werden kann. Dies muss bei der Interpretation der Ergebnisse und der Übertragung etablierter Qualitätsmaßstäbe (vgl. Modul 0401 Abschnitt 4.4 in [5]) auf das neue Verfahren berücksichtigt werden. Bezüglich der Vergleichbarkeit beider Kenngrößen in Abhängigkeit der gewählten Zielfunktion sowie zusätzlicher Randbedingungen besteht gegenwärtig noch weiterer Forschungsbedarf.

Aus den Optimierungsergebnissen können weiterhin Auslastungswerte aller berücksichtigten Infrastrukturelemente bestimmt werden. Für die Bewertung der Auslastung von Gleisen und Gleisgruppen sind vorhandene Qualitätsmaßstäbe in Form zulässiger maximaler Belegungsgrade anwendbar, wie sie beispielsweise in [6] benannt werden. Generell besteht jedoch – verfahrensunabhängig – noch ein gewisser Forschungsbedarf zur Konkretisierung und Eichung der entsprechenden Zusammenhänge zwischen Auslastung und Qualität in Gleisgruppen, sodass gegenwärtig nur recht grobe Auslastungsgrenzen zur Interpretation der Ergebnisse einer DimA verfügbar sind.

Die elementbezogenen Auslastungswerte lassen in weiterführender Analyse jedoch weitergehende Aussagen zu, ob ein Gleis bzw. ob Gleise einer Gleisgruppe unter den Nebenbedingungen des Szenarios benötigt werden. Sinkt beispielsweise bei konstanten oder wachsenden Zugzahlen die Auslastung der vorhandenen Gleise, lässt sich häufig

schlussfolgern, dass diese eine geringere Eignung für das untersuchte Szenario besitzen. Sinkt die Auslastung von Bestandsgleisen bspw. durch zwingende Verlagerung von längeren Zügen auf lange Zusatzgleise, könnten die kaum oder nicht ausgelasteten Bestandsgleisachsen ggf. zur Umsetzung der ermittelten Zusatzgleisbedarfe herangezogen werden (vgl. Abbildung 4). Dies wäre dann nachgelagert trassierungstechnisch zu untersuchen.

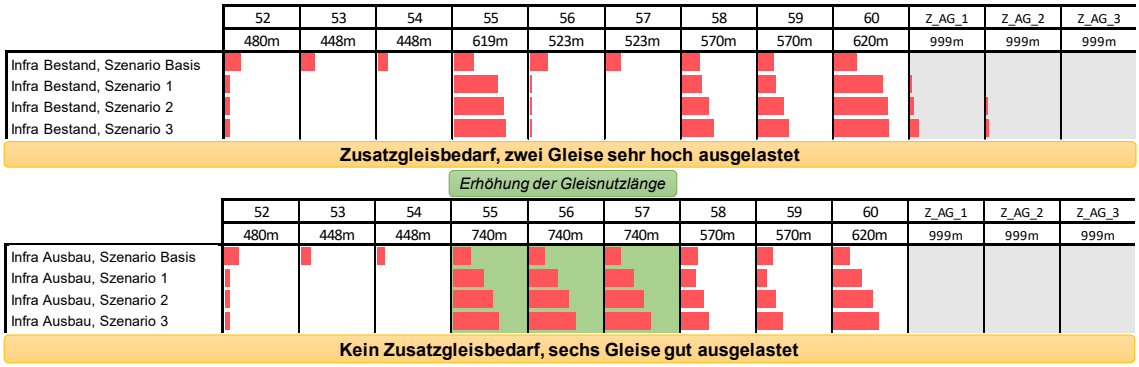


Abbildung 4: Darstellung von Auslastung und Zusatzgleisbedarf je Szenario

Somit dienen die Dimensionierungsergebnisse nicht nur zur Ausweisung von Gleisbedarfen, sondern bieten auch Möglichkeiten, die Nutzung bestehender Gleise bzw. Gleisachsen in den Anlagen in die Entscheidungsfindung einzubeziehen.

Insgesamt konnten die bisherigen Anwendungen des neuen Verfahrens DimA auf reale Untersuchungsfälle (vgl. [7]) die gestellten Erwartungen durchweg erfüllen. So zeigten sich vor allem in komplexen Betriebsstellen die Vorteile gegenüber den bisher verfügbaren bedienungstheoretischen und simulativen EBWU-Verfahren deutlich. Somit konnten nicht nur wertvolle Erkenntnisse zur Weiterentwicklung des neuen Verfahrens selbst gewonnen, sondern ebenso bereits ein praxiswirksamer Nutzen für die Weiterentwicklung von Zugbildungsbahnhöfen des Schienengüterverkehrs entfaltet werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Das Verfahren zur Dimensionierungsanalyse für Anlagen des Schienengüterverkehrs (DimA), welches sich auf Basis des vorgestellten wissenschaftlichen Ansatzes bei NEOMOBIL und der DB Netz AG in Nutzung und Weiterentwicklung befindet, kann auf unterschiedliche Fragestellungen angepasst werden. Die erzielten Ergebnisse zeigen, dass eine Gleisbelegungsanalyse mit diesem Detailgrad und den entsprechenden Szenarien sehr gut geeignet ist, die Belange der regionalen Infrastrukturentwicklung zu erfüllen sowie die Verfahrenslandschaft der EBWU sinnvoll zu ergänzen.

Zusätzlich zu den laufenden und geplanten Analysen besteht das Ziel, das Verfahren der Dimensionierungsanalyse in die internen Regelwerke und Richtlinien der DB Netz AG einzubringen, zu verankern und langfristig vorzuhalten. Hierzu ist neben der Weiterentwicklung des Verfahrens selbst auch noch Forschungsarbeit bezüglich der Festlegung geeigneter Qualitätsmaßstäbe zu leisten. Mittelfristig besteht zudem die Absicht, das Verfahren ebenso für Anlagen des Schienenpersonenverkehrs einzusetzen.

Hervorzuheben ist ferner das Potential zur weiteren Automatisierung der EBWU in Knoten. Zwar kann die Vorbereitung, Lösung und Auswertung der Optimierungsrechnungen bereits automatisch erfolgen. Insbesondere bei der Zusammenstellung der notwendigen Eingangsdaten für konkrete Untersuchungsfälle besteht jedoch gegenwärtig noch ein hoher manueller Arbeitsanteil. Dieser kann perspektivisch vor allem durch eine weitergehende Digitalisierung der entsprechenden Eingangsdaten und die Verbesserung der systemübergreifenden Datenschnittstellen reduziert werden.

Literatur

[1] Eisold, Jan: *Eisenbahnbetrieblich basiertes Verfahren zur robusten Betriebsplanung in Zugbildungsbahnhöfen*. Dissertation. TU Dresden, 2020.

[2] Eisold, Jan; Freitag, Oliver: *Weiterentwicklung der eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Verfahren für Zugbildungsbahnhöfe durch Nutzung der mathematischen Optimierung.* In: Tagungsband zum 3. International Railway Symposium Aachen 2021, S. 449-461.

[3] Eisold, Jan; Freitag, Oliver; König, Rainer: *Innovationsfeld Zugbildungsanlage: Potenziale und Anforderungen der automatisierten Planung von Zugbildungsprozessen*. Beitrag zu den 25. Verkehrswissenschaftlichen Tagen an der Technischen Universität Dresden, Dresden 2016.

[4] Preis, Henning; König, Rainer: *Innovationsfeld Zugbildungsanlage: Modellentwicklung für eine optimierte Betriebsplanung*. Beitrag zu den 25. Verkehrswissenschaftlichen Tagen an der Technischen Universität Dresden, Dresden 2016.

[5] DB Netz AG (Hrsg.): *Richtlinie 405: Fahrwegkapazität*. 2008.

[6] UIC (Hrsg.): *Code 406: Kapazität (2. Ausgabe)*. 2013.

[7] Freitag, Oliver; Konovalow, Olga; Speer, Simon; Meissner, Laura: *Entscheidungsunterstützung zur nachfragegerechten Dimensionierung von Anlagen des Schienengüterverkehrs.* In: Eisenbahntechnische Rundschau, 69(2020) H. 7-8, S. 44-48.

Session 12
Jan Eisold, Frank Maciejewicz, Oliver Freitag

Autoren

Eisold, Jan

Jan Eisold studierte Verkehrsingenieurwesen an der TU Dresden und ist dort seit dem Jahr 2012 als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur für Bahnverkehr, öffentlicher Stadt- und Regionalverkehr tätig. Im Jahr 2020 konnte er seine Promotion erfolgreich abschließen. Seine Arbeitsschwerpunkte liegen in den Bereichen Eisenbahnbetriebswissenschaften und Schienengüterverkehr, in denen er in Lehre und Forschung wirkt.

Maciejewicz, Frank

Frank Maciejewicz studierte Bahnsystemingenieurwesen an der TU Dresden. Nach Tätigkeiten an der TU Dresden und bei der norwegischen Eisenbahndirektion betreut er derzeit Projekte zur Infrastrukturdimensionierung und Softwareentwicklung bei NEOMOBIL.

Freitag, Oliver

Oliver Freitag ist Gründer und Geschäftsführer von NEOMOBIL, einem Consulting- und IT-Dienstleister für Akteure des Schienenverkehrs. Nach einem Studium des Verkehrsingenieurwesens und einer Beschäftigung als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur für Bahnverkehr, öffentlicher Stadt- und Regionalverkehr der TU Dresden engagiert er sich gegenwärtig für die Neuentwicklung von Verfahren und Software im Bereich der Bahnbetriebsplanung und -steuerung.

Session 12
Maike Krips, Norman Weik, Christian Meirich

Untersuchung der Leistungsfähigkeit von Fahrstraßenknoten im Regel- und Störfall – Entwicklung einer Methodik zur vergleichenden Analyse von Infrastrukturplanungsparadigmen in Europa

Krips, Maike[1], Weik, Norman[1,2], Meirich, Christian[1]

[1]DLR Institut für Verkehrssystemtechnik,
Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig
[2]Professur für Planung und Betrieb von Schienenverkehrssystemen,
TU München, Parkring 35-39, 85748 Garching b. München

Zusammenfassung

In Anbetracht steigenden Verkehrsaufkommens auf der Schiene sowie im Zuge der Umsetzung attraktiver Fahrplankonzepte mit guten Umstiegsbeziehungen kommt der (Neu-)Gestaltung der Ein- und Ausfahrbereiche in Knotenbahnhöfen übergeordnete Bedeutung für die Machbarkeit und Pünktlichkeit des Betriebs zu. Im vorliegenden Beitrag werden vor diesem Hintergrund Infrastrukturplanungsparadigmen für Fahrstraßenknoten in verschiedenen Ländern verglichen und ein Ansatz vorgestellt, um diese in Hinblick auf Ihre Leistungsfähigkeit und Bedarfsgerechtigkeit im Regel- und Störbetrieb zu untersuchen. Mit der vorgestellten Methodik soll ein Beitrag geleistet werden, um Best Practices für die zukünftige Gestaltung von Knoten vor dem Hintergrund stark vertakteter Fahrplankonzepte wie des Deutschland-Takts zu identifizieren und zu bewerten.

Keywords: Leistungsfähigkeit, Infrastrukturplanung, Fahrstraßenknoten, Bahnhöfe, vergleichende Bewertung

1 Einleitung

Im Rahmen der Bewertung der Eisenbahninfrastruktur sind mit der wechselseitigen Abhängigkeit von Fahrplankonzept und Infrastruktur grundsätzliche Fragestellungen der Kapazitätsplanung verknüpft, welche gerade in Anbetracht der aktuell in Deutschland verfolgten Transition hin zu einem fahrplangetriebenen Infrastrukturplanungsansatz detaillierter Analyse bedürfen. Besonders in Hinblick auf die Gestaltung von Fahrstraßenknoten in Bahnhöfen ergibt sich hier für die Umsetzung kundenorientierter Fahrplankonzepte mit attraktiven Umstiegsmöglichkeiten für die Fahrstraßenplanung und Gleisgestaltung von Personenbahnhöfen Anpassungs- und Forschungsbedarf.

Historisch haben sich für die Gestaltung von Fahrstraßenknoten in Bahnhöfen unterschiedliche Herangehensweisen und Planungsparadigmen entwickelt: Während in Deutschland ein infrastrukturzentrierter Ansatz vertreten wurde, welcher die gegenseitige Vertretbarkeit von Bahnhofsgleisen in den Vordergrund stellt, liegt der Fokus in anderen Ländern schon seit Längerem auf anderen Zielen wie der Maximierung von Parallelfahrmöglichkeiten (Schweiz) bzw. einer weitgehenden Reduktion von Gleisanlagen auf betriebliche notwendige Fahrbeziehungen nach japanischem Vorbild (Niederlande) mit dem Ziel der Ausfallprävention [1].

In der vorliegenden Arbeit wird eine Methodik entwickelt, welche die mit unterschiedlichen Planungsparadigmen einhergehenden betrieblichen Effekte im Regel- und Störfall aufzeigen kann. Ziel des Ansatzes ist eine skalierbare gesamtheitliche Analyse der Gestaltungsparameter von Bahnanlagen, welche Planungsprozesse von Infrastrukturanlagen in Personenbahnhöfen unterstützt.

Im Rahmen eines weitgehend automatisierbaren Open Data-Ansatzes, welcher unabhängig von landesspezifischen Nomenklaturen in Hinblick auf, z.B., Betriebsstellenabgrenzungen oder -bezeichnungen anwendbar ist, wird zunächst die vorhandene Gleisinfrastruktur in einzelne Regionen bzw. Einzugsbereiche von Bahnhöfen zerlegt und die zugehörige Infrastruktur selektiert. Innerhalb des Bahnhofsbereich werden Gleise, Haltepositionen und Nutzlängen aus den topologischen bzw. topographischen Eigenschaften der Gleisanlagen identifiziert. Für den Vergleich der Charakteristika von Gleislayouts werden anschließend Kennwerte von Infrastrukturelementen, wie etwa die Anzahl und relative Lage bzw. Distanz von Weichen und Kreuzungen berechnet.

Darüber hinaus erfolgt eine Identifikation der topologisch möglichen Fahrwege, sowie die Analyse der vorhandenen Fahrtenausschlüsse bzw. Parallelfahrmöglichkeiten gewichtet mit dem aus dem Fahrplan extrahierten Betriebsprogramm (vgl. [2]). Basierend

auf einer Fahrtenumlegung des Fahrplankonzepts wird die Nutzung von Gleisanlagen sowie die vorhandene Robustheit im Regel-(Fahrplan)betrieb mittels analytischer (d.h. hier algebraischer) Kennziffern gemessen und mit den Ergebnissen von Betriebssimulationen verglichen. Anschließend wird die Kritikalität von Infrastrukturausfällen bzw. der Nicht-Verfügbarkeit von Weichen bzw. Gleisabschnitten ebenfalls auf Basis eines simulativen Ansatzes untersucht und verglichen. Im Ergebnis kann die betriebliche Robustheit im Regel- und Störfall bestimmt und mit der Komplexität und den Unterhaltskosten von Gleislayouts verglichen werden.

Für die Analyse der Gleisinfrastruktur werden drei internationale Fallbeispiele auf Basis der Gleislayouts von Braunschweig Hbf, des Bahnhofes Olten (CH), sowie des Bahnhofs Arnhem Centraal (NL) untersucht (vgl. Abbildung 1). In allen drei Fällen handelt es sich um mittelgroße Bahnhöfe vergleichbarer Größe und Gleisanzahl mit Streckenverknüpfungsfunktion, sodass eine aussagekräftige vergleichende Evaluierung der Designparameter durchgeführt werden kann. Anschließend wird der methodische Ansatz zur Analyse der Betriebsqualität im Regel- und Störfall anhand des Beispiels Braunschweig Hbf angewandt und demonstriert.

Die Darstellung der Untersuchung ist dabei in 4 Bereiche untergliedert: In Kapitel 2 wird zunächst der aktuelle Stand der Technik in Bezug auf die Gestaltung und Bewertung von Knoteninfrastrukturen aufgearbeitet. Anschließend wird in Kapitel 3 der methodische Ansatz vorgestellt und die Schritte hin zu einer vergleichenden Evaluierung unterschiedlicher, ggf. national spezifischer, Infrastrukturvarianten erläutert. Kapitel 4 schließlich beinhaltet die Auswertung der jeweiligen Charakteristika von Bahnhofsinfrastrukturen sowie die Ergebnisse der simulationsbasierten Bewertungsmethodik für die Betriebsqualität im Regel- und Störfall. Den Abschluss des Artikels bildet eine kurze Zusammenfassung nebst Ausblick auf mögliche Modellerweiterungen und Untersuchungsinhalte zur Unterstützung der Infrastrukturgestaltung.

2 Stand der Technik

Während die Leistungsfähigkeit sowie das Leistungsverhalten von Eisenbahnstrecken sowohl im nationalen als auch im internationalen Kontext inzwischen als gut erforscht und verstanden gilt, stellt sich die Modellierung von Knotenbereichen aufgrund der Komplexität der Vernetzung von Zugfahrten sowie der unterschiedlichen Segmentierungsmöglichkeiten von Knoten als weitgehend nicht standardisiert dar. Im deutschen Kontext wird bei der Untersuchung von Knoten zwischen Gleisgruppen und (Gesamt-) Fahrstraßenknoten, welche die Ein-/Ausfahrbereiche der jeweiligen Betriebsstelle

bezeichnen, unterschieden (vgl. [3]). Während für Gleisgruppen auf Potthoff bzw. Hertel zurückgehende Ansätze basierend auf Warteschlangenmodellen [2, 4] und der Warte- bzw. Verlustwahrscheinlichkeit ([5], vgl. auch [6]) verwendet werden, liegen für die gesamtheitliche Betrachtung von Fahrstraßenknoten wenige validierte Ansätze vor.

Bestehende Ansätze verallgemeinernd, schlägt die 2. Auflage des UIC Codes 406 eine Adaption des verketteten Belegungsgrads für das Weichenvorfeld von Bahnhöfen nebst zugehöriger Schwellwerte für das Level of Service vor [7]. Vergleichbar mit existierenden Ansätzen erfolgt die Analyse auf Basis einer Desegmentierung von Knotenbahnhöfen in Gleisgruppen und die jeweiligen Geasmtfahrstraßenknoten. In [8] wird eine Anwendungsweise der Verkettungsmethodik beschrieben, welche eine infrastrukturbasierte, durch Ensemble-Mittlung von einem konkreten Fahrplankonzept abstrahierte Bewertung auf Ebene kompletter Bahnhofsknoten (unter Einbezug von Fahrplanwechselwirkungen) erlaubt. Jovanovic et al. [9] beschreiben einen Ansatz zur Analyse von parallel durchfahrbaren Zugfahrten (Kapazität), welcher die Thematik auf bekannte mathematische Optimierungsmodelle im Bereich des Färbung von Graphen zurückführt. Der Ansatz kann als eine Verallgemeinerung und methodische Fortschreibung des Potthoffschen Ansatzes auf Basis der sog. Verkettungszahl gesehen werden.

Wesentlich für die Leistungsfähigkeit von Knotenbereichen sind insbesondere Parallelfahrmöglichkeiten, welche kurze Zugfolgen bei der Ein- und Ausfahrt von Zügen zu den Taktzeiten des Knoten gestatten. Um dies zu realisieren, wurde in den vergangenen Jahrzehnten in der Schweiz, sowie den Niederlanden massiv in die Umgestaltung von Gleisvorfeldern von Knotenbahnhöfen investiert. Insbesondere in den Niederlanden wurde ein Ansatz der massiven Entflechtung der Verkehre und Vereinfachung der Weichenbereiche im Zulauf auf Knotenbahnhöfe verfolgt. Die damals ergriffenen Maßnahmen zeigen heutzutage jedoch eine geringe Störungsresilienz, da beispielsweise die rasche Bereitstellung bzw. Außerbetriebnahme von Fahrzeugen durch die geringe Flexibilität der topologischen Fahrmöglichkeiten und insbesondere der unzureichenden Anbindung von Rangier- und Abstellanlagen (vgl. z.B. Utrecht Centraal) erschwert ist.

Vor diesem Hintergrund soll im Zuge einer vergleichenden Analyse von Bahnhofslayouts ein Beitrag zu einem besseren Verständnis der Wirkweise von Infrastrukturplanungsentscheidungen in Knotenbahnhöfen geleistet werden, welcher zukünftig zur Etablierung von Best-Practices bzw. zur Vermeidung von Systemrisiken beitragen kann.

3 Vorgehensweise / Methodik

Nachfolgend wird die Vorgehensweise zur Bestimmung der infrastrukturabhängigen Belastung in den ausgewählten Knotenbahnhöfen beschrieben. Dafür werden zunächst Charakteristika von Gleislayouts identifiziert und anschließend mögliche Fahrwege sowie gegenseitige Fahrtenausschlüsse bestimmt. Die darauffolgende Erstellung eines konfliktfreien Fahrplans ermöglicht die Simulation des Bahnbetriebs im Regel- und Störfall und die Ableitung korrespondierender Qualitätskennzahlen.

3.1 Datengrundlage und Vorverarbeitung der Daten

Während gerade im europäischen Kontext seit mehreren Jahrzehnten eine Harmonisierung und Standardisierung von Planungsprozessen und Datenmanagement verfolgt wird, ist bis zum heutigen Tag eine starke Heterogenität in puncto Infrastruktur- und Betriebsdatenverfügbarkeit und -formaten zu beobachten. Auch wenn teilweise grenzübergreifend gleiche Standards (z.B. railML, GTFS für Fahrplandaten, o.ä.) genutzt werden, ergibt sich durch historisch gewachsene Datenhaltungsprinzipien und Betriebspraktiken nach wie vor eine gewisse Uneinheitlichkeit, die das Vorhaben eines länderübergreifenden Vergleichs von Planungsprinzipien erschwert. Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Studie ein Open Data-Ansatz auf Basis von Open Street Map (OSM) – Daten verfolgt, da diese weltweit zur Abbildung von Verkehrsinfrastrukturen verwendet werden. Auch wenn hierdurch individuell auf den jeweiligen nationalen Kontext bezogen, mit Sicherheit nicht die Präzision der jeweils spezifisch zum Einsatz kommenden Daten erzielt wird, ist gerade in Hinblick auf die Topologie, welche die Grundlage der vorliegenden Studie bilden, eine weitgehend vollständige und vergleichbare Datenbasis, welche konsistent prozessiert werden kann, gewährleistet.

Beim Einlesen der Daten aus dem OSM-Format werden im Zuge der Vorverarbeitung aus dem Graphen diejenigen Kanten entfernt, die als „industrial“, „spur“ oder „yard“ gekennzeichnet sind. Anschließend wird der Graph auf die größte zusammenhängende Komponente reduziert, sodass eine Fokussierung auf die für den regulären Fahrplan- bzw. Zugbetrieb relevante Infrastruktur gegeben ist. Eine (vereinfachte) Anbindung von Abstellanlagen ist weiterhin gewährleistet, sodass bei Bedarf Abstellungs- und Bereitstellungsfahrten mitmodelliert werden können.

3.2 Bestimmung von Gleislayout-Charakteristika

Um die Infrastrukturelemente in einem Gleisnetz den zugehörigen Bahnhöfen zuordnen zu können, wird das eingelesene OSM-Netz zunächst in Einzugsbereiche zerlegt. Die Zerlegung erfolgt mithilfe eines Voronoi-Diagramms [10], welches das Netz in Regionen unterteilt. Jede Region wird durch ein Polygon definiert, welches ein Bahnhofsgebäude als Zentrum enthält. Infrastrukturelemente, die sich innerhalb eines Polygons befinden, weisen die Gemeinsamkeit auf, dass ihre euklidische Distanz zum Zentrum des Polygons geringer ist als die zu jedem anderen Zentrum des Voronoi-Diagramms. Folglich sind die Einzugsbereiche im Netz über die kürzeste Entfernung zwischen Infrastrukturelementen und Bahnhofsgebäuden definiert. Um den Bahnhofsbereich vollständig abzubilden, wird bei der erstellten Methode zusätzlich das Kriterium angewandt, dass die Polygone die Einfahrsignale enthalten müssen. Ist dieses Kriterium nicht erfüllt, so werden die Polygone vergrößert.

Die Analyse der Infrastruktur sowie der Fahrplankapazität erfolgt für segmentierte Bereiche innerhalb eines Voronoi-Polygons. Dabei wird die Lage der parallelen Bahnhofsgleise anhand von geometrischen Eigenschaften ermittelt und anschließend ein Schnitt durch die Bahnhofsmitte gelegt. Im Zuge der Segmentierung werden insgesamt sechs Schritte durchgeführt, die im Folgenden näher erläutert werden:

1. Suchen von Kanten im Radius von 300m um das Bahnhofsgebäude
2. Berechnen der Orientierung der Kanten und Erstellen eines Histogramms
3. Auswählen aller Kanten, deren Orientierungen im Peak des Histogramms liegen
   Die folgenden drei Schritte werden für jede der vorausgewählten Kanten durchgeführt:
   - Berechnen der Orthogonalen durch die vorausgewählte Kante und Erzeugen eines vorläufigen Schnittes durch den Bahnhof entlang der Orthogonalen
   - Bestimmen der Anzahl an Kanten, die innerhalb des Radius liegen und orthogonal zum Schnitt sind
   - Berechnen der euklidischen Distanz zwischen der vorausgewählten Kante und dem Bahnhofsgebäude
4. Auswählen des Bahnhofsschnittes, bei dem die Anzahl an parallelen Kanten maximal und die euklidische Distanz zum Bahnhofsgebäude minimal sind

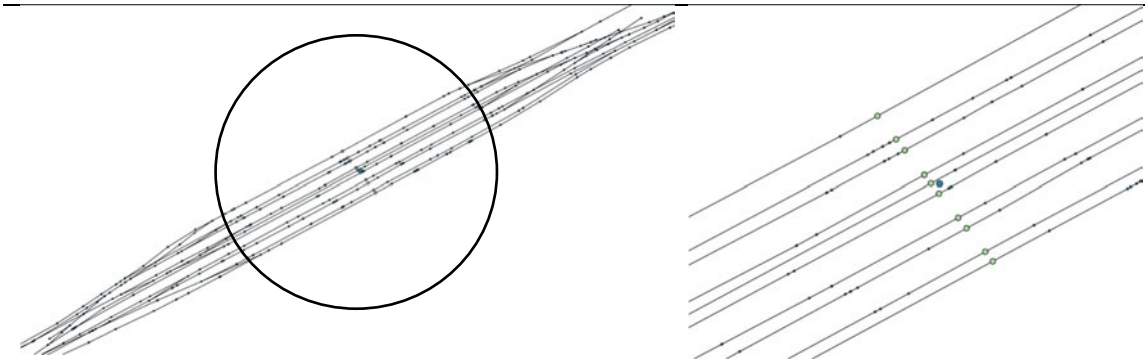


Abbildung 1 – Schnitt durch die Bahnhofsmitte am Beispiel von Braunschweig Hbf. Betrachten von Kanten im ausgewählten Radius (links) und Einfügen von Knoten, die den Schnitt durch den Bahnhof markieren (rechts), Datenquelle Visualisierung: © OpenStreetMap contributors

Im ersten Schritt wird ein Kreis mit einem Radius von 300m um das Bahnhofsgebäude gelegt, der zur weiteren Einschränkung des Suchbereiches dient (siehe *Abbildung 1*). Für alle Kanten innerhalb dieses Radius wird die Orientierung berechnet und die Verteilung in einem Histogramm dargestellt (Schritt 2). Durch die Kanten, deren Orientierungen im Histogramm-Peak liegen, wird anschließend jeweils eine Orthogonale gelegt und die Anzahl an Schnittpunkten mit parallelen Kanten berechnet (Schritt 4). Die Anzahl der berechneten Schnittpunkte gibt somit die Anzahl an parallelen Gleisen an. Für einen Schnitt durch die Bahnhofsmitte wird die Kante ausgewählt, die die höchste Anzahl an parallelen Nachbarkanten sowie als weiteres Kriterium die geringste euklidische Distanz zum Bahnhofsgebäude aufweist (Schritt 5).

Als weitere charakteristische Merkmale werden die Anzahl und Verteilung der Weichen und Kreuzungen (bzw. Kreuzungsweichen) im Polygon bestimmt. Dabei wird zum einen die euklidische Distanz zwischen dem jeweiligen Infrastrukturelement und dem Bahnhofsschnitt und zum anderen die kürzeste Distanz im Graphen berechnet. Innerhalb eines Bahnhofsegments werden ausschließlich diejenigen Infrastrukturelemente berücksichtigt, die im Graphen einen fahrbaren Pfad zum Bahnhofsschnitt aufweisen. Somit sind beispielsweise Weichen, die nicht durch eine Kantenfolge mit dem Bahnhofsschnitt verbunden sind, auch nicht in der Analyse enthalten. Gleiches gilt für Weichen, bei denen der Pfad zum Bahnhofsschnitt über einen spitzen Weichenwinkel verlaufen würde.

3.3 Fahrtenumlegung und -analyse

Für die mikroskopische Fahrtenumlegung werden die Einfahrsignale eines Bahnhofs identifiziert, die als Start- und Endpunkte für die anschließende Fahrwegsuche dienen. Anhand einer Tiefensuche werden topologisch mögliche Fahrwege zwischen den Einfahrsignalen und den Haltepositionen bestimmt. Ausgehend von den Fahrwegen wird mithilfe der folgenden Kriterien ein konfliktfreier Fahrplan für ein 1h-Intervall erstellt, wobei zunächst der Fernverkehr, danach der Nahverkehr und zuletzt der Güterverkehr betrachtet wird:

1. Einhalten des Rechtsverkehrs in Arnhem und Braunschweig und des Linksverkehrs in Olten
2. Einhalten der Haltezeiten sowie der zugewiesenen Plattformen
3. Auswählen kürzester Fahrwege

Die Fahrtenumlegung wird mithilfe von öffentlichen Fahrplänen der drei Bahnhofe erstellt, die Informationen zur Gleisbelegung, zu Ankunfts- und Abfahrzeiten sowie zur Art des Zuges (Nah- oder Fernverkehr) enthalten. In Hinblick auf den Güterverkehr wurde für jeden Bahnhof vereinfacht eine Anzahl von vier Zügen pro Stunde angenommen.

Für das Erkennen von Konflikten werden für jede Zugfahrt die zugehörige Fahrdynamik und, darauf aufbauend, die Belegungszeiträume der Weichen berechnet. Beim Auftreten eines Konflikts wird zunächst für den geringer priorisierten Zug ein alternativer Pfad gewählt. Zur weiteren Konfliktlösung können anschließend die Halteposition und letztendlich die Haltezeiten verändert werden.

Zur Betrachtung der gegenseitigen Beeinträchtigung von Zugfahrten wird die von Potthoff definierte Verkettungszahl φ [2] berechnet:

$$\varphi = \sum_i \sum_j p_{ij} \cdot a_{ij}$$

Dabei wird durch a_{ij} festgelegt, ob sich zwei Zugfahrten i und j gegenseitig ausschließen. Liegt ein Ausschluss vor, so ist $a_{ij} = 1$, ansonsten 0. Mit p_{ij} wird die Wahrscheinlichkeit des Auftretens des Zugfolgefalls *i-j* bezeichnet. Auf Basis der Zugfolgefälle im Fahrplan wird somit das Verhältnis aus Fahrten, die einen Fahrtenausschluss aufweisen und der Gesamtanzahl an Fahrten bestimmt.

Um Unterschiede in den Einfahrbereichen der einzelnen Bahnhofsknoten (Gesamtfahrstraßenknoten) zu berücksichtigen, wird die Verkettungszahl gemäß Richtlinie 405 [3]

für die beiden zuvor erstellen Segmente separat berechnet. Eine Fahrt ist dabei so definiert, dass sie von einem Einfahrsignal zur Halteposition oder umgekehrt führt.

3.1 Betriebssimulation im Regel- und Störfall

Die zuvor beschriebenen Analysemethoden für Gesamtfahrstraßenknoten, sowie deren warteschlangentheoretischen Erweiterungen (vgl. [11, 6] finden als *statische* Beschreibung der Infrastrukturnutzung bzw. von Fahrplankonzepten insbesondere in der Prozessebene der Fahrplanerstellung Anwendung. Für die Bewertung der Betriebsqualität ergeben sich durch die Limitationen in der Abbildung von Fahrplanzusammenhängen, Korrelationen, sowie betrieblichen Zugfolgeprozessen, Einschränkungen.

Aus diesem Grund wird im beschriebenen Projekt ein simulativer Ansatz mithilfe performanter betrieblicher Simulationen, die dynamisch und variabel mit dispositiven Algorithmen gekoppelt werden können, verfolgt. Als Simulationssoftware kommt hierbei das DLR Open Source-Tool SUMO [12] zum Einsatz. Wiewohl SUMO nicht zu den dezidierten Bahnbetriebssimulationssoftwaretools zählt, sondern ursprünglich als Digitaler Zwilling des urbanen Verkehrs konzipiert wurde, so weist die Software dennoch zwischenzeitlich auch umfangreiche Modellierungsmöglichkeiten im Bahnkontext auf (vgl. [13], wobei zwischenzeitlich weitreichende Erweiterungen umgesetzt wurden). So wird SUMO beispielsweise als Simulations-Backend der DB Netz AG für das Training bzw. die Modellierung von Machine Learning-Ansätzen zur Optimierung der Disposition in S-Bahn-Netzwerken (z.B. S-Bahn Stuttgart) verwendet [14].

Darüber hinaus weist SUMO einige Features auf, die bei konventionellen, kommerziell erwerblichen Software-Tools nur sehr eingeschränkt zur Verfügung stehen. Hierbei ist insbesondere die Möglichkeit zu nennen, dynamisch über einen Python-Client (Traffic Control Interface – TraCI) in eine laufende Simulation eingreifen bzw. die Simulationsparameter ändern zu können, und auf diese Weise geänderten Umgebungsrandbedingungen Rechnung zu tragen oder *zur Laufzeit* Modifikationen in Erreichbarkeiten, Routenwahl- und Betriebsprogramm oder Dispositionsstrategien vorzunehmen. Dies erlaubt insbesondere die flexible, ggf. auch im jeweiligen Anwendungskontext abweichenden Gegebenheiten Rechnung tragende, Anbindungen externer Algorithmen, welche steuernd in die Simulation eingreifen.

Für die Abbildung des Bahnbetriebs kommt in der vorliegenden Studie ein komplett integrierter Ansatz auf Basis von SUMO-eigenen (und frei verfügbaren) Routinen zum Einsatz. Die Identifikation von möglichen Fahrwegen im Bahnhof erfolgt auf Basis einer

Tiefensuche, wobei die Fahrbeziehungen an Weichen (connections) in Abhängigkeit der relativen Winkel der ein- bzw. ausgehenden Gleise bestimmt werden. Für die fahrdynamische Berechnung werden in SUMO hinterlegte Traktionscharakteristika von Modellzügen (z.B. ICE3, REDosto7, sowie Freight; vgl. [15]) verwendet. Die mikroskopische Umlegung inklusive Gleisbelegung des initialen, makroskopischen Fahrplankonzepts, welches aus öffentlichen kommunizierten Fahrplandaten abgeleitet wurde, erfolgt in einer Kombination von automatisierten Heuristiken mit manueller Nachkontrolle und -justage, sodass Konfliktfreiheit konsistent zur fahrdynamischen Berechnung auf Modellzugbasis in SUMO hergestellt wird. Für die Prozessebene der Disposition wird über die TraCI-Schnittstelle bei Nicht-Verfügbarkeit des Planfahrweges dynamisches (Re-)Routing auf Basis einer egoistischen kürzeste Fahrzeit-Heuristik auf der jeweiligen Start-/Ziel-Beziehung über die Funktion *rerouteTravelTime* umgesetzt. Ausgefeiltere Methoden wie beispielsweise die Anbindung von Optimierungsalgorithmen oder KI-Methoden zum re-scheduling sind selbstverständlich möglich und werden aktuell prototypisch umgesetzt und untersucht.

Für die nachfolgende Studie wird unterschieden zwischen *Regelbetrieb,* bei dem das vorgegebene Fahrplankonzept inklusive Gleisbelegung unter kleineren Störungen, aber ohne Re-Routing der Züge, d.h. Veränderung des Lenkplans, umgesetzt wird, sowie dem *Störfall*, bei dem aufgrund der Nichtverfügbarkeit von Infrastruktur ein Re-Routing bzw. ggf. auch der Ausfall oder die weiträumige Umleitung von Zugfahrten nötig ist. Für die vorliegende Studie werden hierbei lokale Weichenausfälle mit einer Störungsdauer von 45 Minuten untersucht.

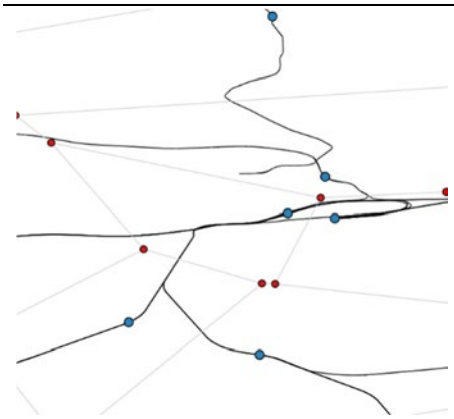
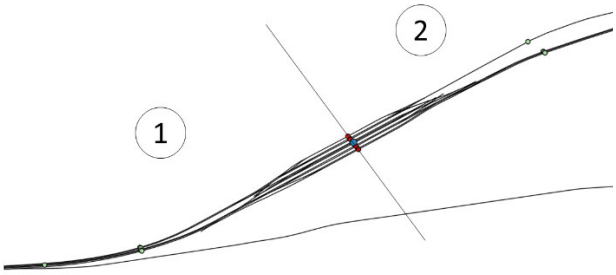
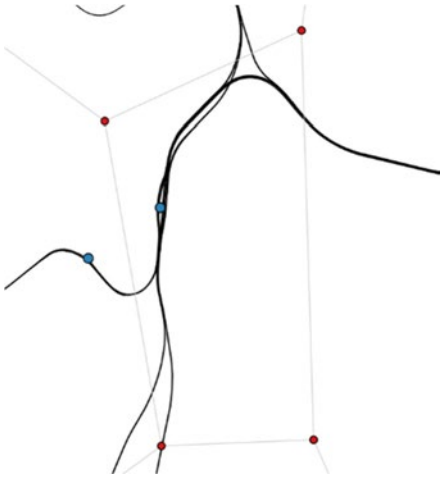
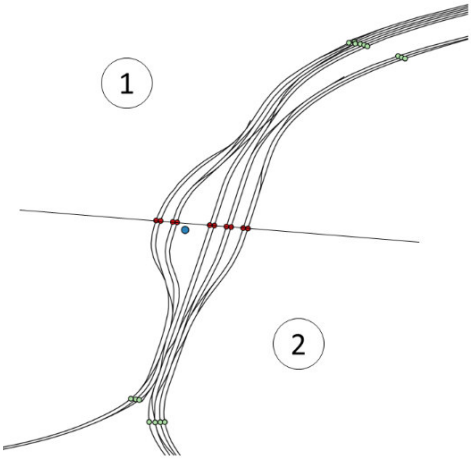
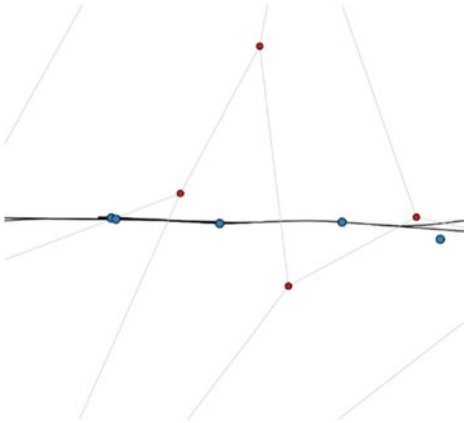
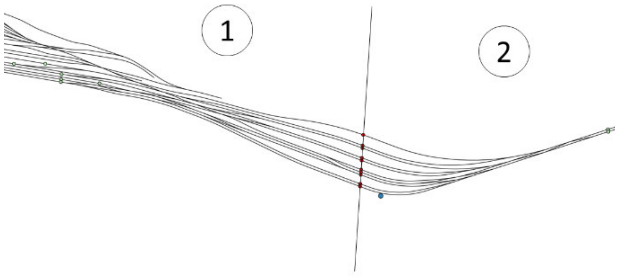
4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Charakteristika der drei untersuchten Bahnhöfe dargestellt und miteinander verglichen sowie die Simulationsergebnisse im Regel- und Störbetrieb für den Bahnhof in Braunschweig exemplarisch gezeigt.

4.1 Charakteristika der Gleislayouts

Die Visualisierung der Voronoi-Polygone sowie der Segmentierungen der Bahnhofsbereiche sind in Tabelle 1 dargestellt. In der linken Spalte markieren die roten Knoten die Polygon-Eckpunkte und die blauen Knoten die Bahnhofsgebäude. Im vergrößerten Netzwerkausschnitt in der rechten Spalte sind zusätzlich die Einfahrsignale durch grüne Knoten und der Schnitt durch die jeweiligen Bahnhöfe mit roten Knoten visualisiert.

Tabelle 1 – Zerlegung in Einzugsbereiche und Segmentierung der Bahnhofsknoten in Braunschweig (oben), Olten (Mitte) und Arnhem (unten), Datenquelle Visualisierung: © OpenStreetMap contributors

Voronoi-Polygone	Segmentierung des Bahnhofsknotens
	
	
	

Die betrachteten Charakteristika der Infrastruktur sind in Tabelle 2 dargestellt. Aufgrund der angrenzenden Rangierbahnhöfe in Olten und Arnhem, die zum Teil im Bahnhofszuschnitt enthalten sind, ist die Anzahl an Weichen mit insgesamt 84 bzw. 69 Weichen vergleichsweise hoch. In dem jeweils gegenüberliegenden Bahnhofssegment ist die Anzahl bei den zwei Bahnhöfen geringer. Sie liegt in Olten bei 29 Weichen und ist in Arnhem mit 15 Weichen – entsprechend dem niederländischen Planungsgrundsatz – im Bahnhofsvergleich minimal.

Die Gesamtanzahl an Kreuzungen bzw. Kreuzungsweichen ist allen drei Bahnhöfen mit 4 bzw. 5 Elementen ähnlich, wobei sich ihre Verteilung in Olten und Arnhem auf ein Bahnhofssegment beschränkt. Im Vergleich dazu sind in Braunschweig in beiden Segmenten Kreuzungen vertreten.

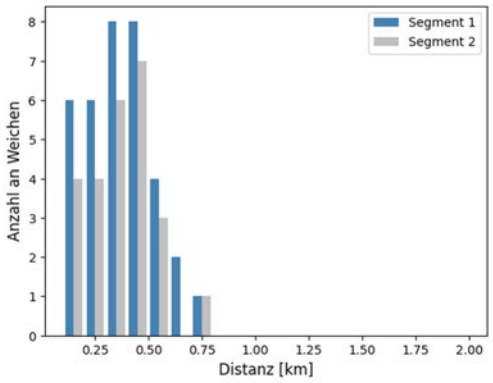
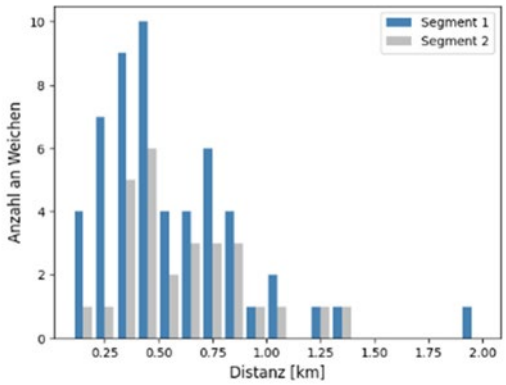
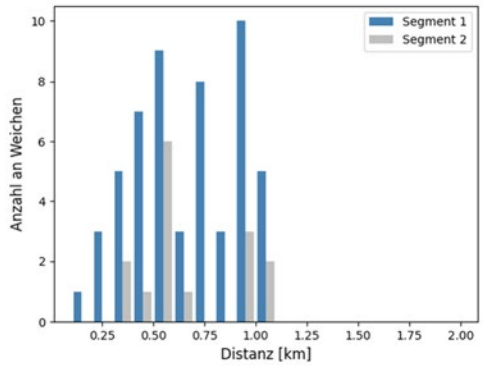
In Bezug auf die Fahrtenumlegung weist Olten mit insgesamt 60 Fahrten die höchste Anzahl auf. In Arnhem liegt ihre Anzahl bei 39 Fahrten und in Braunschweig bei 33 Fahrten. Die Verteilung der Fahrten auf die beiden Bahnhofssegmente zeigt weitere Unterschiede auf. So liegt in Olten die Differenz zwischen der Anzahl an Fahrten in den beiden Bahnhofssegmenten bei 2, in Braunschweig und Arnhem hingegen bei 7.

Die Verkettungszahl liegt im Bahnhofsvergleich in Arnhem im östlichen Bahnhofssegment am höchsten, was auf die geringe Anzahl an Einfahrgleisen zurückzuführen ist. Züge, welche aus östlicher Richtung in den Bahnhof einfahren oder nach dort ausfahren, können lediglich über zwei mögliche Gleise fahren. Die niedrigste Verkettungszahl hingegen weist das nördliche Bahnhofssegment von Olten auf. In diesem Bereich werden (bezogen auf die Wahl des Bahnhofszuschnitts) die Züge über 9 mögliche Gleise geleitet, wodurch sich eine Verkettungszahl von 0,27 ergibt.

Tabelle 2 - Charakteristika der Gleislayouts

Bahnhof	Braunschweig		Olten		Arnhem	
Segment	1	2	1	2	1	2
Anzahl an Weichen	38	26	55	29	54	15
Anzahl an Kreuzungen / Kreuzungsweichen	2	3	5	0	4	0
Anzahl an Fahrten	20	13	31	29	23	16
Verkettungszahl	0,4	0,46	0,27	0,39	0,32	0,69

Tabelle 3 - Entfernung zwischen Weichen und Bahnhofsschnitt im Graphen

Bahnhof	Histogramm
Braunschweig	
Olten	
Arnhem	

Die Verteilung der Weichen in Abhängigkeit von der Distanz zum Bahnhofsschnitt ist in Tabelle 3 gezeigt. In den Histogrammen sind diejenigen Weichen enthalten, die sich in

den Voronoi-Polygonen bis zu einem Abstand von 2km befinden, wobei die zwei Bahnhofssegmente separat dargestellt werden. Die maximale Distanz zwischen Weichen und Bahnhofsschnitt variiert bei den drei Fallbeispielen zwischen etwa 500m und 1,9km. Hierbei ist die Größe des Voronoi-Polygons zu berücksichtigen, das zum Beispiel bei dem Bahnhof in Arnhem vergleichsweise klein ist und somit keine Weichen enthält, die weiter als 1km vom Bahnhofsschnitt entfernt sind. Bei allen Bahnhöfen tritt die größte Häufung an Weichen in einer Distanz von etwa 500m zum Bahnhofsschnitt auf. Lediglich im ersten Segment von Arnhem ist die größte Anzahl an Weichen im ersten Segment in einem Abstand von etwa 1km zu finden, was auf den bereits erwähnten angrenzenden Rangierbahnhof zurückzuführen ist.

4.2 Simulationsergebnisse

Zur Demonstration der Wirkweise der auf einem simulativen Ansatz zur Quantifizierung der Betriebsqualität im Regel- und Störfall beruhenden Methodik wird der Braunschweiger Hauptbahnhof herangezogen. Als Fahrplan wurden Daten zur aktuellen Verkehrslage der DB [16] zugrunde gelegt.

Im Regelfall wurden die Effekte kleinerer Fahrplanunregelmäßigkeiten durch Einbruchsverspätungen abgebildet. Hierzu wurden für die Einbruchszeiten für die einzelnen Zugfahrten Verspätungen gemäß $U[0{,}10\ min]$ untersucht. Im Störfall wurde zusätzlich nach einer Vorlaufzeit von 500s eine zufällige Weichenstörung (Totalausfall) von 45min Dauer simuliert. Als Resultat müssen alle Zugfahrten, deren Fahrweg durch die Nicht-Verfügbarkeit der Weiche inkonsistent wird, umgeroutet werden. Fahrten mit konsistentem Fahrweg werden auf dem Regelfahrweg durchgeführt.

Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse für die Simulation des leicht gestörten Ursprungsfahrplans (Regelbetrieb). Es ist ersichtlich, dass sich für die meisten Realisierungen ein ähnliches Bild und nahezu vergleichbare Ergebnisse ergeben. Die Schwankungen der durchschnittlichen Wartezeiten sind über die unterschiedlichen Realisierungen hinweg sehr gering. Insbesondere sind keine unvollständigen Routen / Zugausfälle zu beobachten, wie sie sich theoretisch aus einer durch eine ungünstige Verspätungskonstellation resultierenden Deadlocksituation ergeben könnten. Es ist augenscheinlich, dass geringe Verspätungen vorrangig zu Fahrtzeitverlusten, jedoch nicht zu Wartezeiten, d.h. Zeiten, in denen sich Zugfahrten im Stillstand befinden, führen. D.h. dass Zugfahrten durch die Signalisierung und Geschwindigkeitsüberwachung zwar eine gegenüber der Nominalgeschwindigkeit erhöhte Fahrzeit erhalten, jedoch nur äußerst selten vor Halt-zeigenden Signalen zum Stehen kommen. Eine mögliche Schlussfolgerung hieraus ist, dass sich durch das

Einspielen der Einbruchsverspätungen nur ein geringfügig gestörter Betrieb, ggf. auch bedingt durch die relativ geringe Gesamtauslastung des Knotens Braunschweig, ergibt und die Gesamtbetriebssituation als stabil betrachtet werden kann.

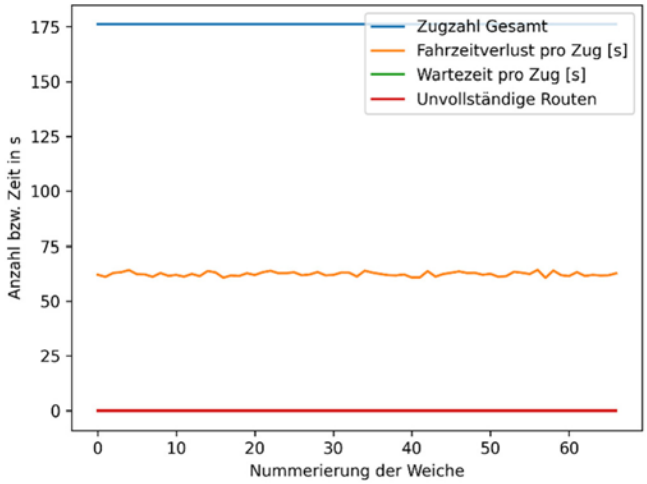


Abbildung 2: Mittlere Verspätung und Fahrzeitverluste im Regelfall

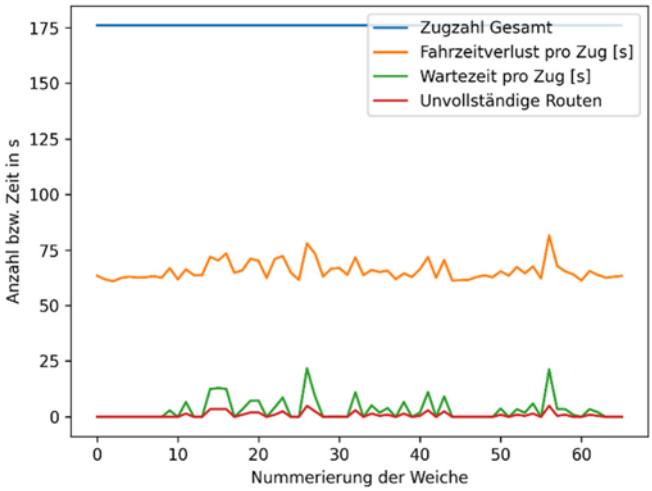


Abbildung 3: Mittlere Verspätung, Fahrzeitverluste, und nicht durchführbare Zugfahrten im Störfall

Im Störfall (vgl. Abbildung 3) ergibt sich ein differenzierteres Bild. Es zeigt sich, dass (erwartungsgemäß) nicht alle Weichenausfälle gleichermaßen kritisch sind. Während einige Ausfallszenarien zu einer erhöhten Zahl von Zugausfällen (bzw. inkonsistenten Routen) führen, sind bei anderen Szenarien von Weichenausfällen, die das Fahrplangeschehen nur geringfügig stören, Ergebnisse nahezu wie im Regelbetrieb gegeben. Es ist anzumerken, dass in der vorliegenden Studie bei Ausfällen, welche zur Nichtdurchführbarkeit von Zugfahrten aufgrund des Mangels konsistenter Fahrwege während der Durchfahrt

oder vor dem Einbruch des betrachteten Infrastruktursegments führen, diese Züge nicht entfernt werden. Letzteres würde zum gängigen statistischen Problem unrealistischer Verspätungskennwerte bis hin zu einer Verbesserung der Betriebsqualität durch geringere Auslastung führen. Stattdessen werden die entsprechenden Zugfahrten durchgeführt und mit einer Maximalwartezeit von 10min versehen, und anschließend am nächsten nutzbaren Routensegment fortgeführt.

Eine detailliertere Aufschlüsselung der Effekte der unterschiedlichen Störungen ist in Abbildung 4 gegeben. Basierend auf dem Fahrzeitverlust werden die Effekte der unterschiedlichen Weichenausfälle vergleichend dargestellt, wobei die Farbskale linear zwischen dem Szenario mit dem höchsten bzw. dem niedrigsten Fahrzeitverlust erfolgt.

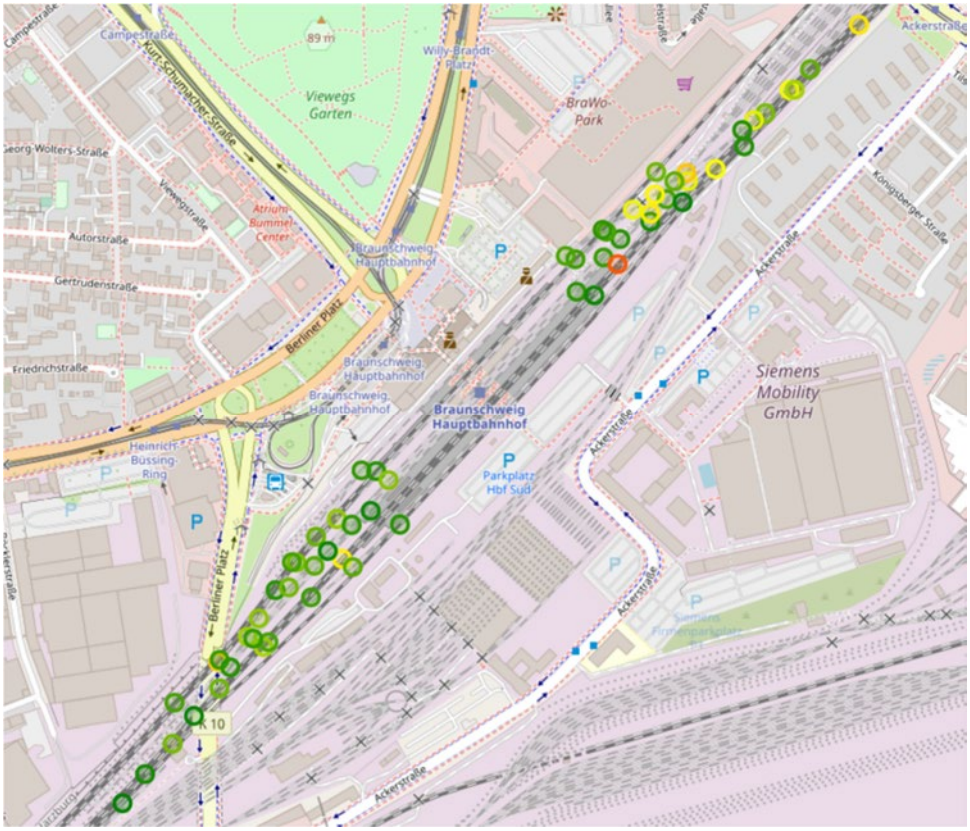


Abbildung 4: Kritikalität von Elementen, Map Data by © OpenStreetMap, under ODbL.

Es ist zu erkennen, dass insbesondere Weichen, die zur sechsten Bahnhofsplattform führen, sowie solche, die der Überleitung zwischen dem nördlichen und dem südlichen Bahnhofsbereich und folglich der Trennung zwischen den Kursbuchstrecken 1901 Braunschweig-Bad Harzburg und 1900 Braunschweig-Magdeburg dienen, bei Ausfällen zu erhöhten Fahrzeitverlusten führen. Auch wenn im Fahrplankonzept eine Brechung der öst-

lich und westlich verlaufenden Linien im Regionalverkehr stattfindet und dementsprechend keine Liniendurchbindung gegeben ist, so scheint doch gerade für den Störfall die zusätzliche Flexibilität in der Nutzbarkeit weiterer Gleise, welche durch die entsprechenden Weichen ermöglicht wird, bei der gewählten Dispositionsheuristik wichtig für die Betriebsqualität. Eine reine Linienorientierung mit weitgehender Vereinfachung der Gesamtfahrstraßenknoten birgt hier offensichtlich gerade im Störfall Risiken. Im Rahmen der vorliegenden Studie kann nicht abschließend geklärt werden, in wieweit diese Risiken durch die Nutzung anderer Dispositionsstrategien abgemildert werden können, jedoch wird durch die Ergebnisse aufgezeigt, dass bei der Planung von Gleisvorfeldern, insbesondere im Zuge der Migration zum Deutschland-Takt eine verzahnte Abbildung von Infrastrukturverfügbarkeitseinschränkungen und betrieblichen Abweichungen mitbetrachtet werden muss, um Risiken in der Betriebsdurchführung zu vermeiden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorgestellte Methodik ermöglicht die Charakterisierung von Gleislayouts in Fahrstraßenknoten sowie die Analyse ihrer jeweiligen Störungsanfälligkeit. Für drei ausgewählte Fallbeispiele in Braunschweig, Olten und Arnhem wurden die Charakteristika mithilfe eines halbautomatisierten Vorgehens identifiziert und mit der Verkettung von Zugfahrten in Zusammenhang gebracht. Anhand der Simulation von Betriebs- und Störfällen konnte für den Bahnhof in Braunschweig beispielhaft aufgezeigt werden, wie die lokal vorhandene Gleisinfrastruktur die Betriebsabwicklung im Regel- und Störfall beeinflusst und wie sich durch die Topologie der Gesamtfahrstraßenknoten Nutzungseinschränkungen, gerade im Störfall, auswirken. Aus der resultierenden Effektanalyse können Rückschlüsse im Rahmen einer vergleichenden Evaluierung von Gleislayouts für die Adaption von Bahnhofsinfrastrukturen für zukünftige Fahrplankonzepte – unter Berücksichtigung von Unsicherheiten im Betrieb – gezogen werden.

Um wesentliche Best Practices für die Gestaltung von Fahrstraßenknoten abzuleiten und somit Planungsprozesse von Infrastrukturanlagen in Personenbahnhöfen zu unterstützen, soll die vorgestellte Methodik zukünftig auf weitere Fallbeispiele angewendet werden. Insbesondere können – vergleichbar zum hier vorgestellten Beispiel Braunschweig Hbf – die integrierten Simulationsstudien zur Bewertung der Betriebsqualität bei leicht bzw. massiv gestörtem Fahrplan durch den internationalen Vergleich mit den anderen Fallbeispielen erweitert werden. Bereits am Beispiel Braunschweig ist jedoch ersichtlich, dass gerade im Störfall die Verfügbarkeit zusätzlicher Weichenverbindungen im Gesamtfahrstraßenknoten von großem Einfluss auf die Aufrechterhaltung des Betriebs ist.

Zukünftig soll die vorgestellte Methodik insbesondere mit unterschiedlichen Dispositionsmodellen auf Basis von Optimierungsmodellen bzw. KI-basierten Lösungen erweitert werden und der Einfluss bzw. die Limitationen von Dispositionsmodellen für die Aufrechterhaltung eines attraktiven Verkehrsangebots auch im Störfall detailliert untersucht werden. Die Nutzung von SUMO als performantes Simulations-Backend bietet hierbei auch die Möglichkeit, größere, über den zu untersuchenden Bahnhofsknoten hinausgehende Netzbereiche mikroskopisch zu simulieren und somit die Netzeffekte von Störungen, welche bisher oftmals lediglich mesoskopisch betrachtet werden, mit einzubeziehen. Zusammen mit der vergleichenden Betrachtung von Planungskonzepten im internationalen Kontext, können somit Best Practices im komplexen Zusammenspiel zwischen Infrastruktur, Verkehrsangebot und Disposition / Betriebssteuerung evaluiert werden.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei Jakob Geischberger sowie Jakob Erdmann für die Unterstützung im Datenmanagement sowie der Umlegung von Bahnfahrplan- und -betriebskonzepten in der DLR-Verkehrssimulationssoftware SUMO.

Literatur

[1] D. van de Velde, „Learning from the Japanese railways: Experience in the Netherlands,“ *Policy and Society,* pp. 143-161, 2013.

[2] G. Potthoff, Verkehrsströmungslehre Bd. 3: Die Zugfolge auf Strecken und in Bahnhöfen, Berlin: Transpress, 1980.

[3] DB Netz AG, Richtlinie 405: Fahrwegkapazität, Frankfurt/Berlin, 2008.

[4] G. Hertel, „Exakte Lösung zur Berechnung der Wartegleiszahl vor im Einrichtungsbetrieb,“ *Wissenschl. Zeitschrift Hochschule für Verkehrsw. 31,* 1984.

[5] L. Jensen und A. Landex, „Measuring Robustness of Timetables at Stations using a Probability Distribution,“ in *in Proceedings 5th International Conference on Railway Operations Management and Analysis*, Copenhagen, 2013.

[6] N. Weik, Long-term capacity planning of railway infrastructure - A stochastic approach capturing infrastructure unavailability, Aachen: PhD Thesis, 2020.

[7] UIC, „UIC Code 406 - Capacity,“ Paris, 2013.

[8] N. Weik, I. W. J. Johansson, M. Bohlin und N. Nießen, „Extending UIC 406-based Capacity Analysis - New Approahces for Railway Nodes and Network Effects," *Journal of Rail Transport Planning & Management 15,* 100199, 2020.

[9] P. Jovanovic, N. Pavlopvic, I. Belosevic und S. Milinkovic, „Graph coloring-based approach for railway station design analysis and capacity determination," *European Journal of Operational Research 287 (1),* S. 348-360, 2020.

[10] G. Voronoï, „Nouvelles applications des paramètres continus à la théorie des formes quadratiques," *Journal für die Reine und Angewandte Mathematik,* 1908.

[11] N. Nießen, Leistungskenngrößen für Gesamtfahrstraßenknoten, Aachen: Dissertation, RWTH Aachen, 2008.

[12] P. Alvarez Lopez et al., „Microscopic Traffic Simulation using SUMO," in *in Proc. 21st IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems*, 2018.

[13] E. Wießner, J. Erdmann, L. Flamm und B. Jäger, „Auf Straße und Schiene mobil – intermodale Verkehrssimulation mit SUMO," *Signal & Draht 11,* S. 49-55, 2018.

[14] J. Erdmann, „Simulation als Baustein für KI Anwendung in der Disposition von digitalen Eisenbahnknoten," in *DER ZUG ZUR DIGITALISIERUNG*, online, 2022.

[15] DLR, „SUMO Documentation: Simulation / Railways," 17.07.2023. [Online]. https://sumo.dlr.de/docs/Simulation/Railways.html. [Zugriff am 14.08.2023].

[16] DB, „API Marketplace - Timetables," 2023. [Online]. https://developers.deutschebahn.com/db-api-marketplace/apis/product/timetables. [Zugriff am 21.03.2019].

Session 12
Maike Krips, Norman Weik, Christian Meirich

Autoren

Krips, Maike

Maike Krips beendete 2020 ihr Ingenieurstudium an der Leibniz Universität Hannover und arbeitete als Wissenschaftliche Mitarbeiterin an der TU Braunschweig, wo sie sich mit der Anwendung von Machine Learning Algorithmen in der Medizinischen Informatik beschäftigte. Seit 2022 ist sie als Wissenschaftliche Mitarbeiterin am DLR Institut für Verkehrssystemtechnik in Braunschweig tätig. Ihre Arbeitsschwerpunkte liegen dort in der Optimierung des Betriebsgeschehens durch vernetzte Fahrerassistenzsysteme sowie in der Infrastrukturplanung für den Bahnbetrieb.

Weik, Norman

Norman Weik studierte Mathematik und Physik am KIT in Karlsruhe. Nach seiner Promotion am Verkehrswissenschaftlichen Institut der RWTH Aachen zum Themenfeld Kapazität und Infrastrukturverfügbarkeit, wechselte er 2020 ans DLR Institut für Verkehrssystemtechnik, wo er eine Schnittstellenfunktion zwischen den Gruppen Bahnbetrieb und Anlagenmonitoring innehatte. Im September 2023 wurde er an die TU München berufen, wo er die Professur für Planung und Betrieb von Schienenverkehrssystemen leitet.

Meirich, Christian

Christian Meirich ist am DLR Institut für Verkehrssystemtechnik als Gruppenleiter der Arbeitsgruppe Bahnbetrieb seit August 2017 tätig. Er schloss sein Bauingenieurstudium an der RWTH Aachen 2017 mit der Promotion am Verkehrswissenschaftlichen Institut im Bereich der Eisenbahnbetriebswissenschaften ab. Sein derzeitiger Arbeitsschwerpunkt liegt im Bereich Verkehrsbewertung mit Schwerpunkt betrieblicher Fragestellungen des Eisenbahnsystems. Weiterer Fokus der Arbeit ist die Verbesserung des Eisenbahnbetriebs durch Digitalisierung und Automatisierung.

Session 12
Philipp Scherer, Bastian Kogel, Wiebke Lenze, Maren Maus, Nils Nießen, Mario Fietze

Identifikation von Kapazitätsengpässen

Scherer, Philipp[1]; Kogel, Bastian[2]; Lenze, Wiebke[2]; Maus, Maren[2]; Nießen, Nils[2]; Fietze, Mario[3]

[1]quattron management consulting GmbH
[2]Verkehrswissenschaftliches Institut der RWTH Aachen
[3]Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung (DZSF)

Zusammenfassung

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist die automatisierte Identifikation von Kapazitätsengpässen in Eisenbahnnetzen auf Basis von Betriebsdaten. Hierzu werden die Bereiche des Netzes detektiert, die hohe Verspätungszuwächse aufweisen und folglich als kritisch einzustufen sind. Zur Klassifizierung der Streckenabschnitte und Betriebsstellen wird die sogenannte „Verspätungsschwere“ auf Grundlage vorliegender Betriebsdaten ermittelt. Die zur Analyse der identifizierten Engpässe relevanten Informationen werden aus verschiedenen Datenquellen extrahiert und übersichtlich in Form von Steckbriefen zusammengefasst. Unter anderem werden dort für die identifizierten Engpässe Verspätungsursachen und mögliche Maßnahmen zur Beseitigung der Engpässe aufgeführt.

Keywords: Engpass, Kapazität, Betriebsdaten

1 Zieldefinition

Der Schienenverkehr soll als Verkehrsträger der Zukunft in den nächsten Jahren stetig verbessert und ausgebaut werden. Um diese ambitionierten Ziele zu erreichen, sind erhebliche Investitionen in die Infrastruktur erforderlich. Neben langfristigen Neu- und Ausbaumaßnahmen müssen insbesondere auch kurz- bis mittelfristige betriebliche Maßnahmen ergriffen werden, um Verspätungen zu reduzieren oder bestenfalls zu vermeiden. Die Identifikation der neuralgischen Punkte des Netzes, an denen Verspätungen entstehen bzw. übertragen werden, und die Reduzierung der dort entstehenden Verspätungen wirken als Hebel zur Verbesserung der Betriebsqualität im Gesamtnetz. Es gilt daher, Engpässe des Netzes zu identifizieren und zu analysieren, um darauf aufbauend Möglichkeiten zu deren Auflösung zu erarbeiten. Ziel ist es dabei, mit möglichst kleinen, punktuellen und schnell umsetzbaren Eingriffen größtmögliche

Verbesserungen hinsichtlich der Kapazität und Betriebsqualität für das Gesamtnetz zu erzielen.

Die in diesem Beitrag vorgestellte Methode zur Identifikation und Analyse der Engpässe basiert auf realen Betriebsdaten. Diese sind in der Regel tagesaktuell und für einen Großteil des Streckennetzes verfügbar, sodass sie eine gute Grundlage für die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen darstellen.

Der Beitrag ist dabei wie folgt untergliedert: Im Abschnitt 2 wird die Datengrundlage erläutert, welche im Abschnitt 3 für die Engpassidentifikation genutzt wird. Anschließend wird im Abschnitt 4 die Analyse der identifizierten Engpässe beschrieben, um darauf aufbauend im Abschnitt 5 erste Verfahren zur Engpassauflösung zu entwickeln. Schließlich werden im Abschnitt 6 erste Anwendungsbereiche der Methodik dargelegt und im Abschnitt 7 die Ergebnisse zusammengefasst sowie ein Ausblick gegeben.

2 Datengrundlage und -aufbereitung

Als Datengrundlage zur Engpassidentifikation eignen sich grundsätzlich zwei verschiedene Datenquellen: Soll- und Ist-Daten. Soll-Daten basieren meist auf einem konkreten Fahrplan, der mittels eisenbahnbetriebswissenschaftlicher Methoden ausgewertet und auf Engpässe hin untersucht werden kann. Ad-hoc Verkehre sind bspw. in Jahresfahrplänen nicht abgebildet, was dazu führt, dass die Anzahl tatsächlicher Zugfahrten innerhalb eines Infrastrukturbereiches unterschätzt wird. Dies hat zur Folge, dass einige Engpässe nicht identifiziert werden könnten. Demgegenüber werden bei der Auswertung von Ist-Daten/realen Betriebsdaten alle Zugfahrten erfasst, sodass die Gesamtheit der tatsächlich durchgeführten Zugfahrten bei der Analyse berücksichtigt wird. Insbesondere häufig (durch Störungen) auftretende, im Fahrplan nicht abbildbare Betriebssituationen können durch die Auswertung von Betriebsdaten erfasst werden. Nachteilig ist hier lediglich, dass nur auf Grundlage von zurückliegenden Daten Aussagen zu Engpässen getroffen werden können; Prognosen für zukünftige Verkehre sind folglich nicht möglich.

Betriebsdaten werden in Deutschland durch die DB Netz AG im Leitsystem Disposition (LeiDis) vorgehalten. Diese werden im sogenannten „Netzmonitor“ mit weiteren Datenquellen verknüpft und anschließend als Ausgangsbasis für die Engpassidentifikation und -analyse genutzt.

Dazu werden die vorliegenden Daten je Zugfahrt in ein Knoten-Kanten-Modell überführt. Knoten stellen dabei die Ankunft oder Abfahrt eines Zuges in einer Betriebsstelle dar,

wobei für jeden dieser Knoten Ist- und Sollzeiten hinterlegt sind. In Abbildung 1 ist eine Visualisierung des aus der Datenquelle überführten Knoten-Kanten-Modells dargestellt.

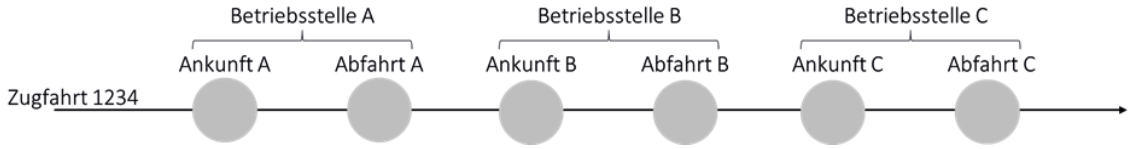


Abbildung 1: Beispielhafte Darstellung eines Graphen

Die jeweiligen Kanten des Modells beschreiben entweder Fahrten zwischen zwei Betriebsstellen oder aber den Halt sowie die Durchfahrt eines Zuges in einer Betriebsstelle. Ein solches Knoten-Kanten-Modell, das alle Zugfahrten und die entsprechenden Zeiten enthält, lässt sich für jeden Betriebstag aufstellen. Um auf veränderte Eingangsdaten schnell reagieren und auch extern vorgegebene Bedingungen berücksichtigen zu können, ist das gewählte Datenformat weitestgehend offengehalten. Dies ermöglicht verhältnismäßig einfache Anpassungen am Algorithmus.

Bei der Datenauswertung ist darauf zu achten, dass vorliegende Daten vollständig sowie möglichst frei von Datenungenauigkeiten und -fehlern sind. Liegen diese dennoch vor, so sollten unpassende Daten möglichst identifiziert und herausgefiltert werden. In LeiDis liegen bspw. interpolierte Daten in solchen Betriebsstellen vor, in denen keine Messwerte aufgenommen werden. Diese Interpolationen haben jedoch eine geringere Aussagekraft als tatsächlich gemessene Daten, sodass diese in der Auswertung nicht berücksichtigt werden. Bei der Betrachtung von mehreren Betriebstagen (bspw. ein Fahrplanjahr) können ferner Kanten herausgefiltert werden, die nur sehr selten auftreten. Dies deutet i. d. R. darauf hin, dass Knoten bspw. aufgrund fehlender Messwerte fehlerhaft miteinander verbunden sind, sodass diese bei der Auswertung keine Berücksichtigung finden sollten. In Abbildung 2 ist dies beispielhaft für das Fahrplanjahr 2019 dargestellt.

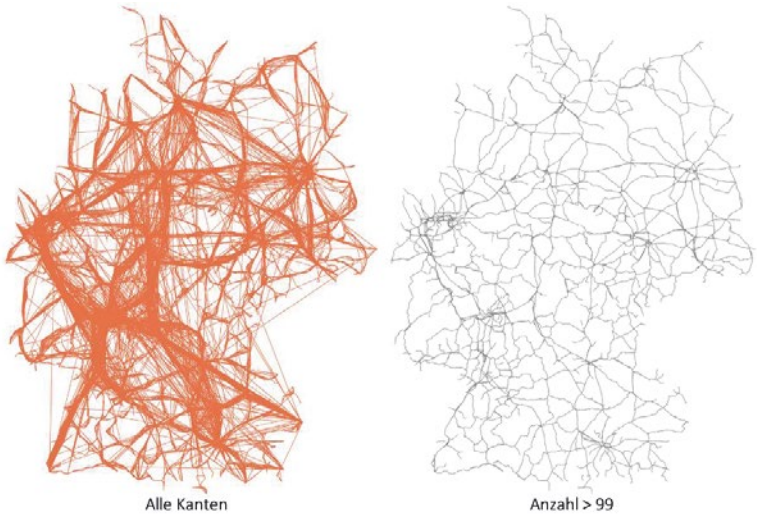


Abbildung 2: Visuelle Darstellung der in den Daten vorhandenen (links) und gefilterten (rechts) Kanten

Während im linken Teil der Abbildung alle Kanten des Fahrplanjahres dargestellt sind, enthält der rechte Teil der Abbildung nur solche Kanten, die mindestens 100 mal über alle betrachteten Zugfahrten auftreten.

3 Methodik zur Identifikation von Kapazitätsengpässen

Um Kapazitätsengpässe untersuchen zu können, wird zunächst die sogenannte Verspätungsschwere auf Grundlage der zuvor beschriebenen Eingangsdaten definiert. Anschließend werden je nach Fragestellung unterschiedliche Möglichkeiten der für die Engpassidentifikation genutzten Datenaggregation dargestellt und die Ergebnisdarstellung beschrieben. Als weitere Grundlage für die in Abschnitt 4 folgende Engpassanalyse wird abschließend erläutert, wie Wechselwirkungen zwischen Zügen identifiziert werden können.

3.1 Ermittlung der Verspätungsschwere

Zur Identifikation von Engpässen ist zunächst zu definieren, was unter einem Engpass zu verstehen ist. Grundlegend gilt, dass in einem Engpass die Infrastruktur für die verkehrende Anzahl an Zügen nicht ausreichend dimensioniert ist. Dies ist insbesondere an Stellen, an denen gehäuft Verspätungen auftreten, zu vermuten. Entsprechend

erscheint die Größe „Verspätungszuwachs“ bei der Ableitung von Engpässen besonders relevant zu sein. Die alleinige Betrachtung des Verspätungszuwachses ist als Kriterium für die Engpassidentifikation allerdings unzureichend. Entscheidend ist insbesondere, ob die von den Verspätungszuwächsen betroffenen Züge ursprünglich planmäßig verkehrende oder bereits verspätete Züge sind. So ist es i. d. R. kritischer zu bewerten, wenn Züge aus ihrer Planlage herausgedrängt werden, da bereits verspätete Züge ohnehin ein höheres Konfliktpotential mit anderen Zügen aufweisen. Aus diesem Grund werden die Zugfahrten unterschiedlichen Verspätungskategorien zugeordnet. Die vorgenommene Kategorisierung ist Abbildung 3zu entnehmen.

Abbildung 3: Kategorisierung der Verspätungen

Dabei verdoppelt sich die zeitliche Länge einer Kategorie jeweils im Vergleich zur vorhergehenden Kategorie, sodass Verspätungen nahe der Planlage detaillierter erfasst werden. Auf Grundlage der Verspätungskategorien wird schließlich für jeden untersuchten Infrastrukturabschnitt die dimensionslose Kenngröße Verspätungsschwere S ermittelt. Hierzu werden je Zugfahrt j die Anzahl der Wechsel in eine schlechtere Verspätungskategorie V_j sowie die Anzahl der Verspätungsereignisse E_j aufsummiert. Verspätungsereignisse stellen dabei Verspätungszuwächse dar, die über einem definierten Schwellwert liegen. Dieser wurde in den durchgeführten Analysen auf 90 s gesetzt[1]. Der resultierende Wert wird anschließend über den Gewichtungsfaktor k_i nach der Verkehrsart i gewichtet, sodass sich folgender Ausdruck für die Verspätungsschwere des zuvor gewählten Infrastrukturabschnittes ergibt:

$$S = \sum_i \left(k_i \cdot \sum_{j \in i} (E_j + V_j) \right)$$

3.2 Aggregation der Daten

Um die in Abschnitt 3.1 definierte Kennzahl zur Identifikation von Engpässen aus den Betriebsdaten zu extrahieren, werden die Betriebsdaten strukturiert in verschiedenen

[1] Grundsätzlich kann der Wert für Verspätungsereignisse frei gewählt werden. Die 90 s wurden hier gewählt, da Verspätungszuwächse in mindestens dieser Höhe codiert werden.

Aggregationsebenen aufbereitet. Bei der Engpassidentifikation liegt der Fokus insbesondere auf häufig auftretende Verspätungen. Für die nachgelagerten Auswertungen erweist sich eine dreigliedrige Aggregation als vorteilhaft, da je nach verwendeter Auswertungsmethode eine unterschiedliche Informationsdichte erforderlich ist:

- **Tagesgraphen** stellen die erste Aggregationsebene dar. Hier werden die Daten für alle an einem Tag stattfindenden Zugfahrten in das in Abbildung 1 visualisierte Knoten-Kanten-Modell überführt und die konkreten Soll- und Ist-Werte ergänzt. Jeder Eintrag entspricht dabei einer Kante des Modells. Ferner erfolgt bereits hier die Zuordnung der einzelnen Zugfahrten zu den beschriebenen Verspätungskategorien. Für jeden Betriebstag wird ein separater Tagesgraph erzeugt.
- Eine beliebige Auswahl an Tagesgraphen (bspw. eine Fahrplanperiode oder ein Monat) kann zu einem **Integrierten Graph** zusammengefasst werden. Die Kanten werden dabei um tagesgraphspezifische Informationen, wie bspw. die exakten Verspätungswerte, bereinigt. Anschließend werden identische Kanten der Tagesgraphen, d. h. Kanten gleicher Zugnummer, über den ausgewählten Untersuchungszeitraum zusammengefasst. Für die nachgelagerte Auswertung relevante Informationen, wie bspw. die Kategoriewechsel, werden an den einzelnen Kanten gesammelt dargestellt, sodass insgesamt eine deutliche Reduzierung der Datenmenge erreicht wird. So werden bspw. nur noch die Häufigkeiten der Verspätungsübergänge vorgehalten, nicht aber die exakten Verspätungswerte je Betriebstag.
- Um schließlich die Engpassidentifikation durchführen zu können, werden die Daten aus dem Integrierten Graph weiter zu einem **Aggregierten Graph** zusammengefasst. Dabei erfolgt unter anderem eine Aggregierung nach Zugklassen/Zuggattungen und/oder eine Aggregierung nach Infrastrukturbereichen.

3.3 Darstellung der Ergebnisse

Aufbauend auf dieser Aggregation kann schließlich die Verspätungsschwere für jeden Infrastrukturabschnitt ermittelt werden. Somit ist es möglich, eine Reihenfolge der Infrastrukturabschnitte festzulegen, über die eine Einordnung der Engpasssituation möglich ist. So können Engpasslisten erstellt und Engpässe mit den höchsten Verspätungsschweren auf Grundlage dieser Listen visuell in Karten erfasst werden. Infrastrukturabschnitte mit hohen Verspätungsschweren sind dabei tendenziell eher

Engpässe als solche mit niedrigen Verspätungsschweren. Für die eindeutige Definition, ab wann ein Infrastrukturabschnitt als Engpass klassifiziert wird, wird im weiteren Projektverlauf ein Qualitätsmaßstab entwickelt. Hierzu werden verschiedene Varianten geprüft. Einerseits wird für Strecken untersucht, ob ein Zusammenhang zwischen den ermittelten Verspätungsschweren und den jeweiligen Nennleistungen besteht, sodass die Engpassklassifizierung ggf. in Anlehnung an die Qualitätsstufen vorgenommen werden kann. Da für Knoten eine zur Nennleistung äquivalente Größe nicht existiert, wird hier ein Zusammenhang zwischen der Verspätungsschwere und den Zuganzahlen untersucht. Zudem wird sowohl für Knoten als auch für Strecken die Verteilung der Verspätungsschwere analysiert. Bei dieser Variante ist eine Einordnung der Infrastrukturabschnitte anhand von Quantilen denkbar, sodass alle Infrastrukturabschnitte, die einen bestimmten Wert überschreiten als Engpass gewertet werden. Für Knoten ist zusätzlich die Bildung von Clustern entsprechend der verschiedenen Bahnhofskategorien vorgesehen, sodass Bahnhöfe ähnlicher Größenordnung miteinander verglichen werden.

3.4 Episode Mining

Für eine vollständige Analyse von Engpässen ist es sinnvoll, Wechselwirkungen zwischen Zugfahrten aufzudecken, da Kenntnisse über diese in weiteren Schritten zu einer Engpassauflösung beitragen können. Aufgrund der vorliegenden Datenmenge ist die Wahl der Methodik herausfordernd: Häufig skalieren die Algorithmen schlecht, sodass diese insbesondere für Auswertungen über ein Jahr in vertretbarer Zeit keine Ergebnisse liefern. Als ein vielversprechender Ansatz erweist sich jedoch das Episode Mining [1], welches dazu genutzt werden kann, zeitliche Muster in Betriebsdaten zu erkennen. Häufig gemeinsam auftretende Ereignisse sollen so systematisch erkannt werden und werden als sogenannte Episode bezeichnet, welche sowohl zeitlich geordnet als auch zeitlich ungeordnet sein kann. Zeitlich geordnet bedeutet dabei, dass die Reihenfolge der auftretenden Ereignisse klar definiert ist (A vor B, B vor C), während bei einer zeitlich ungeordneten Episode nur eine zeitliche Nähe festgestellt wird, jedoch keine Ordnung (A gemeinsam mit B, B gemeinsam mit C). Die Anzahl der in einer Episode enthaltenen Ereignisse ist hierbei die Größe einer Episode. Ferner können Episoden auch eine Teilmenge einer anderen Episode sein; sie werden dann als Teilepisode dieser bezeichnet.

In Bezug auf die Engpassanalyse verfolgt das Episode Mining das Ziel, häufig gemeinsam verspätete Züge zu identifizieren. Die Idee dahinter ist, dass verspätete Züge

aufgrund ihrer Abweichung von der Planlage häufig Konflikte mit anderen Zügen verursachen. Unter anderem aus diesem Grund treten Verspätungen oftmals gemeinsam auf. Tritt eine solche Verspätungsübertragung nicht nur in Einzelfällen auf, sondern wiederholt sich häufig, so ist davon auszugehen, dass dies auf eine konkrete Engpasssituation hindeutet, für die eine detailliertere Untersuchung sinnvoll sein kann. Für die Engpassanalyse werden insbesondere die Zugnummern herausgefiltert, bei denen am häufigsten eine Verspätungsübertragung stattfindet.

Weiterführend scheint insbesondere die Gruppierung von Zugnummern zu Linien und eine auf Linienbasis durchgeführte Engpassanalyse sinnvoll zu sein, da der Fahrplan – mit einigen Ausnahmen behaftet – eine Periode von einer bzw. zwei Stunden aufweist. Jedoch ist es hierfür erforderlich, dass auch Linienbezeichnungen flächendeckend in den Betriebsdaten gepflegt werden oder alternativ, dass ein Algorithmus entwickelt wird, auf dessen Basis zuverlässig eine Linienzuordnung möglich ist.

4 Engpassanalyse

Nach der Identifikation möglicher Engpässe gilt es deren Ursachen zu analysieren, um in einem nachfolgenden Schritt Lösungsvorschläge zu deren Auflösung (siehe Abschnitt 5) erarbeiten zu können. Engpässe können dabei sowohl infrastrukturell als auch betrieblich bedingt sein. Daher sind zu deren Analyse umfassende Informationen verschiedener Datenquellen auszuwerten. Im Wesentlichen wird hierbei auf die in der Netzmonitor-Datenbank enthaltenen Informationen zurückgegriffen, welche um weitere Datenquellen ergänzt werden. Die Informationen werden übersichtlich in Form von automatisiert erzeugten Steckbriefen bereitgestellt, sodass die Ergebnisse der Analyse und die daraus abgeleiteten Empfehlungen für die Bearbeitenden nachvollziehbar dargestellt werden. Die Steckbriefe bilden folglich eine gute Grundlage für weitergehende individuelle Analysen von Streckenabschnitten und Betriebsstellen. Der Aufbau der entwickelten Steckbriefe ist Abbildung 4 zu entnehmen und wird nachfolgend im Detail vorgestellt. Anschließend werden die wesentlichen Erkenntnisse der beispielhaft durchgeführten Engpassanalysen zusammengefasst.

4.1 Datenaufbereitung in Form von Steckbriefen

Im Steckbrief (siehe Abbildung 4) werden zunächst allgemeine Informationen bezüglich des identifizierten Engpasses bereitgestellt. So wird zwischen Streckenabschnitten und Betriebsstellen unterschieden sowie die entsprechende Streckennummer und -kategorie

angegeben. Darüber hinaus wird aufgezeigt, auf welchen Zeitraum sich die Auswertungen beziehen. Standardmäßig wird hierbei der Tageszeitraum (6 – 22 Uhr) angesetzt. Ergänzend ist vermerkt, ob der betrachtete Infrastrukturabschnitt als überlasteter Schienenweg (ÜLS) deklariert ist. Über grafische Elemente wird zudem sowohl eine räumliche Einordnung des betrachteten Infrastrukturbereiches in das Netz als auch ein Überblick über den Gleisplan ermöglicht.

Abbildung 4: Musterdarstellung eines Steckbriefes

Die Aufbereitung der Verspätungsdaten in Form von sogenannten Sunburst-Diagrammen (siehe Abbildung 5) ermöglicht einen schnellen Überblick über die Verspätungsentwicklung in dem betrachteten Infrastrukturbereich. So werden die Übergänge zwischen unterschiedlichen Verspätungskategorien anschaulich visualisiert. Der in Rot dargestellte Anteil beschreibt dabei Zugfahrten, deren Verspätungskategorie sich innerhalb des Infrastrukturbereiches verschlechtert. Ein hoher Anteil dieser Zugfahrten deutet folglich auf eine Erhöhung der Verspätungsschwere hin. Zugfahrten ohne Kategoriewechsel werden in Blau dargestellt, während Zugfahrten, deren Verspätungskategorie sich verbessert, grün eingefärbt sind.

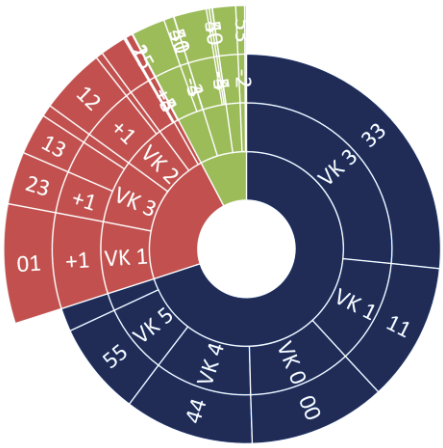


Abbildung 5: Beispielhaftes Sunburst-Diagramm zur Abbildung von Verspätungsdaten

Das zentrale Element des Steckbriefes ist die Einordnung des betrachteten Infrastrukturbereiches im Vergleich zu anderen Streckenabschnitten bzw. Betriebsstellen. So wird sowohl die in Abschnitt 3.1 beschriebene Verspätungsschwere als auch der Rang in der Engpassliste angegeben. Darüber hinaus werden Angaben zur Verspätungsschwere der angrenzenden Betriebsstellen (bei Streckenabschnitten) bzw. der zu- und ablaufenden Strecken (bei Betriebsstellen) gemacht, da die Ursache der Engpasserscheinung teilweise in benachbarten hochausgelasteten Netzbereichen zu finden ist.

Die in LeiDis erfassten Zugzahlen – bezogen auf einen Verkehrstag und nach Verkehrsarten (SPFV, SPNV und SGV) aufgeschlüsselt – zeigen die Belastung des Engpassbereiches auf. Für Streckenabschnitte erfolgt diese Ausgabe richtungsbezogen. Neben den tatsächlich durchgeführten Zugfahrten ist die optimale Zuganzahl (Nennleistung) für den Auswertezeitraum angegeben, sodass ein Vergleich zwischen Ist-Zugzahlen und der Nennleistung der Strecke ermöglicht wird. Auf diese Weise lässt sich eine fundierte Aussage zur Auslastung des betrachteten Infrastrukturbereiches direkt ableiten und einordnen, in welcher Qualität der identifizierte Engpass derzeit betrieben wird. Ist die tatsächliche Zuganzahl größer als die Nennleistung, so ist bereits bei mittlerem Verspätungsniveau mit häufigen Verspätungsübertragungen zwischen den Zugfahrten zu rechnen. Während die Nennleistungen für Streckenabschnitte nach derzeitigem Stand der Technik in LUKS-N (Leistungsuntersuchung Knoten und Strecken) ermittelt werden, existiert für Betriebsstellen kein äquivalenter Wert. Eine

entsprechende Methode zu erarbeiten ist Ziel des durch das DZSF geförderten Projektes „Methodik der Kapazitätsbewertung des Gesamtsystems und Knotenberechnung“ [2].

Im Betrieb kann es regelmäßig zu Verspätungsübertragungen zwischen zwei konkreten Zügen kommen. Diese lassen sich mittels automatischer Mustererkennung auf Basis der vorliegenden LeiDis-Daten identifizieren (siehe Abschnitt 3.4). Im Rahmen dieses Projektes wird diese Methode erstmals für die Auswertung von LeiDis-Daten angewendet. Auf diese Weise werden Verspätungsübertragungen erkannt, welche insbesondere bei komplexen Abhängigkeiten manuell nur schwer erkennbar wären. Im Steckbrief dargestellt sind die drei Episoden, welche die größten Verspätungsübertragungen aufweisen.

Bei Verspätungszuwächsen im Betrieb von mehr als 90 s sind die Ursachen der Verspätung in LeiDis durch das Betriebspersonal zu codieren. Im Steckbrief werden die drei häufigsten Verspätungs-Codierungen ausgegeben. Dabei erfolgt eine Aufteilung auf primäre (durch EIU und EVU verursachte) und sekundäre (durch andere Zugfahrten verursachte) Verspätungen. Angegeben sind jeweils sowohl die absoluten als auch die relativen Häufigkeiten der jeweiligen Verspätungsursachen. Auf diese Weise lassen sich Rückschlüsse auf die Signifikanz der jeweiligen Verspätungsursache ableiten.

Darüber hinaus werden häufig belegte Infrastrukturelemente dargestellt. Zur Ermittlung dieser Infrastrukturelemente wird eine deutschlandweite, mikroskopische Fahrzeit- und Belegungsrechnung in der Software LUKS® durchgeführt. Weiterhin wird die Belastung des höchstbelasteten Elementes ins Verhältnis zu der Belastung des 80 %-Quantils gesetzt. Auf diese Weise lassen sich die hoch ausgelasteten Bereiche innerhalb des betrachteten Infrastrukturbereiches detektieren. Zudem lässt sich bewerten, ob die Infrastruktur in der jeweiligen Betriebsstelle gleichmäßig ausgelastet ist oder ob sich die Belastung auf einzelne Elemente konzentriert.

Die Kenntnis über baustellenbedingte Einschränkungen ist im Rahmen der Analyse von Engpässen elementar. So stellen temporäre baubedingte Streckensperrungen kein Indiz für dauerhafte Einschränkungen der Infrastruktur dar und sind damit für die Identifikation von Engpässen ungeeignet. Im Steckbrief werden daher die Zeiträume von Totalsperrungen und der Anteil von Baustunden im gesamten Untersuchungszeitraum angegeben.

4.2 Erkenntnisse der beispielhaft durchgeführten Engpassanalyse

Die entwickelte Methodik wurde exemplarisch für das gesamte durch die DB Netz AG betriebene Netz im Zeitraum vom 02.01.2019 bis 30.11.2019, werktags zwischen 6 und 22 Uhr angewendet. Insgesamt zeigen die beispielhaft für mehrere Streckenabschnitte und Betriebsstellen durchgeführten Analysen identifizierter Engpässe, dass die in den Steckbriefen enthaltenen Informationen insbesondere zur Analyse von Streckenabschnitten und kleiner bis mittlerer Betriebsstellen geeignet sind. Für diese lassen sich mögliche Engpassursachen gut identifizieren. Großknoten sind aufgrund ihrer Komplexität für eine solch automatisierte Analyse hingegen nur bedingt geeignet. Für Großknoten ist daher eine individuelle, detaillierte Knotenanalyse zwingend erforderlich.

5 Verfahren zur automatisierten Ermittlung von Maßnahmen zur Engpassauflösung

Aufbauend auf der Analyse der identifizierten Engpässe können Lösungsvorschläge zu deren Beseitigung oder Abschwächung abgeleitet werden. Automatisiert können hierbei nur vergleichsweise allgemeine Maßnahmen empfohlen werden. Die auf diese Weise vorgeschlagenen Maßnahmen ersetzen keine detaillierte Betrachtung der Engpässe, wie sie im Rahmen der Begründung von Ausbaumaßnahmen erforderlich sind. Stattdessen zeigen sie Möglichkeiten zur Erhöhung der Betriebsqualität auf. Konkrete Vorschläge, wie beispielsweise der Einbau einer bestimmten Weiche, sind folglich nicht möglich. Dazu sind i. d. R. ergänzende Untersuchungen durchzuführen.

Für eine ganzheitliche Betrachtung des Engpassgeschehens ist es oftmals erforderlich, den Betrachtungsraum zu vergrößern, um auch Effekte durch Engpässe in der näheren Umgebung bei der Analyse mitberücksichtigen zu können.

5.1 Hinweis auf bereits bestehende Planungen

Für manche Infrastrukturbereiche sind bereits Maßnahmen zur Engpassauflösung oder Ausbaumaßnahmen zur Kapazitätssteigerung geplant. In diesem Fall wird ein entsprechender Hinweis gegeben. Eine solche Liste geplanter Maßnahmen kann vom EIU bereitgestellt oder aus öffentlich zugänglichen Daten (PEK zu ÜLS, BVWP und veröffentlichte EBWU) generiert werden.

Sollten die Steckbriefe unterstützend im Rahmen der Fahrplanerstellung genutzt werden, ist bspw. ein Hinweis auf geplante Baumaßnahmen zu geben, da diese i. d. R. mit einer Einschränkung der nutzbaren Kapazität einhergehen.

5.2 Maßnahmen zur Reduktion der Auslastung

Die Auslastung stellt eine wesentliche Kenngröße zur Klassifizierung eines Engpasses dar. Da es bisher noch kein Verfahren zur Bestimmung der Nennleistung von Betriebsstellen gibt, wird die Auslastung derzeit nur für Streckenabschnitte ausgegeben. Die Auslastung gibt dabei das Verhältnis der dort verkehrenden Zugzahlen zur Nennleistung an und wird zur Ableitung der erwarteten Betriebsqualität genutzt. Liegt die Auslastung im mangelhaften Bereich, wird gemäß Steckbrief ein Ausbau der Infrastruktur empfohlen.

Falls die Auslastung des identifizierten Engpassbereiches als nichtkritisch eingestuft wird, ist zu prüfen, ob die Auslastung der angrenzenden Infrastrukturbereiche im mangelhaften Bereich gelegen ist. In diesem Fall wird ein entsprechender Hinweis ausgegeben.

Großräumige Auswirkungen von Engpässen, die von hochausgelasteten Großknoten ausgehen und über direkt benachbarte Infrastrukturbereiche hinausgehen, sind durch eine automatisierte Auswertung nicht eindeutig identifizierbar. In diesem Fall lassen sich keine automatisierten Verweise erzeugen.

5.3 Maßnahmen zur Reduktion codierter Verspätungen

Die Codierungen der Verspätungen gem. DB Ril 402.9001 [3] erlauben Rückschlüsse auf mögliche Verspätungsursachen. So ermöglicht ein signifikant hohes Auftreten einer Verspätungsursache die Ableitung von Lösungsvorschlägen zur Engpassauflösung.

Zur Beurteilung, ab welcher Häufigkeit Codierungen als signifikant einzuschätzen sind, ist eine Definition entsprechender Schwellwerte erforderlich. Dies ist dann der Fall, wenn eine Verspätungsursache in einem Engpass im Vergleich zum Durchschnittswert des gesamten Netzes mindestens doppelt so häufig auftritt. Gleichzeitig muss die jeweilige Verspätungsursache jedoch mindestens in 5 % der Fälle codiert sein, um als ausreichend relevant betrachtet zu werden. Weist beispielsweise Code 50 „Haltezeitüberschreitung“ in einer Betriebsstelle einen Anteil von mehr als 6 % der gesamten Codierungen auf, während der Durchschnittswert über das Netz 3 % beträgt, wird als Lösungsvorschlag der

Satz „Reduzierung der Primärverspätungen insbesondere durch Optimierung der Halteprozesse“ vorgeschlagen.

Die Qualität der Lösungsvorschläge hängt dabei jedoch insbesondere von der Datenqualität in LeiDis ab.

6 Anwendungsgebiete

Das entwickelte Verfahren soll zukünftig bei der DB Netz AG, dem größten EIU in Deutschland, zur Anwendung kommen. Im Folgenden werden mögliche Anwendungsgebiete vorgestellt, in denen das Verfahren unterstützend eingesetzt werden kann.

Ein Abgleich der gemessenen Verspätungen mit der zu erwartenden Betriebsqualität auf Basis der Nennleistung ermöglicht eine Beurteilung der Umsetzungsgüte des zugrundeliegenden Fahrplans. Weist ein Infrastrukturbereich sowohl eine hohe Verspätungsschwere als auch eine Betriebsqualität im mangelhaften Bereich auf, deutet dies auf einen wesentlichen Kapazitätsengpass hin. Ist die Betriebsqualität hingegen in einem optimalen Bereich, während die Verspätungsschwere einen hohen Wert aufweist, könnten Optimierungen des derzeitigen Fahrplans bereits zu einer Auflösung des Engpasses führen.

Mit Hilfe der entwickelten Methodik gelingt es, in vergleichsweise kurzer Rechenzeit netzweite Ergebnisse zu erzeugen. Dadurch erhalten die Anwender:innen einen schnellen und umfangreichen Einblick in die infrastrukturellen und betrieblichen Gegebenheiten vor Ort und werden somit auf kritische Bereiche hingewiesen. Ebenso ist ein schneller Vergleich des Engpassgeschehens verschiedener Zeitscheiben möglich, sodass beispielsweise ein jahresweiser Vergleich der Kapazitätsengpässe des Netzes ermöglicht wird. Ebenso lässt sich auf diese Weise die Wirkung umgesetzter Maßnahmen vergangener Fahrplanperioden analysieren. Die Steckbriefe stellen dabei keinen Ersatz für detaillierte Eisenbahnbetriebswissenschaftliche Untersuchungen (EBWU) dar. Diese sind insbesondere zur Beurteilung der Notwendigkeit und der Wirkung von Investitionsmaßnahmen zusätzlich notwendig.

Derzeit gibt es sowohl bei der DB Netz AG als auch bei involvierten Dritten (z. B. Bundesländer, Aufgabenträger des SPNV) zahlreiche Listen mit kleineren geplanten Maßnahmen zur Auflösung von Engpässen und zur Erhöhung der Robustheit des Netzes. Oftmals weisen die Listen zwar eine hohe Schnittmenge, aber – z. B. aufgrund unterschiedlicher politischer Ziele – eine unterschiedliche Priorisierung der Maßnahmen

auf. Das entwickelte Verfahren kann daher zu einer übergeordneten und standardisierten Priorisierung der Maßnahmen beitragen.

7 Fazit und Ausblick

Die vorgestellte Methode zur Engpassidentifikation ermöglicht die Detektion problematischer Bereiche im gesamten Netz anhand von Betriebsdaten vergangener Fahrplanperioden. Im Gegensatz zu bestehenden analytischen Verfahren, die auf der Auswertung von Soll-Daten basieren, zeigt die Methode somit tatsächliche, systematisch auftretende Abweichungen zwischen Fahrplan und Betrieb auf. Zur Analyse der identifizierten Engpässe werden relevante Informationen aus verschiedenen Datenquellen in Steckbriefen übersichtlich und anwenderfreundlich zusammengestellt. Darüber hinaus werden Vorschläge für Maßnahmen zur Auflösung oder Abschwächung der Engpässe automatisiert abgeleitet und ebenfalls in den Steckbriefen dargestellt. Um bei der Ermittlung dieser Maßnahmen auch Wechselwirkungen zwischen Zugfahrten zu berücksichtigen, werden unter anderem mithilfe des Episode Minings erkannte, häufig auftretende Verspätungsübertragungen zwischen Zugfahrten ausgegeben. Die Methode ermöglicht über die Steckbriefe somit einen von Ortskenntnissen unabhängigen Überblick über die Gesamtsituation und kann insgesamt zu einer Verbesserung der Betriebsqualität beitragen. Zukünftig ist vorgesehen, das entwickelte Verfahren bei Eisenbahninfrastrukturunternehmen in den Regelprozess zu überführen, sodass die Durchführung eisenbahnbetriebswissenschaftlicher Untersuchungen vereinfacht und unterstützt werden kann.

Literaturverzeichnis

[1] G. Janssenswillen, B. Depaire und S. Verboven, „Detecting train reroutings with process mining," *EURO Journal on Transportation and Logistics*, Bd. 7, Nr. 1, pp. 1-24, 2018.

[2] A. Fink, F. Hantsch, U. Martin, S. Schmidhäuser und M. Fietze, „Verfahren zur Leistungsuntersuchung von Knoten unter Berücksichtigung der Einflüsse aus dem umgebenden Netz," *Eisenbahntechnische Rundschau (ETR)*, Bd. 72, Nr. 5, pp. 18-22, 2023.

[3] DB Netz AG, „Richtlinie 402.9001: Kodierung der Zusatzverspätungen," 01 06 2019.

Autorenangaben

Scherer, Philipp

Philipp Scherer studierte bis 2019 Physik an der TU Dortmund und ist seit Januar 2020 bei der VIA Consulting & Development GmbH beschäftigt, die mit Eintritt in die quattron Gruppe Beratungsleistungen im Namen der quattron management consulting GmbH erbringt. Hier beschäftigt er sich insbesondere mit eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Fragestellungen, der Auswertung großer Datenmengen und der Pflege verschiedener Softwaretools.

Kogel, Bastian

Dr.-Ing. Bastian Kogel ist seit 2009 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Verkehrswissenschaftlichen Institut der RWTH Aachen, wo er seit 2014 zusätzlich die Funktion der Institutsvertretung innehat. Nach dem Studium des Bauingenieurwesens an der RWTH Aachen war er als Team- und Projektleiter im Bereich Technologie der DB Netz AG tätig.

Lenze, Wiebke

Wiebke Lenze ist seit 2017 wissenschaftliche Mitarbeiterin am Verkehrswissenschaftlichen Institut der RWTH Aachen. Ihr wesentliches Forschungsgebiet stellt die Eisenbahnbetriebswissenschaft dar. Das Studium des Bauingenieurwesens mit der Vertiefungsrichtung Verkehrswesen absolvierte sie an der RWTH Aachen und der NTNU in Norwegen.

Maus, Maren

Maren Maus studierte bis 2020 Physik an der RWTH Aachen und arbeitet seitdem als Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Verkehrswissenschaftlichen Institut der RWTH Aachen im Bereich Eisenbahnbetriebswissenschaft.

Nießen, Nils

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Nils Nießen leitet seit 2013 das Verkehrswissenschaftliche Institut der RWTH Aachen. Nach dem Studium des Bauingenieurwesens und der Wirtschaftsgeographie an der RWTH Aachen promovierte er dort 2008. Anschließend war er Projektingenieur bei HaCon und Geschäftsführer der VIA Consulting & Development GmbH.

Session 12

Philipp Scherer, Bastian Kogel, Wiebke Lenze, Maren Maus, Nils Nießen, Mario Fietze

---

Fietze, Mario

Mario Fietze studierte Physik und Verkehrswissenschaften an der TU-Dresden. Er bearbeitet als Forschungsreferent beim Deutschen Zentrum für Schienenverkehrsforschung Fragen zu den Themen Bahnenergieversorgung, Leit- und Sicherungstechnik sowie zur Kapazität des Schienennetzes.

IRSA 2023

SESSION 13

STRASSENBAHNTECHNIK

TRAM TECHNOLOGY

Session 13
Thomas Gerlach, Torben Lehnert, Sven Jenne

Akustische Optimierungen für lärmarme Schienenfahrzeugräder im urbanen Raum mit Fokus auf die Wirkung gegen das Kurvenquietschen

Gerlach, Thomas[1], Lehnert, Torben[1], Dr.-Ing. Jenne, Sven[1]

[1]Gutehoffnungshütte Radsatz GmbH, GHH-BONATRANS Group, Oberhausen, Deutschland

Zusammenfassung

Dieser Beitrag befasst sich mit der Anwendung von Methoden und Bewertungsinstrumenten für die Entwicklung geräuscharmer Räder. Es werden sowohl Entwicklungsmethoden als auch die Auslegung zur Optimierung von Radschallabsorbern durch Geometrie und Dämpfungsmaterialien behandelt. Ein Fokus lag dabei in der Weiterentwicklung von Maßnahmen gegen das Kurvenquietschen. Die GHH-Radsatz arbeitete in einem gemeinsamen Entwicklungsprojekt zusammen mit VibraTec. Ziel des Projektes war die Evaluierung der bestehenden Absorberlösungen und deren Optimierung für die kundenspezifischen Anwendungen. Es wurden Grundlagen für die Optimierung von Absorbern erarbeitet. Der Beitrag erläutert die drei verschiedenen Geräusch- und Erzeugungsmechanismen und Bewertungsmöglichkeiten durch Tools sowie einige Optimierungsparameter. Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Ermittlung des Einflusses von elastischen Rädern auf die Umwelt insbesondere auf Bodenerschütterungen im Vergleich mit herkömmlichen Vollrädern.

Keywords: Akustik, Rollgeräusche, Kurvenquietschen, Bodenvibrationen, Schallabsorber

1 Einleitung

Ein zentraler Aspekt für mehr Akzeptanz des Schienenverkehrs im innerstädtischen und stadtverbindenden Verkehr ist die Reduzierung von Lärm an den Quellen. Der entstehende Lärm kann die Lebensqualität erheblich beeinträchtigen und sogar zu gesundheitlichen Problemen führen [1]. Maßnahmen zur Lärmminderung an den Quellen

von Fahrzeugen und Infrastruktur sowie im Ausbreitungsweg sind mittlerweile in großer Bandbreite verfügbar. Aus Sicht des Radsatzherstellers sind folgende drei Lärmquellen relevant: Rollgeräusch, Kurvenquietschen und Bodenschwingungen. Die komplexe Rad-Schiene-Interaktion bildet den Erregungsmechanismus dieser Geräuschquellen. Die Herausforderung besteht darin, ohne aufwändige und kostenintensive Messkampagnen im Feld mit Hilfe von Neu- und Weiterentwicklungen die Lärmreduzierung zu prognostizieren und zu bewerten.

Zur Beurteilung der akustischen Performance von Rädern und entsprechenden Schwingungsabsorbern wird eine Kombination von praxistauglichen Simulationstools und Erfahrungswerten verwendet. Diese lassen sich kosten- und zeiteffizient einsetzen, so dass Neuentwicklungen ohne aufwendige Feldversuche beurteilt werden können.

Die GHH-Radsatz hat sich der Herausforderung angenommen und ein Projekt zur gezielten Entwicklung von optimierten, lärmarmen Rädern gestartet. Lärmreduktion kann insbesondere durch die Verwendung von Schwingungsabsorbern an Rädern erzielt werden, die gezielt auf die Rand- und Einsatzbedingungen angepasst werden. Ziel des Projektes war es, die Schwingungsabsorber im Zusammenspiel mit den Rädern weiterzuentwickeln. Zur Beurteilung der akustischen Performance von Rädern und entsprechenden Schwingungsabsorbern wird eine Kombination von praxistauglichen Simulationstools und Erfahrungswerten verwendet.

Dabei sind verschiedene Kombinationen von Rädern und Absorbern hinsichtlich ihrer Wirkung gegen das Rollgeräusch, Kurvenquietschen und Bodenerschütterungen mittels Laborversuchen und FE - Simulationen untersucht und verglichen worden. Der Fokus dieser Untersuchungen lag primär auf der Optimierung von Schallabsorbern für gummigefederte **GHH**® *V60* Räder, die im urbanen Raum zum Einsatz kommen. Nach Auswertung der Ergebnisse aus Simulationen und Laborversuchen konnten Optimierungsmaßnahmen für die Schwingungsabsorber gegen das Kurvenquietschen abgeleitet werden. Die Wirksamkeit dieser Maßnahmen mittels Prototypen-Testreihen wurde hinsichtlich der prognostizierten Performance anhand von Simulationen und Messungen evaluiert.

2 Lärm- und Vibrationsausbreitungswege

Die Entwicklung lärmarmer Räder erfordert die Betrachtung dreier wesentlicher Schallquellen: Rollgeräusch, Kurvenquietschen und Bodenerschütterungen. Im Folgenden werden die drei entscheidenden Schallerzeugungsmechanismen erläutert.

2.1 Rollgeräusch

Die Lärmemission von Eisenbahnrädern hängt von den Parametern des Kontakts zwischen Rad und Schiene, dem modalen Verhalten des Rads und der Luftschallemission ab (Abbildung 1). Das Rollgeräusch ist die dominierende Lärmquelle für Schienenfahrzeuge zwischen 50 und 250 km/h.

Die Rauheit und damit die Anregung von Rad und Schiene ist die Ursache dieser Lärmquelle, die durch ein breitbandiges Verhalten zwischen 100 und 5000 Hz gekennzeichnet ist. Schiene, Schwelle und Rad tragen zu dieser Geräuschquelle bei.

Zur Beschleunigung von Entwicklungszyklen und zur Vereinfachung von Genehmigungsverfahren für Lärmminderungsmaßnahmen in der Praxis wurden im Rahmen des DEUFRAKO-Projekts STARDAMP "Standardisierung von Dämpfungstechnologien für Schiene und Rad" praxisnahe Methoden zur Bewertung der Anwendbarkeit und Wirksamkeit von Schwingungsabsorbern für Rad und Schiene zur Reduzierung von Rollgeräuschen entwickelt [2, 3]. Grundlage des Bewertungsverfahrens ist die Kombination von standardisierten Labortests und einer darauf abgestimmten rechnerischen Simulation. Die Methoden und die Simulationsverfahren wurden für Vollräder entwickelt [2, 3]. Weiterentwicklungen haben gezeigt, dass diese auch auf gummigefederte Räder angewendet werden können.

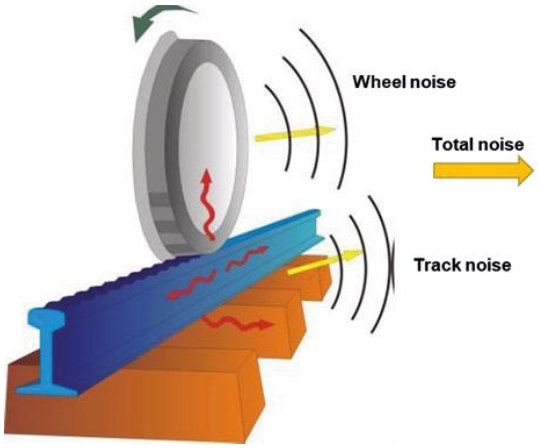


Abbildung 1: Einfluss von Kontakt, Rad und Schienenrauheit (Quelle: Thompson, David, Railway noise and vibration: mechanisms: Modelling and Means of Control, Elsevier 2009)

2.2 Kurvenquietschen

Kurvenquietschen ist die häufigste Ursache für Lärmbeschwerden vor allem bei Stadtbahnen. Kurvenquietschen ist ein "lokales" Problem und hängt von zahlreichen

Einflussfaktoren ab, wie dem Kurvenradius, Gleis und Oberbau, dem Fahrwerkskonzept, den Witterungsbedingungen, dem Einfluss des Rad-Schiene-Kontakts, dem Anlaufwinkel des inneren Rades im Bogenradius, der Radlast, der Geschwindigkeit und der Radkonstruktion selbst. Kurvenquietschen wird im Wesentlichen durch den seitlichen Schlupf eines Radsatzes in engen Kurven verursacht. Mechanische Instabilitäten führen zu einer Schwingungsanregung der Räder, die tonal, d.h. bei bestimmten Frequenzen, Schall abstrahlen. Der so entstehende Lärm wird als besonders unangenehm empfunden und liegt oft 10-30 dB über dem Rollgeräusch. Die genauen Mechanismen und Modellierungsmöglichkeiten sind noch forschungsbedürftig [4]. Radabsorber sind in der Lage, das Kurvenquietschen zu verhindern oder abzuschwächen. Die Wirksamkeit eines Absorbers kann anhand der modalen Dämpfungsraten verglichen und mit Erfahrungswerten bewertet werden.

2.3 Bodenerschütterungen

Der letzte Aspekt sind Bodenschwingungen, die im Rad-Schiene-Kontakt und im Ausbreitungsweg, insbesondere im Stadtverkehr, reduziert werden müssen. Diese Schwingungen sind durch ein breitbandiges Verhalten im Frequenzbereich zwischen 20 und ca. 300 Hz gekennzeichnet.

Diese Geräusche sind in der Regel nicht in unmittelbarer Nähe des Gleises, sondern in Gebäuden wahrnehmbar. Besonderes Augenmerk ist auf Gebiete mit Straßenbahnverkehr und insbesondere in historisch gewachsenen Städten mit gleisnaher Bebauung zu legen. Die Schwingungen werden über den Boden in das Gebäude eingetragen, so dass dessen Wände vibrieren und den Schall hörbar abstrahlen.

Ein wesentlicher Parameter für diese Schwingungen sind die Rad-Schiene-Kräfte, die in das Gleis eingeleitet werden. Der Einfluss verschiedener gummigefederter Räder auf die Bodenschwingungen wurde mit dem von VibraTec entwickelten Tool GroundVib® ermittelt. Diese Software ermöglicht die Berechnung der in den Boden eingeleiteten Rad-Schiene-Interaktionskräfte sowie der Schwingungsausbreitung im Boden.

3 Rollgeräuschbewertung

Das Rollgeräusch wird mit dem Tool STARDAMP berechnet. Die Radmoden werden mit einer Finite-Elemente-Analyse berechnet (normalerweise beeinflussen Schallabsorber hauptsächlich die modale Dämpfung und weniger die Frequenzen), und die Dämpfungswirkung von Radschallabsorbern wird experimentell charakterisiert.

Zur Bestimmung der modalen Dämpfung wird das Rad mit und ohne Absorber mit einem Impulshammer angeregt (6 Punkte), und die Reaktion wird mit einzelnen Beschleunigungssensoren gemessen.

Die Antworten werden mit einzelnen Beschleunigungssensoren gemessen (3 Messpunkte, axial und radial). Die erhaltenen Übertragungsfunktionen werden analysiert, um die modalen Parameter abzuleiten.

Dies ist eine schnelle Methode zur akustischen Bewertung und benötigt in der Regel nur ca. 1 - 2 Tage mit Nachbearbeitung. Mit diesen Informationen und dem Vergleich mit der berechneten modalen Basis ist es möglich, die Modenformen und die Resonanzfrequenzen der Hauptmoden, die maßgeblich für das Rollgeräusch verantwortlich sind, bis zu etwa 3,5 kHz (Radialmode Rn und 1-axiale Moden 1-Ln) zu ermitteln.

Die 2-Ln Moden können mit diesem Verfahren nicht direkt identifiziert werden, sind aber von geringerer Bedeutung.

Wenn die berechneten Modalfrequenzen hinreichend nahe an den Messungen liegen, kann man die 2Ln-Moden jedoch allein aufgrund ihrer Frequenzen identifizieren.

Die modale Dämpfung wird mit der Halbwertsbreitenmethode (3-dB Bandbreitenmethode) abgeschätzt. Die folgende Gleichung wird angewendet:

$$\xi = c/c_{crit} = \frac{f_2 - f_1}{2f_0}$$

Dabei ist: (ξ = Verlustfaktor (Dämpfung [%]), C/Ccrit = kritisches Dämpfungsverhältnis), $f2$, untere Frequenz bei -3dB, Mit $f1$, obere Frequenz bei -3dB, $f0$, Spitzenfrequenz

Die Messpositionen und das Analyseverfahren sind in Abbildung 2 und Tabelle 1 dargestellt [2, 3].

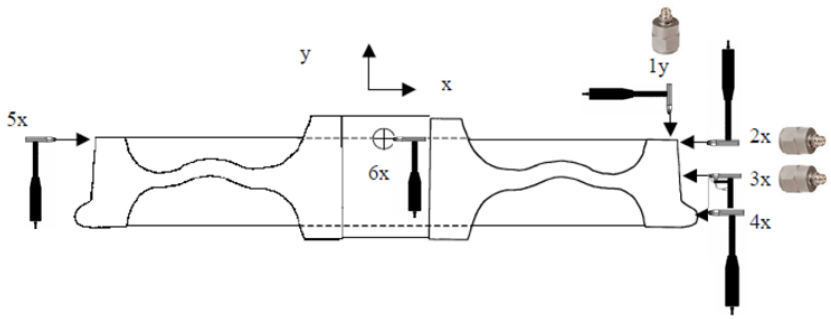


Abbildung 2: Anregungs- und Messpunkte

Tabelle 1: Messpunkte und Analyseverfahren für die experimentelle Modalanalyse

FRF		**Analyse der Frequenzgangfunktion (FRF)**
Anregungspunkt	Messpunkt	
1Y	1Y	Auftreten der 0-Axialmoden (0-Ln, wobei n die Anzahl der Knotendurchmesser ist).
2X	2X	Auftreten der radialen Moden (*Rn*) und der 1 axialen Mode (1-*Ln*).
4X	2X	Auftreten von *Rn* und 1Ln Moden. Um diese Moden zu trennen, wird diese FRF (4X - 2X) verglichen mit der FRF (2X - 2X), und die Werte der Phase werden für eine gleiche Resonanzfrequenz verglichen: Wenn die Phase gleich ist, bewegen sich die Punkte 2X und 4X in Phase: dies ist ein Merkmal für einen radialen Mode. Wenn die Phasenverschiebung nahe bei 180° C liegt, sind die Punkte 2X und 4X phasenverschoben: dies kennzeichnet einen 1-axialen Mode.
5X Der Punkt 5X hat die gleiche Position auf der Lauffläche wie der Punkt 2X, aber auf dem gegenüberliegenden Abschnitt (180°-Verschiebung)	2X	Vergleich der Phase für die FRF (2X - 2X) und (5X - 2X) in der Nähe einer Resonanzfrequenz: gleiche Phase: die Anzahl der Knotenpunkte ist gerade, 180° Phasenverschiebung: die Anzahl der Knotenpunkte ist ungerade.
3X	3X	Der Punkt 3X liegt in der Nähe eines Schwingungsknotens der 1-Ln-Moden: Entstehung der Rn-Moden.
6X *	2X	Vergleich der Phase für die FRF (2X - 2X) und (6X - 2X) in der Nähe einer Resonanzfrequenz: Ermöglicht es, n=2 und 4 Moden von n=0 Moden zu trennen.

***** Der Anregungspunkts 6X ist 90° zu den Messpunkten nX versetzt. X ist die umlaufende radiale Koordinate. Den Punkt 6X auf die gleiche Y-Koordinate wie den Punkt 2X setzen.

Zur Ermittlung des Verlustfaktors bzw. der modalen Dämpfung wird die Amplitude bei jeder Resonanzfrequenz analysiert. Mit diesem Verfahren werden die axialen und

radialen Resonanzamplituden aus der Übertragungsfunktion untersucht. Dieses Messverfahren wird zur Bewertung der Dämpfung zum Rollgeräusch als auch zum Kurvenquietschen verwendet. Abbildung 2 und Tabelle 1 zeigen die Messmethode für Vollräder. Diese Methode kann ebenso für gummigefederte Räder verwendet werden, mit der Besonderheit der Bettung des Radreifen auf Gummielementen oder Gummiringen. Daher ist die FE- Analyse (Modalanalyse ohne Absorber) und die experimentelle Modalanalyse im Falle von gummigefederten Rädern mit und ohne Absorber erforderlich. Da, wie gesagt, die berechneten und gemessenen Moden für Vollräder ohne Radschallabsorber im Allgemeinen mit denen eines Rades mit Absorber sehr gut übereinstimmen, kann die Identifizierung der Moden weitgehend auf die numerischen Ergebnisse gestützt werden. Die mittels FE-Berechnung ermittelten Moden lassen sich mit den experimentell (mit Radschallabsorber) ermittelten abgleichen und entsprechend anpassen (Curve fitting), dies insbesondere bei gummigefederten Rädern.

3.1 Ein Beispiel der Messung und Bewertung des Rollgeräusches

Zur Beurteilung des Rollgeräuschs wird im Folgenden ein Beispiel anhand von Messungen gegeben. Die Messungen und Analysen wurden an einem gummigefederten Rad **GHH**® *V60*, der mit einem **GHH**® *SILENCE-PL* und einem **GHH**® *SILENCE-SR* Absorber ausgestattet wurde, durchgeführt. Zur Durchführung der Messungen wurde das Rad mit den Beschleunigungssensoren frei aufgehängt an den vorgegebenen Positionen mittels Impulshammer angeregt (Abbildung 3 und 4, beispielhaft). Damit lassen sich die Frequenzen und Dämpfungsverhältnisse der wichtigsten Radmoden bestimmen. Der Punkt 3X entspricht dem nominalen Rad-Schiene-Kontaktpunkt. Ein Beispiel für eine FRF (Frequenzganganalyse) der Messung an den Messpositionen 1Y und 3X an einem gummigefederten Rad mit 2 verschiedenen Schallabsorbern ist in den Abbildungen 5 und 6 dargestellt.

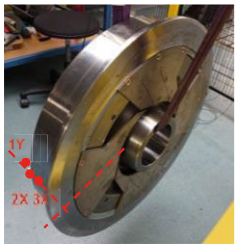


Abbildung 3: Rad frei hängend

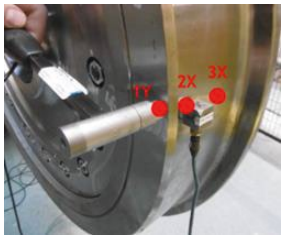


Abbildung 4: Messpunkte 3X, 2X und 1Y

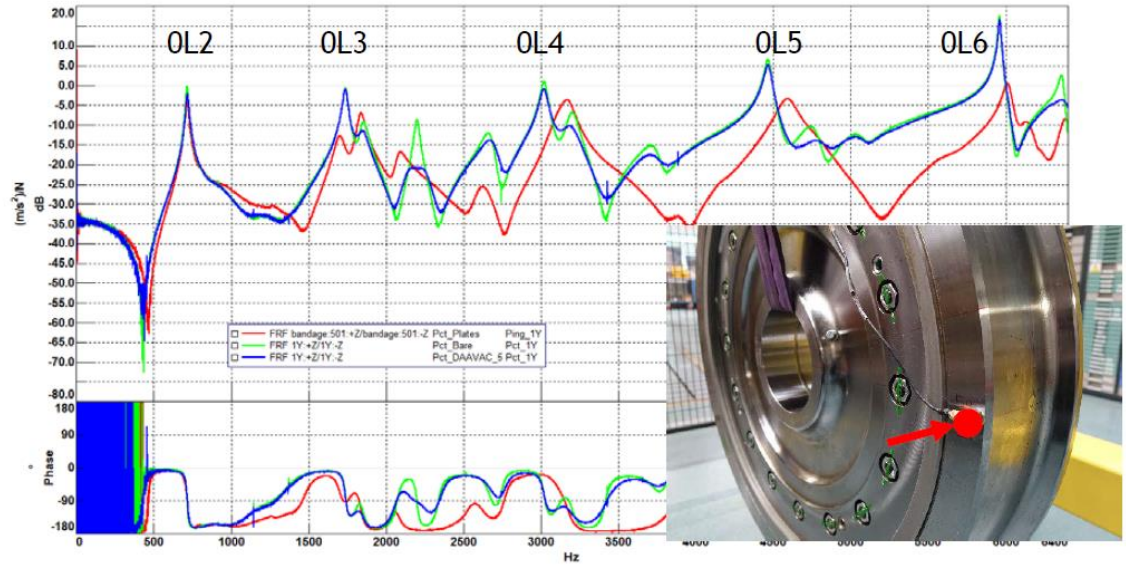


Abbildung 5: Beispiel FRF Messpunkt 1Y: Gummigefedertes Rad grün mit Absorbern SILENCE-SR blau und SILENCE-PL rot

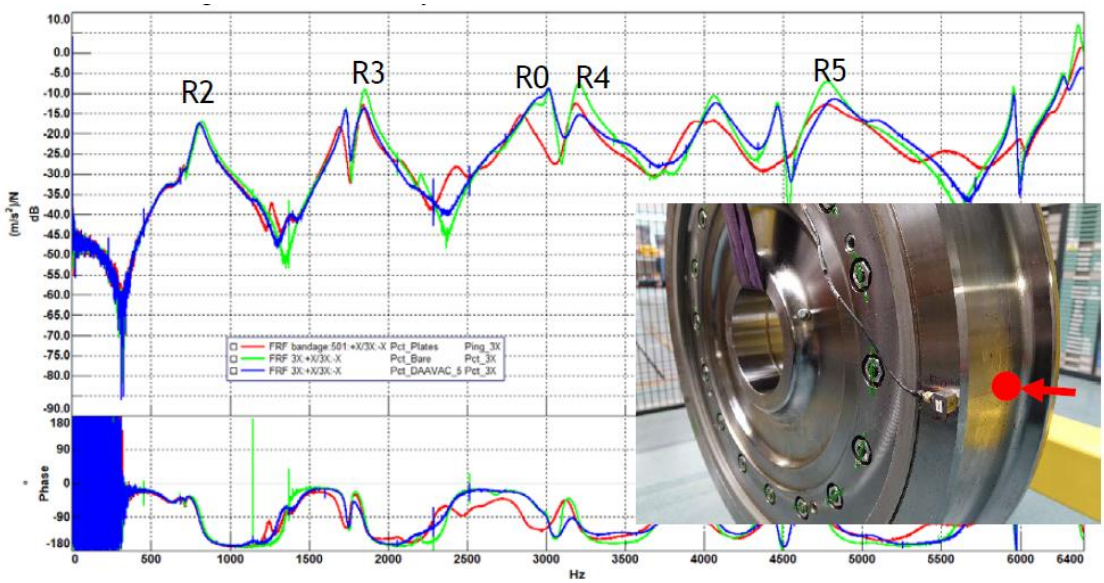


Abbildung 6: Beispiel FRF Messpunkt 3X: Gummigefedertes Rad grün mit Absorbern SILENCE-SR blau und SILENCE-PL rot

Generell wird der Frequenzbereich von 0 bis 6400 Hz untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass der **GHH**® *SILENCE-PL* Absorber eine sehr hohe Modendämpfung erzielt.

Diese starke Dämpfung wirkt sich zum einen positiv auf das Rollgeräusch und zum anderen auf das Kurvenquietschen aus. Das **GHH**® *V60* Rad hat aufgrund der hohen Dämpfung durch den steifen, elastischen Gummiring ein hervorragendes Rollgeräuschverhalten. Das Rollgeräusch wird durch das Gleis (Schiene + Schwelle) dominiert. Das **GHH**® *V60* Rad ohne Absorber hat bereits hohe Dämpfungswerte, die das

Risiko von Kurvenquietschen im Vergleich zu Rädern mit geringerer Dämpfung Monoblockräder signifikant reduzieren. GHH-optimierte Absorber erhöhen die Dämpfung insbesondere gegen das Kurvenquietschen nochmals deutlich.

4 Bewertung des Kurvenquietschen

Kurvenquietschen ist die Geräuschquelle, die bei Straßen- und Stadtbahnen am häufigsten zu Beschwerden führt.

Das Kurvenquietschen wird durch das innere Rad des führenden Radsatzes verursacht (Laufflächenquietschen). Sicher ist die Ursache des Kurvenquietschens im Mechanismus einer unvollkommenen Lenkung des Radsatzes in der Kurve zu sehen. In der Regel rutscht das innere Führungsrad in Querrichtung durch, was auch als Stick-Slip-Effekt bezeichnet wird. Bei diesem Effekt befindet sich der Rad-Schiene-Kontakt in einem transienten Zustand, in dem ein Wechselspiel zwischen Gleiten und Haften auftritt (Abbildung 7). Dadurch wird das Rad bzw. bei gummigefederten Rädern der Radreifen intensiv zu axialen Schwingungen um seine Eigenfrequenzen angeregt, was zu den unangenehmen hohen Schallereignissen in einem oder mehreren Reintönen führt. Das Rad wird typischerweise im Frequenzbereich von 500 - 8000 Hz angeregt, wobei das Kurvenquietschen den Rollgeräuschpegel meist um 10-30 dB übersteigt [6].

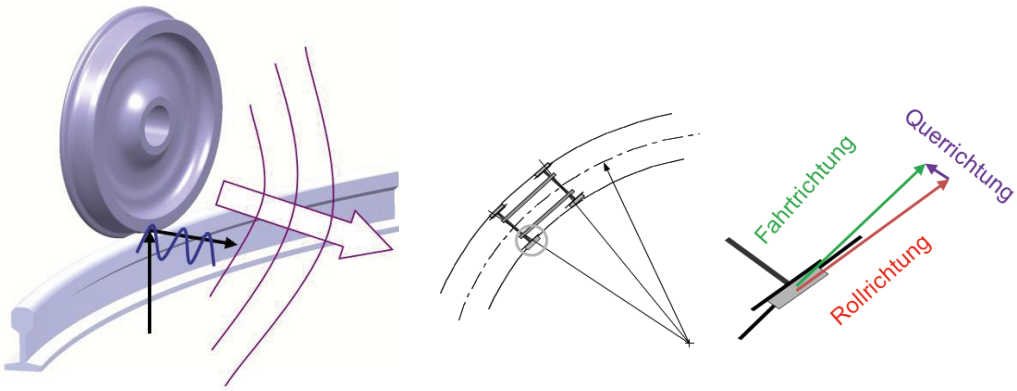


Abbildung 7: Radsatz im Bogen und Anlaufwinkel

Die Erkenntnisse aus Forschung und Praxis zeigen, dass das Auftreten von Kurvenquietschen sehr stark von den äußeren Bedingungen beeinflusst wird. Kurvenquietschen tritt sehr häufig in engen Kurven von weniger als 200 - 300 m auf, aber selten bei nassem Wetter. Das Phänomen des Kurvenquietschens ist natürlich auch von vielen anderen Parametern abhängig, wie z.B. Schienenzustand, Temperatur,

Luftfeuchtigkeit, Radkonstruktion und anderen äußeren Einflüssen. Die Häufigkeit des Kurvenquietschens nimmt vor allem auf trockenen Schienenoberflächen deutlich zu.

Die möglichen Gegenmaßnahmen lassen sich aus den genannten Einflussparametern ableiten. So kann das Kurvenquietschen durch die Wahl der Trassierung, die Fahrweise (Geschwindigkeit), das Drehgestell- und Fahrwerkskonzept (Anfahrwinkel des Rades auf der Kurveninnenseite), durch aktive Beeinflussung der Schienenoberfläche wie Bewässerung und Schmierung und nicht zuletzt durch die Radgestaltung bzw. -konstruktion einschließlich dämpfender Maßnahmen wie Radschallabsorber beeinflusst werden.

Die Verwendung von elastischen Rädern führt zu einer Dämpfung der axialen Eigenfrequenzen des Radreifens. Dies wird durch die Lagerung des Radreifens auf Gummiringen an der Schnittstelle zum Radkörper erreicht. Dadurch werden nicht nur die Abrollgeräusche reduziert, sondern auch das Kurvenquietschen verringert. Um die dominanten Frequenzen, die beim Kurvenquietschen eine Rolle spielen, weiter zu dämpfen, können Radschallabsorber eingesetzt werden, wobei je nach Anwendung unterschiedliche Ausführungen verwendet werden können. Labor- und Feldmessungen bestätigen die Wirksamkeit von Radschallabsorbern.

Die Bewertung aus Messungen durch Anschlagversuche des Kurvenquietschgeräusches beschränkt sich auf einen Vergleich der modalen Dämpfung des Rades mit Absorber durch Referenzwerte. Bei Dämpfungswerten c/ccrit > 1,5 % wird das Kurvenquietschen im Allgemeinen vollständig unterdrückt [5]. Mit der STARDAMP-Beschleunigungsmessmethode kann der Einfluss des Schallabsorbers auf die Raddämpfung, insbesondere für kurvenquietschrelevante Radmoden (0L2, 0L3 und 0L4), ermittelt werden. Eine detailliertere Bewertung erfordert komplexe mathematische Modelle, die derzeit nur im akademischen Umfeld verfügbar sind [4].

Das Kurvenquietschverhalten kann auch mit dem VibraTec-eigenen Tool SONIA (Squeal Occurrence Noise Analyser) simuliert werden. Verschiedene Kurvenszenarien (Kurvenradius, Reibungsverhältnisse, etc.) können untersucht werden und das Risiko des Auftretens von Kurvenquietschen wird für jeden kritischen Radmodus und verschiedene Radschallabsorber bewertet.

4.1 Ein Beispiel der Messung und Bewertung des Kurvenquietschen

Zur Beurteilung des Kurvenquietschen wird im Folgenden ein Beispiel anhand von Messungen gegeben. Die Messungen und Analysen wurden an einem Vollrad mit einem

Laufkreisdurchmesser von 870 mm, der mit einem **GHH**® *SILENCE-PL* Absorber ausgestattet wurde, durchgeführt. Zur Durchführung der Messungen wurde der Radsatz mit den Beschleunigungssensoren frei aufgehängt und das Vollrad an den vorgegebenen Positionen mittels Impulshammer angeregt (Abbildung 8 und 9, beispielhaft). Damit lassen sich die Frequenzen und Dämpfungsverhältnisse der wichtigsten Radmoden bestimmen. Der Punkt 3X entspricht dem nominalen Rad-Schiene-Kontaktpunkt. Ein Beispiel für eine FRF (Frequenzganganalyse) der Messung an den Messpositionen 1Y und 3X ist den Abbildungen 10 und 11 dargestellt.

Abbildung 8: Radsatz frei hängend

Abbildung 9: Messpositionen 3X, 2X und 1Y

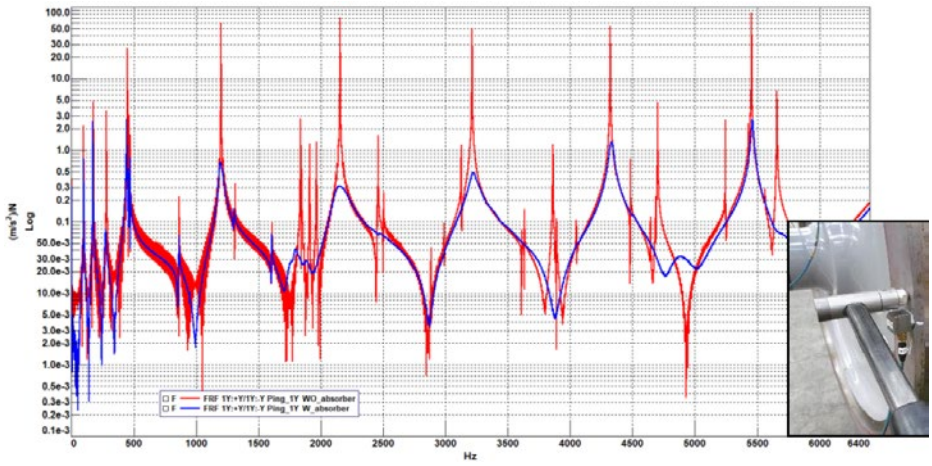


Abbildung 10: Beispiel FRF Messpunkt 1Y: Vollrad rot und Vollrad mit Absorbern SILENCE-Pl blau

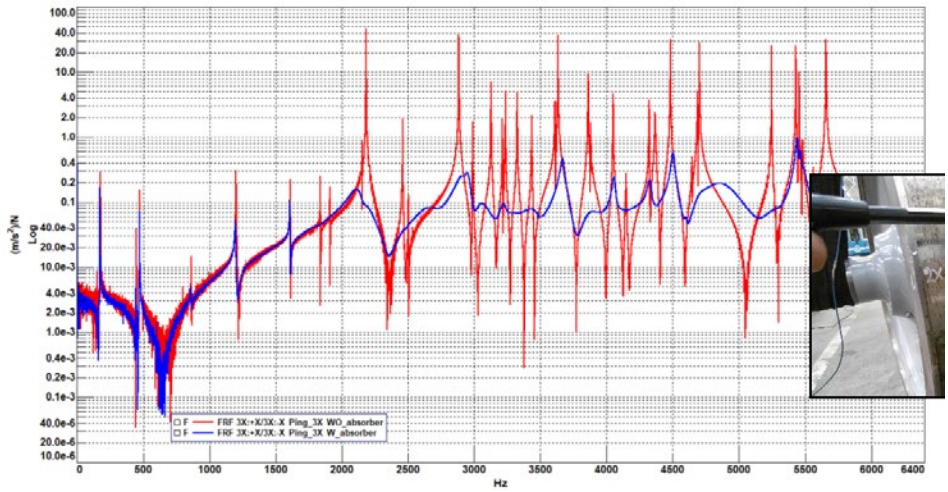


Abbildung 11: Beispiel FRF Messpunkt 1Y: Vollrad rot und Vollrad mit Absorbern SILENCE-Pl blau

Die modale Dämpfung des Vollrades (ohne Absorber) ist erwartungsgemäß sehr gering und entspricht den Standardwerten für Monoblock-Stahlräder. Man sieht hier die sehr deutlich die Breitbandwirkung der Absorber. Die Ergebnisse zeigen, dass der **GHH®** *SILENCE-PL* Absorber eine sehr hohe Modendämpfung bietet, insbesondere oberhalb von 1500 Hz. Für die wichtigsten Moden 0Ln, Rn & 1Ln mit n = 2, 3, 4 werden Werte zwischen 0,44% (0L2) und 5,26% (0L4) erreicht. Diese starke Dämpfung wirkt sich zum einen positiv auf das Rollgeräusch und zum anderen signifikant auf das Kurvenquietschen aus.

5 Schallabsorberausführungen GHH® *SILENCE*

Im Laufe der Jahre wurden verschiedene Absorbervarianten entwickelt und im Betrieb erprobt: Stahlkiesabsorber, Schrumpfringe, dämpfende Reibringe, Constraint Layer Dämpfer, Blockabsorber, Beschichtungen mit in den Radsteg eingebetteten Kunststoffschichten und -platten, Ausschäumen der Radscheibe mit Kunststoffen und Absorberschilden. Das Prinzip beruht im Wesentlichen immer auf der Erhöhung der inneren Verlustfaktoren des Rades, entweder durch Umwandlung der Schwingungen in Wärme in einem viskoelastischen Kunststoff oder durch Entnahme der Schwingungsenergie aus der Festkörperreibung. Im Nah- und Regionalverkehr und Straßenbahnen sind Dämpfungsringe und Plattenabsorber wegen des begrenzten Bauraums, der Gewichtszunahme, der zusätzlichen Kosten und des niedrigen Wartungsbedarfs am weitesten verbreitet [6].

Ausführung **GHH**® *SILENCE-PL* Radschallabsorber (Abbildung 12):

Der Absorber besteht im Wesentlichen aus übereinander angeordneten Edelstahlblechen mit einer dazwischenliegenden Schicht aus viskoelastischem Dämpfungsmaterial, die als hornförmige Zungen geschlitzt sind. Das Dämpfungsmaterial wird auf Scherung beansprucht, wodurch die Dämpfungsschicht sehr dünn ausgeführt werden kann. Aufgrund der Hornform der Zungen hat der Absorber oberhalb einer Grenzfrequenz eine breitbandige Wirkung. Wenn die Schwingungen als Biegewellen in die Platten eingeleitet werden, wird die Zwischenschicht auf Scherung beansprucht und hat daher eine große Dämpfungswirkung bei geringer Schichtdicke. Die Absorber sind kraftschlüssig mit dem Radkranz oder dem Radreifen bei gummigefederten Rädern verschraubt. Der Radsteg ist ebenfalls teilweise abgedeckt.

Abbildung 12: **GHH**® *SILENCE-PL*

Abbildung 13: **GHH**® *SILENCE-SR*

Ausführung **GHH**® *SILENCE-SR* Radschallabsorber (Abbildung 13):

GHH® *SILENCE-SR* Ringdämpfer bestehen aus zwei Ringelementen aus Stahl mit einer dazwischenliegenden Elastomer-Dämpfungsschicht. Der Absorber wird wie ein Sprengring in eine Nut an der Unterseite des Radkranzes oder Radreifens eingespannt.

*Ausführung **GHH**® SILENCE-RR Radschallabsorber (Abbildung 14):*

Mit den Dämpfungsringen **GHH**® *SILENCE-RR* kann ebenfalls eine deutliche Geräuschreduzierung erreicht werden. Sie zeichnen sich durch geringen Einbauraum, einfache Montage und die Möglichkeit der Nachrüstung als wirtschaftliche Lösung aus. Mit den in Abbildung 14 gezeigten optimierten runden Dämpfungsringen kann eine relativ hohe Lärmreduktion erreicht werden.

*Abbildung 14: **GHH**® SILENCE-RR*

6 Bewertung der Bodenerschütterungen

Bodenerschütterungen tragen zum Lärm im niederfrequenten Bereich (< 300 Hz) bei. Dieser Lärm ist in der Regel nicht in unmittelbarer Nähe des Gleises wahrnehmbar, sondern in Gebäuden (Abbildung 12). Die Schwingungen werden über den Boden in das Gebäude getragen, so dass dessen Wände vibrieren und den Schall hörbar abstrahlen. Ein wesentlicher Parameter für diese Schwingungen sind die Rad-Schiene-Kräfte, die in das Gleis eingeleitet werden. Der Einfluss verschiedener gummigefederter Räder auf die Bodenschwingungen wurde mit dem von VibraTec entwickelten Tool GroundVib® ermittelt.

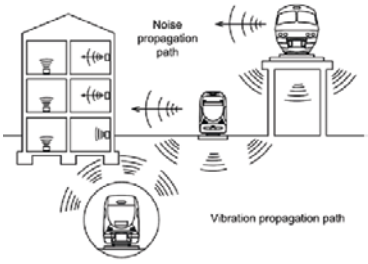


Abbildung 12: Lärm und Vibrationsausbreitungswege (Quelle: Rail traffic noise and vibration mitigation measures in urban areas, Maja Ahac, Stjepan Lakusic)

Um den Vorteil der elastischen Räder (blau, orange) bei Bodenschwingungen zu verdeutlichen, vergleicht Abbildung 15 die Kraftwerte mit denen eines Monoblockrades (schwarz). Die erhöhte Masse und das fehlende elastische Element erhöhen das Kraftniveau deutlich (+2,2 dB RMS gegenüber **GHH**® *V60* Rad und +5,5 dB RMS gegenüber **GHH**® *ULTRA-S*, Abbildung 13 und 14), insbesondere unterhalb der Filterfrequenz, die im Frequenzband von 63 Hz liegt.

Abbildung 13:
GHH®*V60*

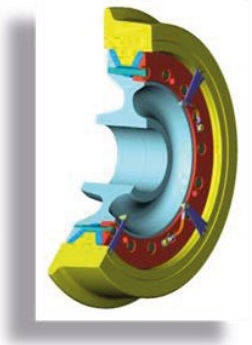
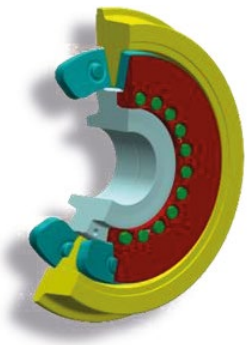


Abbildung 14:
GHH®*ULTRA-S*



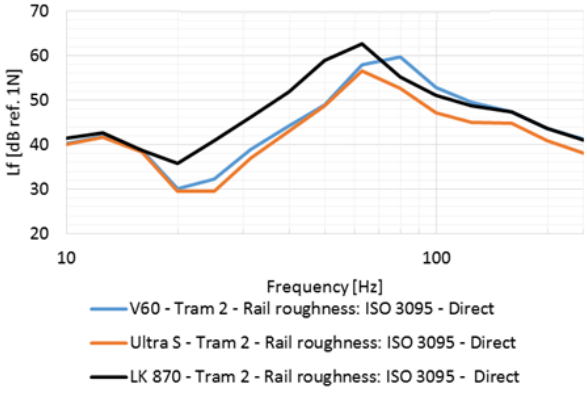


Abbildung 15: Einfluss des Radtyps auf das direkte Gleis - Straßenbahn 2 – gummigefedertes Rad versus Monoblockrad (LK 870)

7 Zusammenfassung

Die Entwicklung geräuscharmer Räder erfordert die Berücksichtigung von drei wesentlichen Geräuschquellen: Abrollgeräusche, Kurvenquietschen und Bodenschwingungen. Zur Bewertung der akustischen Leistungsfähigkeit von Rädern und entsprechenden Absorbern wird eine Kombination aus praxisnahen Simulationswerkzeugen und empirischen Daten eingesetzt. Wie gezeigt wird, können diese kosten- und zeiteffizient eingesetzt werden, so dass Neuentwicklungen ohne umfangreiche Feldversuche bewertet werden können. Auf der Basis neuester innovativer Entwicklungen von der GHH-Radsatz wird das Potenzial lärmarmer Kurvenstrategien sichtbar. Umweltfreundliche Produkte schaffen die Rahmenbedingungen für einen leisen Verkehr. Die Erfolgskontrolle verschiedener Methoden wurde anhand von Beispielen durch die qualitative und quantitative Auswertung von Messungen im Labor und im Feldversuch durchgeführt. Durch die Minimierung der Geräuschemission beim Kurvenquietschen durch die Konditionierung des Kontaktpunktes (Rad - Schiene - Kontakt) kann eine Reduktion von bis zu 25 dB erzielt werden. Mit der Strategie der Verwendung von gummigefederten Rädern kann eine Minderung von ca. 15 - 20 dB erreicht werden, mit dem zusätzlichen Einsatz von Radschallabsorbern eine Minderung von ca. 20 - 30 dB.

Literatur

[1] World Health Organization: “Noise Guidelines for the European Region”, 2018, ISBN 978 92 890 5356 3

[2] B. Asmussen, M. Starnberg, B. Betgen, P. Bouvet, A. Martinot-Lagarde, A. Margiocchi, F. Aubin, D. Thompson, G. Squicciarini, M., Toward, T. Gerlach, C. Kemp-Lettkamp, H. Venghaus, P. Kitson, L. Pesqueux, A. Carrillo Zanuy, C. Sánchez Martín, G. de Ana Rodríguez, F. Demilly; Abschlussbericht: Stardamp „Standardization of damping technologies for the reduction of railway noise, 27.05.2013

[3] Betgen, B., Bouvet, P., Thompson, D., Demilly, F., & Gerlach, T. (2012, April). Assessment of the efficiency of railway wheel dampers using laboratory methods within the STARDAMP project; ACOUSTICS 2012.

[4] Thompson D. J., Squicciarini, G., Ding, B., & Baeza, L. (2018). A state-of-the-art review of curve squeal noise: phenomena, mechanisms, modelling and mitigation. In

Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems (pp. 3-41). Springer, Cham.

[5] J. R. Koch, «Curve squeal of urban rolling stock—Part 2: Parametric study, » Journal of Sound and Vibration, vol. 293, n° 13-5, pp. 701-709, 2006

[6] Thomas Gerlach, Christian Kemp-Lettkamp, (March 2010). Development and State of the Art of Systems for reducing the sound emission level of rolling noise and curve squealing with the approach LCC-orientated economic evaluation. 16th International Wheelset Congress, Cape Town International Convention Centre, South Africa, 14th to 19th March 2017

Autoren

Gerlach, Thomas, Dipl.-Ing.
Gartenstr. 40,
46145 Oberhausen, Germany
Position: Leiter Forschung und Entwicklung / Manager Research and Development

Lehnert, Torben Felix, M. Eng.
Gartenstr. 40,
46145 Oberhausen, Germany
Position: Forschung und Entwicklung / Research and Development

Jenne, Sven, Dr.-Ing.
Gartenstr. 40,
46145 Oberhausen, Germany
Position: Direktor Konstruktion & Entwicklung / Director Engineering & Development

Session 13
Philipp Leibner, Lukas Stübinger, Thomas Hempel, Lothar Wolf, Christian Schindler

Optimierung der Instandhaltung von Straßenbahngleisen durch eine intelligente Überwachung mittels Smartphone-Sensorik

Leibner, Philipp[1]; Stübinger, Lukas[2]; Hempel, Thomas[2];
Wolf, Lothar[3]; Schindler, Christian[1]

[1] Institut für Schienenfahrzeuge und Transportsysteme,
RWTH Aachen University
[2] Siemens Mobility GmbH
[3] Verkehrsgesellschaft Frankfurt am Main mbH

Thematischer Schwerpunkt: Eisenbahninfrastrukturmanagement: Fehleranalyse und -vermeidung

Vortragssprache: Deutsch

Vortragende: Thomas Hempel und Philipp Leibner

Keywords: Data Analytics, Datafusion, Eisenbahninfrastruktur, Fahrgastkomfort, Gleislagemessung, Mobile Anwendung, Monitoring, Smartphone-Sensorik, Track Monitoring

1 Einleitung

Durch den wachsenden Bedarf an Schienenverkehrsleistungen aufgrund der angestrebten Verkehrswende ist mit einer steigenden Belastung der Gleisinfrastrukturen und einem damit einhergehenden erhöhten Inspektions- und Instandhaltungsaufwand zu rechnen. Dezidierte Maßnahmen zur Inspektion und Prüfung (z.B. visuelle Inspektion mittels Begehung, technische Inspektion mit manuellen Messgeräten oder mit speziellen Messfahrzeugen) stehen dabei oftmals im Konflikt zur Zielsetzung der Infrastrukturbetreiber: die Maximierung der Netzverfügbarkeit, um die größtmögliche Menge an Passagieren oder Fracht auf der vorhandenen Infrastruktur zu transportieren.

Bis dato werden Inspektionsdaten und generierte Messwerte häufig nur in längerfristigen Zyklen aktualisiert (bspw. zwei Mal im Jahr im Rahmen einer Regelinspektion). Gleichzeitig handelt es sich dabei oft um manuelle und langsame Prozesse. Potenziell gefährliche Zustände (z.B. Veränderungen in der Längshöhe) werden teilweise erst mit größerem Zeitversatz erkannt oder Anzeichen aufgrund fehlender Datenbasis übersehen [1]. Ferner wird durch eine gesonderte Inspektion oftmals die Verfügbarkeit der Strecke (planmäßig) reduziert (z.B. Langsamfahrstelle) oder zeitlich sehr begrenzte reguläre Sperrpausen (z.B. nachts) für Inspektion, statt für etwaige Instandsetzung genutzt.

Lösungen, basierend auf regelmäßigem Daten- und Informationsfluss zur systematischen, hochauflösenden Überwachung der Bahninfrastruktur vom Fahrzeug aus, können hier Abhilfe schaffen. Sie ermöglichen eine Überwachung mit Betriebsgeschwindigkeit, führen nicht zu Einbußen der Streckenverfügbarkeit, minimieren den Aufenthalt von Personal im Gleisbereich und bieten eine verbesserte, strukturierte Basis zur Planung von Instandhaltungsmaßnahmen.

Drei Partner, das Institut für Schienenfahrzeuge und Transportsysteme (IFS) der RWTH Aachen University, die Siemens Mobility GmbH, und die Stadtwerke Verkehrsgesellschaft Frankfurt am Main mbH (VGF) bringen ihre vielfältigen Kompetenzen ein, um ein Konzept zur Optimierung der Instandhaltung von Gleisen durch eine intelligente Überwachung mittels Smartphone-Sensorik zu realisieren.

Im folgenden Beitrag wird detailliert auf den Ansatz an sich sowie die konkret erzielten Resultate eingegangen.

2 Instandhaltungsprozesse im Straßen- und Stadtbahnbereich

Um Betreibern von Straßen- und Stadtbahnnetzen einen Mehrwert zu bieten, muss sich jede potenzielle Infrastrukturmonitoring-Lösung sinnvoll in den in Abbildung 1 gezeigten Instandhaltungsprozess nach der Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung (BOStrab) [2] eingliedern. Dieser sieht vorschriftsmäßig eine Gleislagemessung mindestens alle 5 Jahre sowie eine zusätzliche jährliche Streckenbesichtigung vor. Im Rahmen der Streckenbesichtigung werden dabei weitere Fehlertypen wie z.B. Schäden an Schienen, Schwellen oder Stößen aufgenommen. Die aufgenommenen Daten werden dabei oftmals in Geoinformationssysteme eingespielt und ggf. weiter zusammengefasst. Sobald Grenzwerte annähernd erreicht werden oder der Gesamtzustand als nicht ausreichend gut erachtet wird, werden entsprechende Instandhaltungsmaßnahmen ergriffen. Die Planung erweist sich dabei oftmals komplex, da Baumaßnahmen vorzugsweise gebündelt durchgeführt werden und oftmals eine Verzahnung der Strecken mit weiterer städtischer Infrastruktur vorliegt.

Abbildung 1: Bestehender Instandhaltungsprozess des Oberbaus im BOStrab-Bereich.

Aufgrund des demografischen Wandels und allgemeinen Fachkräftemangels sowie dem Bestreben, mehr Verkehrsleistungen zu erbringen, wird es zunehmend herausfordernder für Betreiber, die geforderten Intervalle zur Streckenbesichtigung und Gleislagemessung einzuhalten. Dies gilt insbesondere für Betreiber großer Netze. Um die geforderte Oberbauqualität weiterhin halten zu können, muss aus Sicht der Autoren die Streckeninspektion schrittweise bspw. durch den Einsatz von Monitoring-Lösungen automatisiert werden. Dabei ist klar, dass ein Mehrwert nur gegeben ist, wenn durch den Einsatz einer Monitoring-Lösung schlussendlich weniger Inspektionspersonal bzw. Zeitaufwand für dieselben Prüfaspekte erforderlich ist oder mit dem bestehenden Personal eine höhere Oberbauqualität erreicht werden kann. Problematisch ist dabei, dass Monitoring-Lösungen oftmals nicht ganz an die Genauigkeit der Ergebnisse von geprüften Messmitteln (bspw. Gleismesszüge) herankommen, so dass Betreiber weiterhin zu vorliegenden Mitteln und Verfahren greifen, um den bestehenden Vorschriften zu entsprechen. Dies verkennt den Vorteil von Infrastrukturmonitoring-Lösungen, welche tagesaktuell ein Abbild des Zustands liefern können und so frühzeitig auftretende Schäden entdecken und ggf.

prognostizieren können. Eine frühzeitige Schadenserkennung kann dabei zu niedrigeren Kosten zur Behebung des Schadens führen. Gleichzeitig kann vermieden werden, dass Streckenabschnitte, welche sich ohnehin in einem guten Zustand befinden, unnötig oft vermessen werden. Ein zukünftiger Instandhaltungsprozess könnte daher nach Meinung der Autoren wie in Abbildung 2 dargestellt aussehen. Hierbei wird das Netz kontinuierlich durch eine Monitoring-Lösung überwacht. Der Einsatz von Inspektionspersonal und Messmitteln findet nur noch punktuell, aber zielgerichtet, statt. Beispielsweise wenn die Monitoring-Lösung einen Schaden anzeigt, aber nicht detailliert vermessen kann. Außerdem wird es auch in Zukunft noch Schadenstypen geben, welche unter Umständen nur lokal mit bestimmten Messmitteln erfasst werden können, wie z.B. Risse in Schwellen.

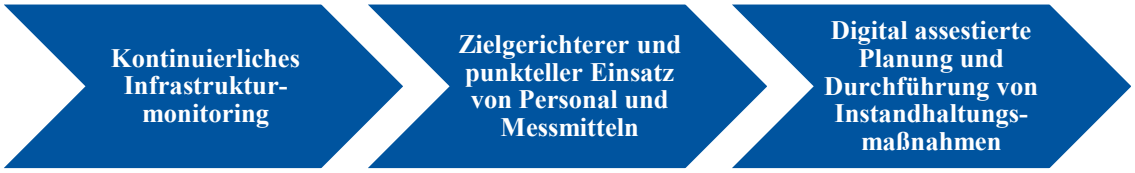


Abbildung 2: Vorgeschlagener verbesserter Instandhaltungsprozess durch den Einsatz von Infrastrukturmonitoring-Lösungen.

Die Planung der Instandhaltungsmaßnahmen kann darauf aufbauend digital und optimiert ausgeführt werden, in dem die Monitoring-Lösung vorschlägt, in welchen Streckenabschnitten wann und welche Maßnahmen durchgeführt werden sollten.

3 Gleislagemessungen im Straßenbahnbereich

Laut BOStrab ist das Gleis stets in einem Zustand zu halten, in dem eine sichere Spurführung sowie größtmögliche Laufruhe gegeben ist. Insbesondere bedeutet dies, dass mitunter die Gleisanlagen mindestens alle fünf Jahre einer entsprechenden Inspektion zu unterziehen sind. Wobei auch häufigere Inspektionen bei größeren Belastungen vorzusehen sind. Eine Dokumentation über die durchgeführte Wartung muss vorgehalten werden. Dies muss bis zur nächsten Inspektion (oder mindestens drei Jahre) berücksichtigt werden. [2]

Die BOStrab schafft damit den Rahmen, in dem sich Straßenbahnbetreiber bewegen und ihre Instandhaltungsaktivitäten organisieren und durchführen. Das Gesetz lässt es jedoch offen, wie die Nachweiserbringung im Detail auszusehen hat. Aus diesem Grund greifen Betreiber häufig auf Normen (z.B. DIN EN 13848 [3]) oder eigens erstellte interne Richtlinien (z.B. DB Ril. 821 [4] oder die VDV-Schrift 600 [5]) zurück, die die wesentlichen Parameter des Gleises beschreiben und Eingriffsgrenzen definieren. Die gängigen

Prüfgrößen in Bezug auf die Gleisgeometrie sind dabei die Längshöhe, gegenseitige Höhenlage, Verwindung, Pfeilhöhe und Spurweite.

Bei der VGF wird die Inspektion der Gleise, insbesondere für die Gleislage, die ein wichtiger Parameter für den sicheren Betrieb ist, hauptsächlich manuell durchgeführt. Dabei werden die Strecken begangen und in etwa einmal jährlich auch mit einem Gleislagemesssystem aufgezeichnet. Das Messgerät wird dabei von zwei Personen über die Strecke geschoben, um die obigen genannten Prüfgrößen zu erfassen. Somit wird der Sicherheitsnachweis häufiger – als in der BOStrab gefordert – erbracht. Auf diese Weise kann die VGF frühzeitig Instandhaltungsbedarfe aufdecken, einplanen und durchführen.

Bisher kommt eine qualitative Bewertung des Zustandes gemäß der DIN EN 13848-6 [6] oder durch ein Schulnotensystem bei der VGF noch nicht zum Einsatz. Dieser Bewertungsansatz könnte aber eine weitere Möglichkeit der Überwachung darstellen. Dies könnte die Erstellung eines detaillierten Arbeitsplans für die Gleisinstandhaltung ermöglichen. Eine weitere Größe, welche auch mit in eine qualitative und fortgeschrittene Betrachtung einfließen kann, ist der Schwingkomfort für Passagiere, dessen Bewertung normativ in der DIN EN 12299 [7] definiert ist. Dieser ist zwar nicht allein bestimmend für die Gleislagequalität, jedoch kann der Schwingkomfort als zusätzliche notenbasierte Indikation dienen. Das Wohlbefinden der Passagiere kann durch die Berücksichtigung des Schwingkomforts bei der Planung der Instandhaltungsaktivitäten mit einfließen und somit die Attraktivität des Nahverkehrs noch weiter steigern.

Um die Größen aus den vorgestellten Richtlinien und Normen möglichst nahe an der Betriebssituation zu bestimmen und mögliche Sperrzeiten für die manuelle Inspektion zu vermeiden, verfolgt der nachfolgende Ansatz mittels Smartphone-Messung eine Aufnahme von Daten in einem Regelfahrzeug. Dies ermöglicht es, das reale Fahrzeugverhalten und -belastung mit in die Messung einzubeziehen. Es wird dadurch die Möglichkeit geschaffen, innerhalb der gesetzlichen Fristen auf eine kontinuierliche Überwachung überzugehen, die keinen Einfluss auf den Betrieb hat und zudem das Gleis in einem belasteten Zustand vermisst. Auch die internen Richtlinien können dadurch zum einen qualitativ verbessert und zum anderen bezüglich möglicher Fristenstreckung überprüft werden, damit der manuelle Aufwand reduziert wird. Folglich sind Messungen mit speziellen Geräten nur noch bedarfsorientiert durchzuführen. Voraussetzung dafür ist jedoch, dass die Kombination der Ergebnisse genauso verlässlich ist, wie die Empfehlungen des konventionellen Gleislagemesssystems.

4 Gleislagemonitoring via Smartphone App

In den letzten Jahren gab es im Bahnumfeld einige Versuche, Beschleunigungssensoren von Smartphones zur Zustandsüberwachung im Bahnumfeld zu befähigen [8, 9]. Auch Siemens Mobility hat in diesem Bereich eine Lösung entwickelt. Mit der Track Monitoring Smartphone App wurde ein einfacher Ansatz zur Datenaufzeichnung und -auswertung entwickelt [10]. Die App kann dabei vom Fahrpersonal vor Fahrtantritt mit nur wenigen Klicks initialisiert werden und zeichnet während des regulären Betriebs im Fahrerstand Daten auf. Somit werden keine zusätzlichen Trassenkapazitäten gebunden.

Die Weiterentwicklung der Track Monitoring Smartphone-App zielt daher darauf ab, einen kontinuierlichen Einblick in die Infrastruktur hinsichtlich der Gleislage zu ermöglichen, so dass das Inspektionspersonal nur noch punktuell Messungen durchführen muss und sich auf andere Aspekte der Streckenbegehung fokussieren kann. Hierzu wird zunächst nur der Längshöhenfehler betrachtet, da dieser maßgeblich ist für einen sicheren Betrieb. Zudem lässt sich dieser Parameter auch verglichen mit den anderen Gleislagefehlern am einfachsten aus den Smartphone-Messdaten bestimmen. Mittels der bereits bestehenden Fahrkomfortanalyse kann darüber hinaus noch die Effektivität einer Instandhaltungsmaßnahme hinsichtlich des Schwingkomforts durch einen Vorher-Nachher-Vergleich bewertet werden.

Ebenfalls in diesem Umfeld hat das IFS die Nutzbarkeit der Smartphone-Sensorik demonstriert. Im Rahmen des mFUND Projekts Smartphone-based Rail Data Acquistion (SPRaDA) wurde gezeigt, dass die Sensoren im nötigen Frequenzbereich zuverlässige und reproduzierbare Ergebnisse liefern, sodass diese für die Bewertung des Gleiszustandes herangezogen werden können. [11]

Als nächsten Schritt zur Bestimmung des Zustandes der Gleise wurden noch weitere Untersuchungen durch die Siemens Mobility und das IFS durchgeführt. Dabei wurde die Machbarkeit zur Ermittlung der vertikalen Gleislage untersucht und demonstriert. Die Ergebnisse sind vielversprechend, sodass in dem vorliegenden Ansatz eine ausführlichere Untersuchung zusammen mit der VGF durchgeführt wurde. Dabei werden sowohl die Erfahrungswerte aus der Praxis miteinbezogen als auch Messsysteme der VGF zur Validierung.

4.1 Herstellung eines skalierbaren Ansatzes

Um eine 100-prozentige Verfügbarkeit der Strecke zu erreichen, ist es u. a. erforderlich, kontinuierlich in die aktuellen Zustände der Gleisanlagen Einblick zu haben. Dabei wird im nachfolgenden Ansatz auf die Application Suite Railigent X® von Siemens Mobility zurückgegriffen.

Railigent X® ist eine Cloud-basierte IoT-Plattform, die Zustands- und Diagnosedaten von Bahnanlagen sammelt, normalisiert, verknüpft und mit Hilfe von analytischen Methoden (u.a. Algorithmen oder Künstliche Intelligenz-Modelle) zu virtuellen Abbildungen der Anlagen, sogenannten digitalen Zwillingen, aufwertet. Diese ermöglichen konkrete Handlungsempfehlungen für einen optimierten Betrieb und Instandhaltung der Bahnanlagen, welche wiederum zu schnelleren korrektiven, zustandsorientierten und präventiven Maßnahmen führen.

Die Stadtwerke Verkehrsgesellschaft Frankfurt am Main mbH (VGF) hat hierfür im Bereich der Gleisinspektion und -vermessung ihre Erfahrungen geteilt und Optimierungspotenziale aufgezeigt. Das Institut für Schienenfahrzeuge und Transportsysteme der RWTH Aachen University bringt tiefgreifende Kenntnisse im Bereich der Simulation und Modellierung des Fahrzeugverhaltens mit. Wesentliches Fahrzeug Know-how sowie das Verständnis zur Modularisierung und skalierten Verbreitung von Analysen auf Railigent X® bringt die Siemens Mobility GmbH mit. Bei der Entwicklung einer neuartigen Gleisüberwachung werden all jene aufgeführten Kompetenzen benötigt. Dadurch ist sichergestellt, dass die Nutzbarkeit des Ansatzes für die VGF gegeben ist und die Ergebnisse auch dem aktuellen Stand der Technik entsprechen. Ohne eine Zusammenführung der Partner wäre es nur schwer möglich gewesen, die praktischen Erfahrungen aus dem Betrieb in Abgleich mit dem aktuellen Stand der Forschung zu bringen und letzten Endes in einen skalierbaren Ansatz zu überführen.

4.2 Datenaufnahme und -Verarbeitung

Die Datenaufnahme wird mittels der Track Monitoring Smartphone-App selbstständig durch das Fahrpersonal vor Fahrtantritt mittels weniger Klicks initiiert. Hierzu wird das Smartphone im Bereich des Fahrerstands auf einer vorher definierten Position platziert und die Datenaufnahme gestartet. Zu Beginn der Datenaufnahme wird außerdem eingegeben, in welchem Fahrzeug und an welcher Position innerhalb des Fahrzeugs das Smartphone platziert ist. Nach Beenden der Messung kann diese per Knopfdruck nach Railigent X® zur Verarbeitung hochgeladen werden.

Das Festlegen einer definierten Messposition im Vorfeld ist wichtig, um reproduzierbare Ergebnisse zu gewährleisten, da sich die gemesseneren Vibrationen je nach Messposition signifikant unterscheiden können. Die Ursachen hiervon sind vielfältig, als Haupteinflüsse sind zu nennen:

- **Starrkörperbewegungen**: Dadurch, dass der Wagenkasten sowohl translatorische als auch rotatorische Bewegungen durchführt, kann je nach Messposition eine zusätzliche Winkelbeschleunigung auf den Sensor wirken.
- **Fahrzeugfederung**: Die in der Regel zweistufig ausgeführte Fahrzeugfederung beeinflusst die Wagenkastenbeschleunigung signifikant und reduziert insbesondere bei höheren Geschwindigkeiten die zu erwartenden Beschleunigungsamplituden.
- **Eigenmoden der Fahrzeugstruktur**: Die elastischen Eigenschaften der Fahrzeugstruktur- und Komponenten können zu weiteren Schwingungen führen, welche die Messung beeinflussen.
- **Vibrationseigenschaften weiterer Fahrzeugkomponenten**: In den meisten Fahrzeugen finden sich sowohl vibrationsdämpfende Komponenten (bspw. das Fahrerpult, Tische, Ablagen o.Ä.) als auch Vibration erzeugende Komponenten (bspw. Lüfter, Kompressoren o.Ä.), welche die Messung stören können.

Der Auswertealgorithmus kann einen Teil dieser Einflüsse in die Verarbeitung miteinbeziehen bzw. durch geschickte Wahl von Hoch- und Tiefpassfiltern vermindern. Anspruchsvoll ist dabei der Umgang mit dem Einfluss der Fahrzeugfederung, welcher sich insbesondere bei höheren Fahrgeschwindigkeiten bemerkbar macht. Da Straßen- und Stadtbahnfahrzeuge aber in der Regel selten schneller als 70 km/h fahren und daher die Fahrzeugfederung einen geringeren Einfluss hat, kann der Wagenkasten näherungsweise als starr vertikal über die Schiene fahrend betrachtet werden, so dass sich eine Schätzung des Längshöhenfehlers LL als Funktion des Weges s wie folgt angenommen wird:

$$\widehat{LL}(s) = \iint \frac{z''_{WK,BP(s)}}{v^2} ds.$$

Hierbei ist $z''_{WK,BP(s)}$ die vertikale bandpass-gefilterte Vertikalbeschleunigung im Wagenkasten und v die Fahrzeuggeschwindigkeit. Dieser Ansatz ist insbesondere für eher steif ausgelegte Fahrwerke gut geeignet. Für höhere Fahrgeschwindigkeiten oder Fahrzeuge mit sehr weicher Federung ist dieser Ansatz allerdings nicht geeignet, da hier die Fahrzeugfederung das Signal bereits zu sehr verzerrt.

5 Ergebnisse

Zur Bewertung der Genauigkeit der entwickelten Track Monitoring Smartphone-App wurden Messungen auf verschiedenen Streckenabschnitten bei der Verkehrsgesellschaft Frankfurt am Main mbH (VGF) durchgeführt. Gemessen wurde im Stadtbahnnetz durchgeführt. Zum Einsatz kam dabei ein Fahrzeug des Typs „U5“. Die Fahrzeuge ähneln hinsichtlich ihres Aufbaus und ihrer Fahrdynamik Straßenbahnfahrzeugen. Zur Validierung bzw. Genauigkeitsbewertung der Smartphone-Messung wurden außerdem Messdaten eines zertifizierten, handgeschobenen Gleislagemesssystems zur Verfügung gestellt. Zur Bewertung wurde die DIN EN 13848-2 [12] herangezogen, welche unter anderem ein Verfahren zur Validierung eines neuen Gleislagemesssystems aufzeigt. Hieran angelehnt wurde die Wiederholbarkeit, Reproduzierbarkeit sowie Übertragungsfunktion bestimmt. Zu beachten ist, dass die Track Monitoring Smartphone-App eine Monitoring-Lösung und kein Gleismesssystem darstellt, und daher nicht den Anforderungen der Norm genügen muss.

Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse für einen 100 m langen Streckenabschnitt für verschiedene Smartphones und Fahrzeuggeschwindigkeiten im Vergleich zu den Messergebnissen eines handgeschobenen zertifizierten Gleislagemesssystems (Referenzsystem). Ersichtlich ist, dass der Verlauf des vertikalen Gleislagefehlers unter allen Bedingungen den Ergebnissen des Referenzsystems qualitativ nahekommt, aber nicht 100-prozentig übereinstimmt.

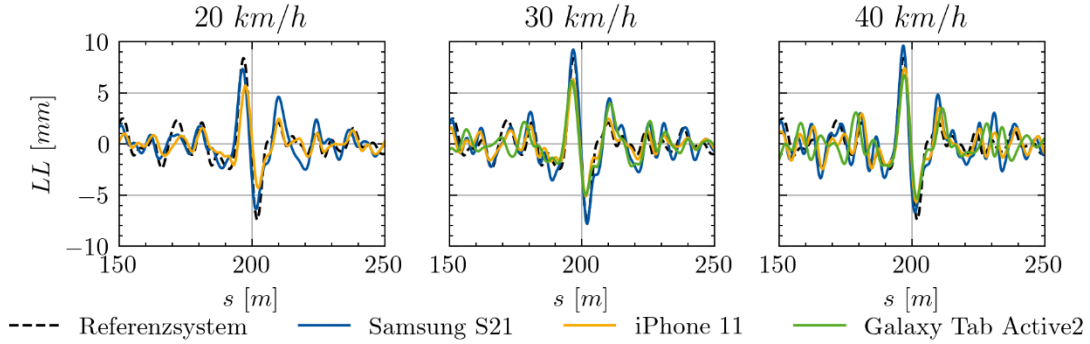


Abbildung 3: Gemessener Längshöhenfehler für verschiedene Geräte und Fahrzeuggeschwindigkeiten im Vergleich zum handgeschobenen Gleislagemesssystem.

Zu beachten ist, dass die zurückgelegte Wegstrecke bei beiden Systemen über das GPS-Signal gemessen wurde und daher fehlerbehaftet ist, so dass Spitzenwerte ggf. nicht direkt übereinander liegen. Daher wurde der Dynamic-Time-Warping-Algorithmus [13] für die weiteren Analysen angewendet. Dieser findet zwischen zwei verzerrten Signalen durch lokale Stauchung und Streckung ein optimales Mapping, so dass darauf aufbauend

Distanzmaße wie z.B. absolute Differenzen berechnet werden können. Der Algorithmus sucht dafür den „kostengünstigsten“ Weg zwischen einer „Sollfolge“ und „Istfolge“ auf Basis von paarweisen Vergleichen der Wertepaare beider Folgen. Der Einsatz dieses Algorithmus wurde in Bezug auf Gleislagemessungen in [14] ausgiebig untersucht.

In Anlehnung an die DIN EN 13848-2 wurde zunächst die Wiederholbarkeit der Ergebnisse unter gleichen Bedingungen (in diesem Fall Messposition und Fahrgeschwindigkeit) ausgewertet. Die Norm gibt hierfür den Grenzwert als 95. Perzentil der Verteilung der absoluten Differenzen zwischen zwei Messungen an. Die Auswertung ist in Abbildung 4 in Form von Boxplots dargestellt. Als „Whisker“ sind hier als 5. bzw. 95. Perzentil definiert, so dass ein Vergleich der einzelnen identischen Fahrten mit dem Grenzwert von 0,5 mm möglich ist. Die Abbildung zeigt, dass eine Wiederholbarkeit innerhalb des Grenzwerts für nahezu alle Versuche gegeben ist.

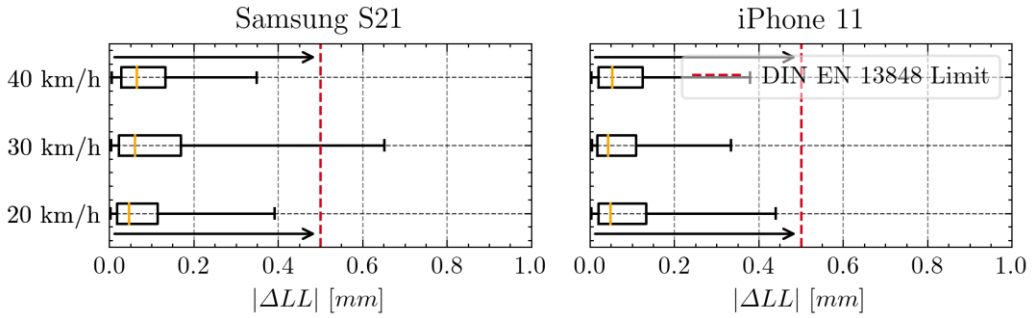


Abbildung 4: Wiederholbarkeit der Ergebnisse für gleiche Versuchsbedingungen. Darstellung in Form der Verteilung der absoluten Differenzen als Boxplots.

Ebenfalls ausgewertet wurde die Reproduzierbarkeit, um zu untersuchen, inwiefern unterschiedliche Versuchsbedingungen sich auf die Ergebnisse auswirken. In diesem Fall wurden die Resultate für 20 und 40 km/h verglichen. Die zugehörigen Boxplots sind in Abbildung 5 dargestellt. Der Grenzwert liegt hier bei 0,8 mm. Wie zu erkennen ist, liegen die Ergebnisse teils über dem Grenzwert.

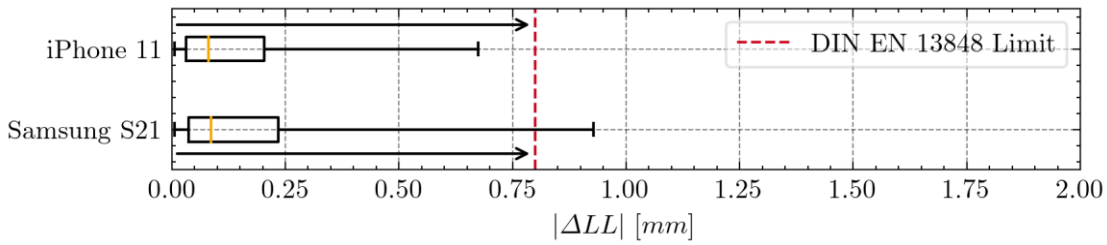


Abbildung 5: Reproduzierbarkeit der Ergebnisse für unterschiedliche Versuchsbedingungen (20 km/h und 40 km/h).

Auf eine ähnliche Art und Weise wurde auch ein Vergleich mit den Messdaten des handgeschobenen Messsystems durchgeführt. Hierzu wurden Versuche auf zwei verschiedenen Streckenabschnitten, für welche Referenzdaten vorlagen, durchgeführt. In diesem Fall wurden keine konstanten Geschwindigkeiten gefahren, sondern im Fahrgastbetrieb auftretende Fahrprofile. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6 dargestellt und zeigen ebenfalls, dass die Ergebnisse der Track Monitoring Smartphone-App nah an den geforderten Grenzwert von 0,8 mm kommen. Lediglich 5 % der absoluten Differenzen zwischen den Messpunkten zeigen eine Abweichung von mehr als 2 bis 3 mm.

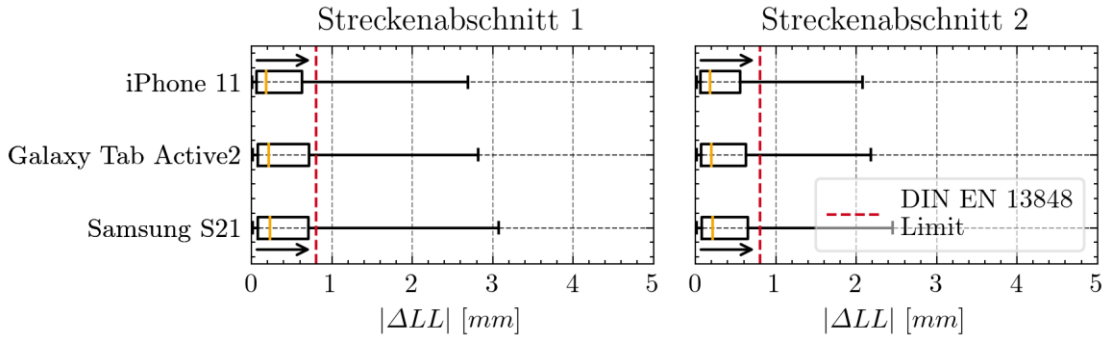


Abbildung 6: Verteilung der absoluten Differenzen zwischen Smartphone- und Referenzsystemmessungen als Boxplots für zwei verschiedene Streckenabschnitte.

Abschließend wurde noch auf Basis dieser Daten die Übertragungsfunktion zwischen Gleislagemesssystem und Smartphones bestimmt. Die Übertragungsfunktion gibt Aufschluss, inwiefern die unterschiedlichen Wellenlängen des Gleislagefehlers durch das Auswerteverfahren verstärkt oder gedämpft werden. Wie in Abbildung 7 ersichtlich wird, tritt hauptsächlich eine Dämpfung der Wellenlängen im D1 Bereich (3 m – 25 m) auf, insbesondere bei den niedrigeren Wellenlängen. Dies lässt sich auf den Einfluss der Fahrzeugfederung zurückführen, welche die zugehörigen höheren Frequenzen aus der Gleislagestörung stärker dämpft. Da nicht genau bekannt ist, inwiefern das Referenzsystem selbst durch das Sehnenmessverfahren und ein etwaiges Entzerrungsverfahren eine ausgeprägte Übertragungsfunktion mit einbringt, ist zusätzlicher Einfluss hierdurch denkbar.

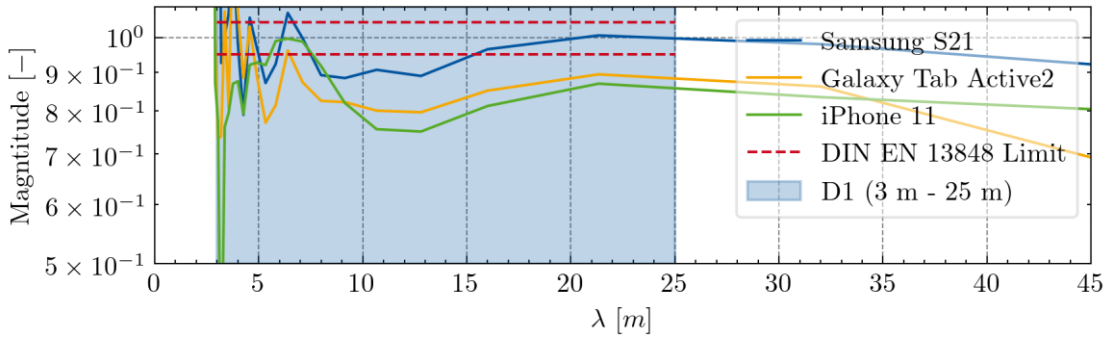


Abbildung 7: Übertragungsfunktion zwischen Referenzsystem und mobilem Endgerät.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse der Validierung mit dem Referenzsystem zeigen insgesamt einen hohen Übereinstimmungsgrad, welcher die Nutzbarkeit von Smartphones für das Monitoring des Gleislängshöhenfehlers im Straßen- und Stadtbahnbereich bestätigt. Das entwickelte Verfahren ist dazu in der Lage, den Längshöhenfehler bis auf wenige Ausnahmen mit einer Genauigkeit von zwei bis drei Millimetern zu ermitteln und eine Wiederholbarkeit sowie Reproduzierbarkeit unweit von den normativen Grenzen für professionelle Gleismesssysteme zu ermöglichen.

Zusammen mit der Application Suite Railigent X® kann so in kurzer Zeit eine minimalinvasive Gleismonitoring-Lösung aufgesetzt werden, die dem Betreiber ein tagesaktuelles Bild seines Gleisinfrastrukturzustands liefern kann. Durch die Nutzung der Track Monitoring Smartphone-App kann der zeit- und kostenintensive Einsatz von Messfahrzeugen verringert werden und damit der direkte Aufenthalt von Inspektionspersonal im Gleisbett minimiert werden. Durch die Nutzung von Smartphones (oder Tablets) wird außerdem keinerlei Genehmigung von technischen Aufsichtsbehörden benötigt, da das Fahrzeug an sich, im Gegensatz zu einigen vergleichbaren Lösungen, unberührt bleibt.

Die Analyseverfahren sollen in Zukunft noch weiterentwickelt werden. Hierzu gehört z.B. die Auswertung von Track Quality Classes (TQC) und weiterer typischer Fehlerbilder im Gleisumfeld, wie z.B. die Detektion von Riffeln oder Schienenbrüchen. Ebenfalls angestrebt wird eine Weiterentwicklung hinsichtlich der Erkennung von Überhöhungs- bzw. Verwindungsfehlern, die aufgrund der Eigenschaften der Fahrzeugfederung bzw. des Smartphone-Setups nur indirekt zu detektieren sind, aber ebenso wichtig sind für den Inspektions- und Instandhaltungsprozess.

7 Literatur

[1] SHAFIQUE, Rahman ; SIDDIQUI, Hafeez-Ur-Rehman ; RUSTAM, Furqan ; ULLAH, Saleem ; SIDDIQUE, Muhammad Abubakar ; LEE, Ernesto ; ASHRAF, Imran ; DUDLEY, Sandra: *A Novel Approach to Railway Track Faults Detection Using Acoustic Analysis*. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 21 (2021), Nr. 18, S. 6221. URL https://www.mdpi.com/1424-8220/21/18/6221

[2] BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ: *Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen*

[3] DIN EN 13848-1:2019-06. Juni 2019. *Bahnanwendungen - Oberbau - Gleislagequalität*

[4] DB NETZ AG (Hrsg.): *Richtlinie 821 : Oberbau inspizieren*. München, 2017

[5] VDV-Schrift. August 2018. *Oberbau-Richtlinien und -Zusatzrichtlinien für Bahnen im Geltungsbereich der BOStrab*

[6] DIN EN 13848-6:2014+A1:2020. März 2021. *Bahnanwendungen - Oberbau - Gleislagequalität*

[7] DIN EN 12299:2009-08. August 2019. *Bahnanwendungen – Fahrkomfort für Fahrgäste*

[8] PAIXÃO, André ; FORTUNATO, Eduardo ; CALÇADA, Rui: *Smartphone's Sensing Capabilities for On-Board Railway Track Monitoring: Structural Performance and Geometrical Degradation Assessment*. In: *Advances in Civil Engineering* 2019 (2019), S. 1–13

[9] AZZOUG, Adam ; KAEWUNRUEN, Sakdirat: *RideComfort: A Development of Crowdsourcing Smartphones in Measuring Train Ride Quality*. In: *Frontiers in Built Environment* 3 (2017)

[10] HAUPTVOGEL, Annika ; STÜBINGER, Lukas: *Track Monitoring Smartphone-App : Kostengünstige, minimalinvasive und mobile Überwachung des Bahninfrastrukturzustandes mithilfe von Smartphone-Sensorik*. In: *Der Eisenbahningenieur* (2021), S. 47–49

[11] LEIBNER, Philipp ; STILLFRIED, Axel von ; SCHINDLER, Christian: Potential of estimating track irregularities from in-service vehicles using smartphones. In: *Proceedings of The Fifth International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance*.

[12] DIN EN 13848-2:2021-02. Februar 2021. *Bahnanwendungen - Oberbau - Gleislagequalität*

[13] Dynamic Time Warping. In: *Information Retrieval for Music and Motion* : Springer, Berlin, Heidelberg, 2007, S. 69–84

[14] KHOSRAVI, Mahdi ; SOLEIMANMEIGOUNI, Iman ; AHMADI, Alireza ; NISSEN, Arne: *Reducing the positional errors of railway track geometry measurements using alignment methods: A comparative case study*. In: *Measurement* 178 (2021), S. 109383. URL https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224121003778

Session 13

Philipp Leibner, Lukas Stübinger, Thomas Hempel, Lothar Wolf, Christian Schindler

Autoren

Leibner, Philipp

Studium des Maschinenbaus an der RWTH Aachen bis 2021. Seit 2021 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Schienenfahrzeuge und Transportsysteme der RWTH Aachen im Bereich Zustandsüberwachung und Digitalisierung in der Schienenfahrzeugtechnik.

Stübinger, Lukas

Studium des Maschinenbaus an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Seit 2018 bei der Siemens Mobility GmbH im Bereich Customer Services als Projektmanager Service Engineering für die Rail Infrastructure.

Hempel, Thomas

Studium des Wirtschaftsingenieurwesens an der RWTH bis 2013. Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH bis 2017 mit Abschluss Dr.-Ing. Seitdem ist er bei der Siemens Mobility GmbH. Heute leitet er das Service Engineering für die Rail Infrastructure im Customer Service.

Wolf, Lothar

Studium Elektrische Energietechnik an der Fachhochschule Gießen-Friedberg bis 1988. Seit 2001 bei der Verkehrsgesellschaft Frankfurt mbH tätig, u.a. im technischen Büro der Zentralwerkstatt. Ab 2018 ist er Mitarbeiter in der Abteilung Systemtechnik und Innovation für Fahrzeugtechnik und Infrastruktur.

Schindler, Christian

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

Session 13
Timo Schmitz, Fabian Hampel, Martin-Christopher Noll, Christian Schindler

Zuverlässigkeitsanalyse einer KI-gestützten Wartungsanlage für Straßenbahnräder

Themenschwerpunkt: Sicherheit, Zuverlässigkeit und Lebensdauer

Schmitz, Timo[1], Hampel, Fabian[2], Noll, Martin-Christopher[1] und Schindler, Christian[2]

[1]i4M technologies GmbH
[2]Institut für Schienenfahrzeuge und Transportsysteme, RWTH Aachen

Zusammenfassung

Zur Gewährleistung der Sicherheit und der Verfügbarkeit der Fahrzeuge des Schienenpersonenverkehrs sind regelmäßige Wartungsarbeiten notwendig. An zwei Typen von Straßenbahnrädern kommt es unter bestimmten Umständen zum Verlust oder Bruch von Verschraubungen, sowie sog. Radreifenrutschern. Um diese Schäden rechtzeitig zu erkennen sind regelmäßige Sichtprüfungen vorgeschrieben. Durch i4M technologies wurde ein automatisches Messsystem entwickelt und in einer Wartungshalle installiert, welches diese Schadensbilder mittels Methoden des maschinellen Lernens erkennt. Als Bewertungsmaßstab wird die menschliche Fehlerhäufigkeit quantifiziert und ein kontinuierliches Markov-Modell der Schadensfortpflanzung präsentiert.

1 Einleitung

Straßenbahnräder sind in der Regel gummigefedert, um Schwingungen zu dämpfen. Hierzu wird ein Gummidämpfer mit einem Klemmring zwischen Radreifen und Radkörper

verschraubt (Abb. 1a). Unter bestimmten Randbedingungen haben hohe dynamische Belastungen in der Vergangenheit zum Lösen und Brechen der Verschraubungen geführt (Abb. 1b, 1c). Es sind bei einem Betrieb zwei Arten von Rädern betroffen, wovon eines mit Schrauben (Abb. 1b) und eines mit Bolzen (Abb. 1c) montiert ist. Ein unentdeckter Schaden könnte sich fortpflanzen und zu Folgeschäden führen. Um dies zu verhindern wird im Intervall von zwei Wochen eine Sichtprüfung durchgeführt.

(a) (b) (c)

Abbildung 1: Gummigefedertes Straßenbahnrad (a), Rad mit fehlender Schraube (b), Rad mit fehlender Mutter (c)

Eine nähere Untersuchung identifizierte Überbelastungen durch Stöße vom Gleis und Resonanzschwingungen des Rades als Ursache. Diese konnten unter anderem auf Schienenfehler und schnelles Überfahren von Flachrillen an Weichen zurückgeführt werden [1]. Mit den Schäden ging teilweise ein Verdrehen des Radreifens zum Radkörper einher (sog. „Radreifenrutschern“). Es wurde festgestellt, dass nach dem Fehlen der ersten Verschraubung, weitere Schrauben häufiger dazu neigen sich zu lösen oder zu brechen.

Als Gegenmaßnahme konnte bei einem betroffenen Radtyp die Belastung am ersten tragenden Gewindegang durch Verwendung von taillierten Schrauben gesenkt werden. Außerdem wurde durch i4M technologies ein System zur Gleiszustandsüberwachung entwickelt und installiert, welches im Gleisnetz des betroffenen Betriebs Radbelastungen durch Beschleunigungssensoren erfasst und per GPS kartographiert, wodurch Stellen, die hohe Belastungen auslösen, lokalisiert und ausgebessert werden können.

Die Anzahl der Verschraubungsbrüche nimmt seither stetig ab, was auf die Wirksamkeit der Verbesserung des Gleisnetzes und der konstruktiven Maßnahmen deutet. In den folgenden drei Jahren wurden noch maximal drei fehlende Verschraubungen pro Jahr bei einer Flotte von 128 betroffenen Fahrzeugen festgestellt und seit 2021 sind keine solchen Fehler mehr aufgetreten.

Zum effizienteren Einsatz von Personalressourcen wird aktuell von i4M technologies eine automatische Kontrollanlage entwickelt, welche die Sichtprüfungen ersetzen soll.

Im Folgenden wird die Systemstruktur beschrieben und die Datenlage dargestellt. Es wird eine Methode zur Fehlererkennung vorgestellt, welche ein tiefes neurales Netz (engl. Deep Neural Network) nutzt. Als Bewertungsmaßstab für die Fehlererkennung wird die menschliche Fehlerhäufigkeit bei den Sichtprüfungen mittels „Railway Action Reliability Assessment“ (RARA) [2] quantifiziert und die Fehlerfortpflanzung mit einem zeitkontinuierlichen Markov-Modell [3] abgebildet.

2 Systemstruktur

Die Radkontrollanlage ist am Gleis fest installiert und mit einem Schutzzaun umgeben, dessen Zugänge mit Sicherheitslaserscannern abgesichert sind (Abb. 2).

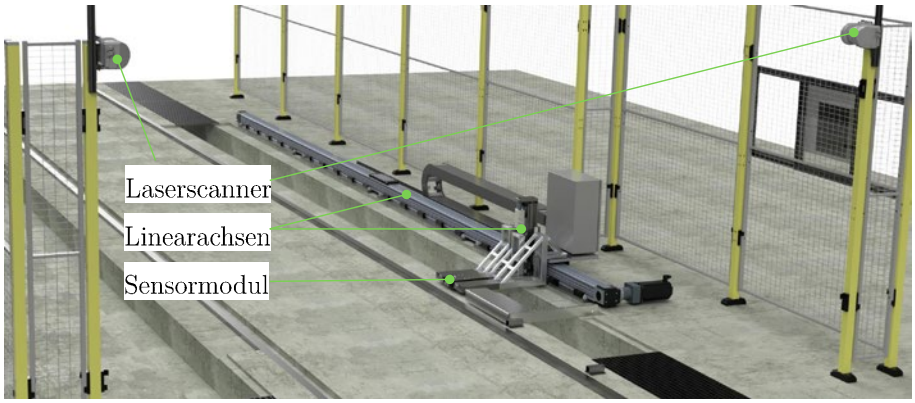


Abbildung 2: Automatische Kontrollanlage

Zur Datenerfassung sind parallel zum Gleis Linearachsen angeordnet, auf denen ein Sensormodul montiert ist. Es werden Ultraschallsensoren zum Abtasten der Oberfläche eingesetzt und Bilder der Verschraubungen mittels monochromer Kameras aufgenommen. Beim Durchfahren der Anlage mit ca. $2\,km/h$ wird das Sensormodul seitlich mitfahrend vor dem Radschrauben-Lochkreis eines jeden Rades positioniert. Nach der Datenerfassung werden die Informationen des Sensormoduls, der Positionsregelung und des Streckenlesegeräts zusammengeführt und für die Fehleridentifikation weiterverarbeitet. Die Ergebnisse werden in einer Datenbank gespeichert und auf einer Nutzeroberfläche aufbereitet (Abb. 3).

Abbildung 3: Datenverarbeitung

3 Datenlage

In einer Testphase wurden bereits Daten gesammelt, wobei es weder zum Fehlen einer Verschraubung noch zu einem Radreifenrutscher gekommen ist. Die aktuelle Anzahl an Messungen ist in Tabelle 1 dargestellt. Da die aufgenommenen Daten keinerlei Fehlerfälle enthalten, wurden diese durch Entfernung von Schrauben künstlich herbeigeführt. Wie in Abbildung 4 zu sehen variieren auf den Bildern die Helligkeit, der Abstand zum Rad, der Verschmutzungsgrad und die Verdeckung der Verschraubungen.

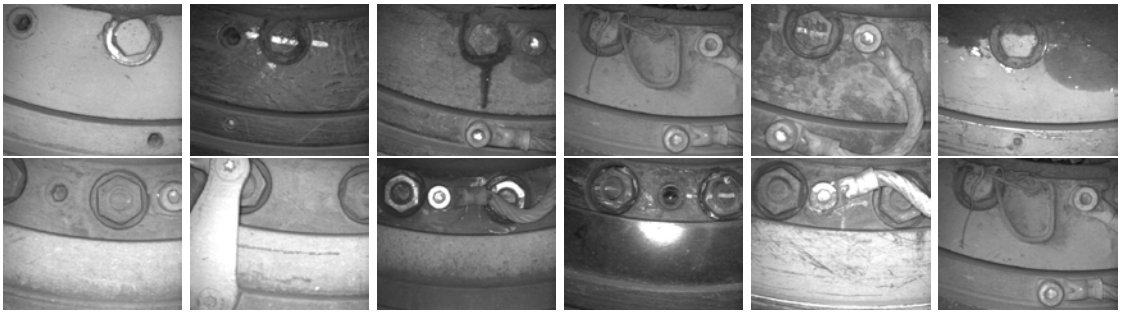


Abbildung 4: Beispiele der Bilddaten

Tabelle 1: Datenverteilung Verschraubungen

Art der Verschraubung	Bahnen	Räder	Verschraubungen	künstliche Fehlstellen	Anzahl Bilder (528x448 *px*)
Schrauben	205	820	11480	27	41124
Bolzen	25	100	2000	0	1673

Zudem liegen Zeitreihendaten des Höhenprofils am Lochkreis der Verschraubungen vor. In Abb. 5 sind zwei Messungen einer Abrolllänge desselben Rades ohne Fehlstellen (grün) und mit zwei Fehlstellen dargestellt (blau). Schraubenköpfe stehen hervor und erzeugen so lokale Maxima. Die Geometrie der Senkbohrungen erzeugt an den Fehlstellen hingegen lokale Minima .

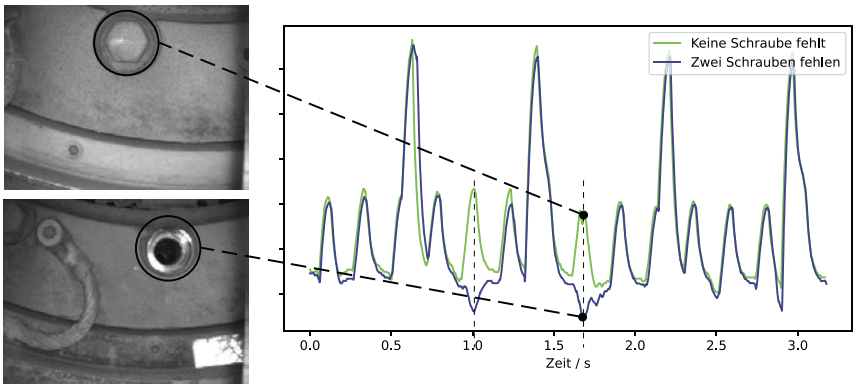


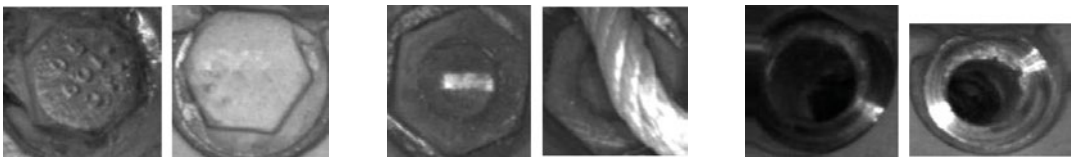
Abbildung 5: Zeitreihendaten ohne Fehlstellen (grün) und mit zwei Fehlstellen (blau)

4 Methodik der Fehlererkennung

Zur Identifikation von fehlenden Verschraubungen und Radreifenrutschern werden die Daten der verschiedenen Systemkomponenten zusammengeführt und unter Einbeziehung von Domänenwissen weiterverarbeitet.

4.1 Erkennung fehlender Verschaubungen

Für die Erkennung fehlender Verschraubungen werden Schraubenköpfe und Muttern, sowie die Fehlstellen selbst durch ein tiefes neurales Netz erfasst (Abb. 6).



(a) Schraube (b) Mutter (c) Fehlstelle

Abbildung 6: Klassen zur Erkennung fehlender Verschraubungen

4.1.1 Objekterkennung

Zur Objekterkennung werden die im Bild sichtbaren Geometrien den angelernten Klassen zugeordnet. In Tabelle 2 sind die korrekten und falschen Zuordnungsmöglichkeiten dieser beiden Klassifizierungen abgebildet. Fehler in der Erkennung stellen nur ein Sicherheitsrisiko dar, wenn hierdurch eine tatsächlich fehlende Schraube übersehen werden

kann. Daher sind nur die Ergebnisse FP_{S1}, FN_{F1} und FP_{F2} als kritisch zu bewerten, wobei FP_{S2} nur potentiell kritisch ist, da durch das Erkennen einer sonstigen Geometrie am Rad als Schraube eine Fehlstelle übersehen werden könnte. Die anderen falschen Ergebnisse erzeugen Arbeitsaufwand, da intakte Räder als fehlerhaft gekennzeichnet werden.

Tabelle 2: Konfusionsmatrix der Fehlstellenidentifikation

		Vorhergesage			
		Schraube	keine Schraube	Fehlstelle	keine Fehlstelle
Real	Verschr. vorhanden	TP_S	FN_S	FP_F	TN_F
	Verschr. fehlt	*FP_{S1}	TN_{S1}	TP_{F1}	*FN_{F1}
	sonstige Geometrie	*FP_{S2}	TN_{S2}	FP_{F2}	TN_{F2}

TP: wahr-positiv, TN: wahr-negativ, FP: falsch-positiv, FN: falsch-negativ
S-Schraube, F-Fehlstelle, 1: Verschraubung fehlt, 2: sonstige Geometrie
*Kritischer Fehlerfall

Das Modell zur Objekterkennung ist eine Kombination aus dem CNN Mobilenet V1 zur Feature Extraction, dem Single Shot Detector (SSD) zur Objekterkennung und dem Feature Pyramid Network (FPN), welches die Genauigkeit der Erkennung auf unterschiedlichen Skalierungen verbessert. Dieses Modell wurde mit der in Tabelle 3 angegeben Menge an Daten trainiert.

Um Trainingsdaten für die Objekterkennung zu generieren wurden Klassen von Objekten annotiert indem rechteckige Bildregionen manuell eingezeichnet und mit einem Label versehen wurden. Um der ungleichen Verteilung der Daten entgegenzuwirken, wurden durch Datenvermehrung (engl. Data Augmentation) weitere 238 Bilder von Fehlerfällen künstlich erzeugt. Hierzu wurden u.a. Skalierung, Bildausschnitt, Beleuchtung und Verzerrung variiert. Von fehlenden Muttern und Bolzen sind bisher keine Bilder erzeugt worden. Die Menge der für das Training und die Evaluation verwendeten Instanzen für die Erkennung von Fehlstellen ist in Tabelle 3 aufgeführt.

4.1.2 Bildselektion

Um das Vorhandensein der Verschraubungen als Kriterium zu nutzen, wurde eine Methode zur Auswahl der Daten entwickelt, bei der für jede Verschraubung genau ein Bild aus den Bildern der Vermessung eines Rades ausgewählt wird. Die Bildselektion erfolgt in mehreren Schritten. Zunächst wird die mittlere Schraubenfrequenz auf Basis der Schlittengeschwindigkeit und dem Durchmesser des Radreifens ermittelt, welcher durch Ab-

Tabelle 3: Datenverteilung Verschraubungen

Bezeichnung	Instanzen Training	Instanzen Evaluation
Schrauben	492	137
Bolzen	294	91
Fehlstelle	[1]255	[2]57

[3]Augmentiert aus 20 Bildern
[4]Augmentiert aus 7 Bildern

nutzung variiert. Die Schraubenfrequenz wird auf die Bildfrequenz abgebildet und durch die Minimierung des Abstandes der Schraubenerkennung zur Bildmitte eine Anzahl von Bildern Ausgewählt, welche der Anzahl Verschraubungen entspricht (Abb. 7). Schlägt die Selektion bei einer Position fehl, da keine Verschraubung gefunden wird, so wird diese Position als fehlerhaft gekennzeichnet. Bei den Rädern mit Bolzen wird zusätzlich bei durch Erdungsbleche verdeckten Muttern ein Bild ausgewählt, auf dem diese in der linken Bildhälfte zu sehen sind (Abb. 7, unten).

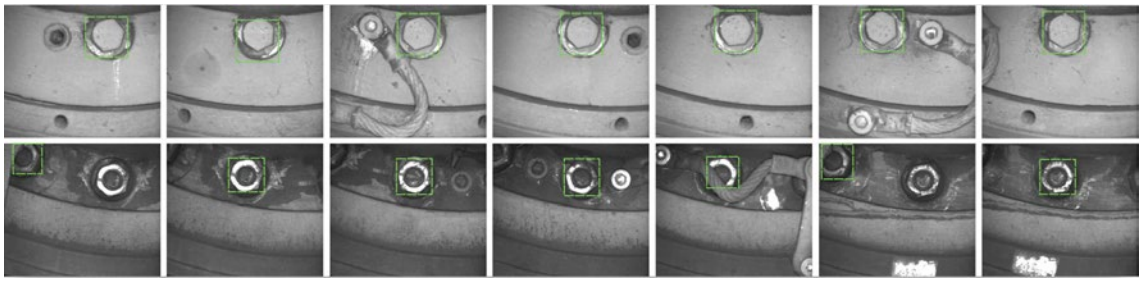
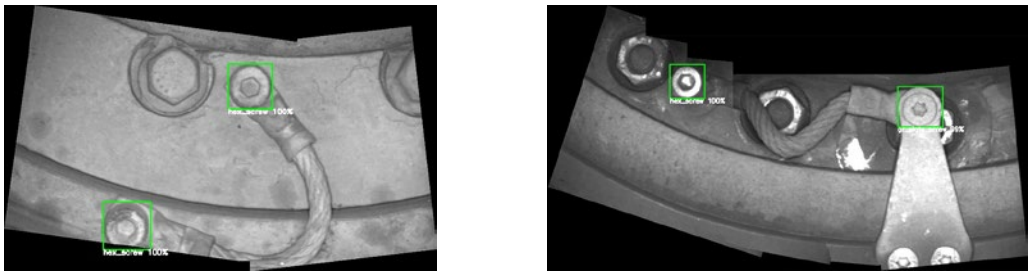


Abbildung 7: Bildselektion von Schrauben (oben) und Muttern (unten)

4.2 Erkennung von Radreifenrutschern

Zur Erkennung der Radreifenrutscher wurden die Verschraubungen der Erdungsleitungen als geeignetes Merkmal identifiziert, da ihre relative Position zueinander sich bei einem Radreifenrutscher verschiebt (Abb. 8). Da der Bildausschnitt der Kamera nicht ausreicht, um beide Verschraubungen der Erdung in einem Bild zu erkennen, werden für die Erkennung von Radreifenrutschern mehrere Bilder zusammengesetzt. Ein Radreifenrutscher wird durch die Veränderung des Abstandes der Verschraubungen über mehrere Messungen hinweg erkannt.



(a) (b)

Abbildung 8: Erdungsverschraubungen als Merkmal für Radreifenrutscher

5 Ergebnisse der Fehlererkennung

5.1 Evaluation auf annotierten Trainingsdaten

Als Metriken zur Evaluation der Objekterkennung werden Sensitivität (engl. Recall) und Präzision (engl. Precision) verwendet (Gl. 1). Die Ergebnisse der Präzision sind für unterschiedliche Schnittmengen über die Vereinigung (engl. „Intersection over Union“, IoU) angegeben. IoU beschreibt das Verhältnis von der Schnittmenge zweier Flächen zu der vereinten Fläche. Ein geringerer Wert der IoU lässt also eine größere Abweichung in der Lokalisierung zu.

$$Recall = \frac{TP}{TP+FN}, \quad Precision = \frac{TP}{TP+FP} \tag{1}$$

Tabelle 4: Evaluationsergebnisse

Metrik	Schrauben	Muttern	Fehlstellen
Precision (0.5 IoU)	1,0*	0,999*	0,939
Precision (0.75 IoU)	1,0*	0,967*	0,969
Recall	0,914	0.88	0,932*

*Metriken für kritische Fehlerfälle

Die Ergebnisse des Trainings und der Evaluation sind in Tabelle 4 angegeben. Aufgrund der in Tabelle 2 gekennzeichneten kritischen Fehlerfälle, ist für die Erkennung der Verschraubungen die Precision und für die Erkennungen von Fehlstellen der Recall die kritische Metrik. Bei einer IoU von 75% konnten sämtliche Schrauben erkannt werden und 96,7% der Muttern. Die Fehlstellen wurden mit einem Recall von 93,2% erkannt. Die FN

der Fehlstellen sind allerdings ausschließlich bei nicht vollständig Sichtbaren Instanzen aufgetreten, wie in Abb. 9 dargestellt.

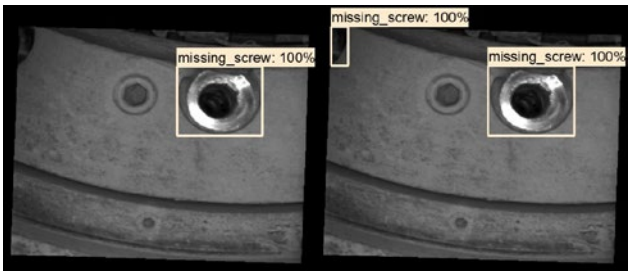


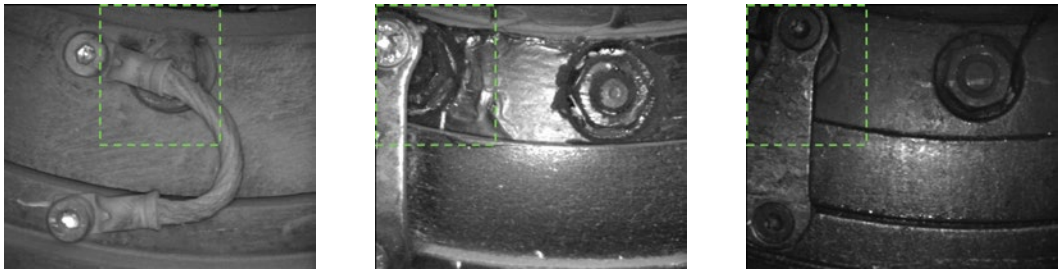
Abbildung 9: FN: Vergleich Classifier (links) und manuelle Annotation (rechts)

5.2 Evaluation auf vorselektierten Bildern

Durch die in Abschnitt 4 beschrieben Methode wurden Bilder der Schrauben und Muttern selektiert und anschließend ausgewertet. Hierbei kam es ausschließlich zu falsch-negativen Ergebnissen, welche sicherheitskritisch nicht relevant sind (Tab. 5). Diese wurden durch Verschmutzungen (Abb. 10a, 10b) und zu starke Verdeckung (Abb. 10c) verursacht.

Tabelle 5: Evaluation nach Bildselektion

Klasse	Precision	Recall	selekt. Bilder	FN	FP
Schraube	100%	99,989%	9236	1	0
Mutter	100%	99,472%	1326	7	0



(a) (b) (c)

Abbildung 10: Falsch-negative Ergebnisse nach Bildselektion (grün: Suchbereich)

6 Zuverlässigkeitsanalyse

Die hier vorgestellte Zuverlässigkeitsanalyse dient dem Aufzeigen der mindestens gleichen Sicherheit der automatischen Anlage im Vergleich zu den Sichtprüfungen. Hierzu wird eine Analyse der menschlichen Fehlerhäufigkeit durchgeführt und die Fehlerfortpflanzung modelliert.

6.1 Menschliche Zuverlässigkeit nach RARA

Zur Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit gibt es verschiedene Modelle. An dieser Stelle wird die bahnspezifische Methode RARA verwendet, welche Fehler produzierende Umstände (engl. „error producing conditions“, EPCs) mit einbezieht [2]. Es wird die menschliche Fehlerwahrscheinlichkeit (engl. „human error probability“, HEP) abgeschätzt, welche als das Verhältnis der Anzahl der begangenen Fehler zu den Gelegenheiten einen Fehler zu machen definiert ist. Der Quantifizierung gehen eine Problemdefinition und eine Aufgabenanalyse voraus.[2]

Problemdefinition: „Prüfung einer Radverschraubung durch optische Inspektion. An dem in Bewegung befindlichen Rad wird die Entscheidung getroffen, ob die Verschraubung vorhanden ist oder fehlt bzw. beschädigt ist.“

Die Schritte für die Quantifizierung nach RARA sind:

1. **Schätzung einer Basis-Wahrscheinlichkeit** für einen menschlichen Fehler (HEP)
2. **Bestimmung leistungsbeeinflussender Faktoren (EPCs)** auf Basis einer Aufgabenanalyse und Zuordnung zu allgemein formulierten EPC
3. **Quantifizierung des Einflusses der EPCs** (Assessed Proportion of Affect, APOA)

Im ersten Schritt wird die Aufgabe einem von drei Aufabenfeldern zugeordnet:

- **Automatisierte und fertigkeitsbasierte Prozesse**
- **Aufwändige und regelbasierte Prozesse**
- **Denken außerhalb der Prozeduren**

Die Aufgabe ist ein automatisierter und fertigkeitsbasierter Prozess, da sie nur wenig geistige Anstrengung erfordert. Innerhalb dieses Feldes stehen fünf generische Aufgabentypen („generic task type“, GTT) zur Verfügung.

Als GTT wurde „R4“ gewählt, da es sich um eine Tätigkeit handelt, bei der durch die hohe Geschwindigkeit der Kontrollen und Verschmutzungen die Möglichkeit einer Verwechslung besteht. Diese werden mit einer Basis-HEP von $p_{HEP,GTT} = 0,003$ bewertet.[4]

Im Rahmen einer Aufgabenanalyse wurden vier EPC identifiziert, welche in Tab. 6 beschrieben und den allgemein definierten EPC von RARA zugeorndet sind. Es wird eine Schätzung der Wirkungsstärke (engl. „Assessed Proportion of Affect“, APOA) zwischen 0,1 und 1 bestimmt. Eine APOA von 1 entspricht dem maximalen Effekt („Maximal Affect“,MA). Der Effekt auf die Fehlerwahrscheinlichekeit („Affect “, A) wird anschließend durch Gleichung 2 bestimmt.

$$A = (MA - 1)APOA + 1 \tag{2}$$

Tabelle 6: Datenverteilung Verschraubungen

Kategorie	Ref.	allg. Beschreibung des EPC	MA	APOA	A
Gestaltung der Aufgabe	T2	Zu wenig Zeit für die Fehlererkennung und behebung.	11	0,3	4
Person	P1	Ein Missverhältnis zwischen wahrgenommenem und tatsächlichem Risiko.	4	0,2	1,6
	P2	Ermüdung durch Schicht- und Arbeitsmuster.	2,6	0,5	1,8
Umgebung	E	Ein schlechtes oder störendes Umfeld.	8	0,1	1,7

Ref.	Begründung
T2	Es sind nur drei Schrauben gleichzeitig sichtbar, da das Rad vom Getriebekasten verdeckt wird. Die Verschraubungen sind für etwa 3 Sekunden sichtbar.
P1	Seltenes Auftreten der Fehler erzeugt eine falsche Erwartungshaltung.
P2	Die Kontrollen werden nachts durchgeführt.
E	Die Beleuchtung ist mangelhaft wird mit Taschenlampen unterstützt.

Die Vergrößerug der Basis-HEP durch die EPCs wird nun durch Multipliktion mit allen Faktoren der Leistungsbeeinflussung A bestimmt. Für den betrachteten Fall ergibt sich somit eine Wahrscheinlichkeit für einen menschlichen Fehler von $p_{HRA} = 0,059$.

Diese Schätzung der Fehlerwahrscheinlichkeit ist bedingt durch die EPC relativ hoch im Vergleich zu anderen Quantifizierungsmethoden. Nach Hinzen wird nach Auswahl eines vergleichbaren Aufgabenbereiches lediglich in eine Unterteilung in günstig oder ungüns-

tig vorgenommen, wodruch eine um eine Größenordnung kleinere HEP von $p_{HRA,Hinzen} = 0,005$ geschätzt wird. [5]

Um die Sicherheit der automatischen Anlage gegenüber den Sichtprüfungen bewerten zu können, reicht ein Vergleich der Fehlerwahrscheinlichkeit bei einem Prüfergebnis nicht aus, da die automatischen Kontrollen häufiger durchgeführt werden. Der Einfluss unterschiedlicher Wartungsintervalle auf das Risiko des Verlustes einer Verschraubung wird durch das nachfolgend beschriebene Markov-Modell abgebildet.

6.2 Zeitkontinuierliches Markov Modell

Ein kontinuierliches Markov-Modell bietet die Möglichkeit die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines zukünftigen Ereignisses Anhand von Eintritts- und Reparaturraten zu bestimmen [3]. In Abbildung 11 ist das entwickelte Modell vom sicheren Zustand bis zum Verlust des Rades dargestellt. Die Ziffer des Zustandes entspricht der Anzahl fehlerhafter Verschraubungen. Zustand 0 kennzeichnet den sicheren Zustand bei dem keine Schraube fehlt und Zustand 14 führt zum Verlust des Rades. Die Raten, mit welchen die folgenden Zustände auftreten, sind mit $\lambda_{1...14}$ und die Reparaturraten mit μ gekennzeichnet. Es wird bei einer Reparatur davon ausgegangen, dass unabhängig davon, wie viele Schrauben fehlen, alle Fehlenden ersetzt werden. Basierend auf den Daten der letzten Jahre wurden optimistische ($\lambda_{1,opt}$, $\lambda_{2,opt}$) und pessimistische Schätzungen ($\lambda_{1,pes}$, $\lambda_{2,pes}$) für die Änderungsraten definiert (Tab. 7).

Tabelle 7: Datenverteilung Verschraubungen

Variable	Ausfall- / Reparaturrate	Kommentar
$\lambda_{1,pes}$	3 / Jahr	Maximalwert aus 2020
$\lambda_{2,pes}$	1 / Woche	Maximalwert im Prüfintervall
$\lambda_{1,opt}$	1 / Jahr	Mittelwert 3 Jahre
$\lambda_{2,opt}$	0.25 / Woche	Schätzung > Mittelwert
$\lambda_{3..14}$	Unbekannt	Annahme: $\lambda_{14}>\lambda_{13}>..>\lambda_3$
μ_m	0.5 / Woche	menschliche Sichtprüfungen
μ_a	1 / Woche	automatische Anlage

Da nur bis zum Zustand 2 Daten vorliegen wird das Teilsystem bis zu diesem Zustand zum Vergleich den Sichtprüfungen mit dem automatischen Kontrollsystem herangezogen. Zur

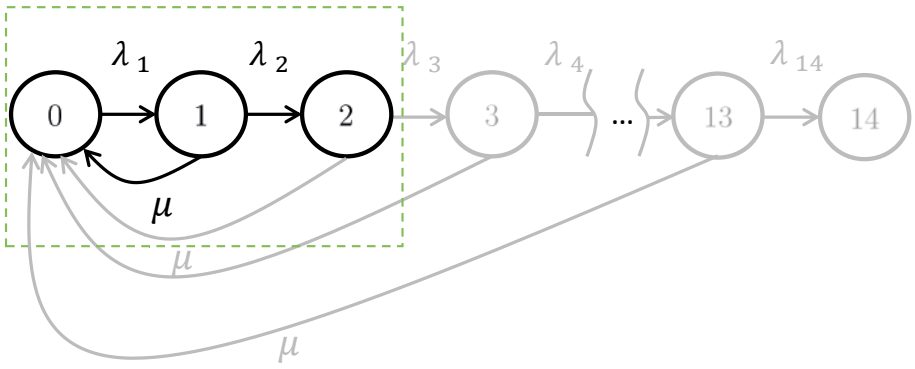


Abbildung 11: zeitkontinuierliches Markov-Modell

Berechnung der Zustandswahrscheinlichkeiten wird in (Gl. 3) angegebene Differentialgleichung gelöst. Hierbei ist G die Intensitätsmatrix, $P(t)$ die stationäre Verteilung. Die Modellierung wird im sicheren Zustand 0 begonnen ($P_1(0) = 1$).

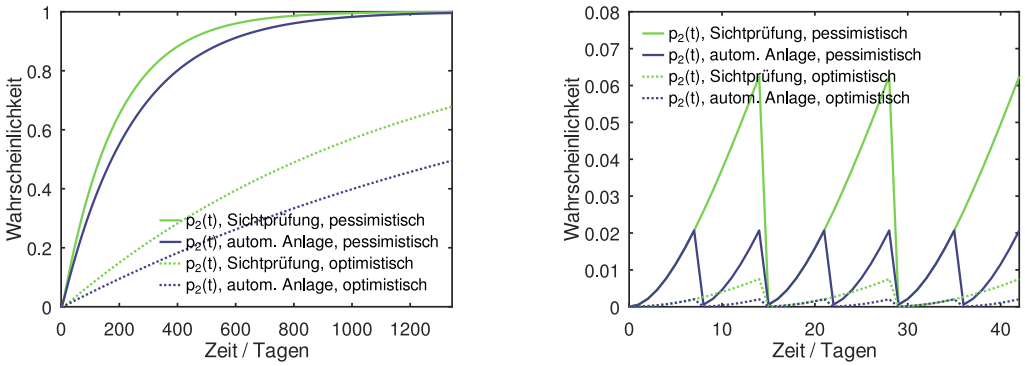
$$\dot{P}(t) = P(t)Q, G = \begin{pmatrix} -\lambda_1 & -\lambda_1 & 0 \\ \mu_1 & -(\lambda_2 + \mu_1) & \lambda_2 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, P(t) = \begin{pmatrix} P_0(t) \\ P_1(t) \\ P_2(t) \end{pmatrix}, P(0) = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Das Modell wird sowohl unter der Annahme kontinuierlicher Reparaturraten als auch inkrementell ausgewertet (Abb. 12). Die kontinuierliche Auswertung dient dazu den globalen Trend für die Eintrittswahrscheinlichkeit des absorbierenden Zustandes zu beobachten. Die inkrementelle Auswertung bildet hingegen die Entwicklung der Gefährdung innerhalb des Wartungsintervalls ab.

Mittels der kontinuierlichen Modellierung kann die mittlere Zeit bis zum Auftreten von zwei Fehlstellen besimmt werden (engl. "mean time to failure", MTTF) [3].

$$MTTF = \int_0^\infty R(t)dt \quad (4)$$

Die MTTF werden unter Annahme pessimistischer und optimistischer Schätzungen für die Sichtprüfungen und die Kontollanlage berechnet. Durch das kürzere Kontrollintervall der automatischen Kontrollanlage kann die mittlere Zeit bis zum Fehlen zweier Schrauben um $31\% - 61\%$ gegenüber den Sichtprüfungen erhöht werden.



(a) kontinuierlich (b) inkrementell

Abbildung 12: Wahrscheinlichkeit für das Fehlen von mindestens zwei Schrauben

Tabelle 8: Datenverteilung Verschraubungen

Bezeichnung	$MTTF$ / Tagen	μ_1	λ_1	λ_2
Sichtprüfungen (schlechtestenfalls)	190	μ_m	$\lambda_{1,pes}$	$\lambda_{2,pes}$
Sichtprüfungen (bestenfalls)	1186	μ_m	$\lambda_{1,opt}$	$\lambda_{2,opt}$
Kontrollanlage (schlechtestenfalls)	249 (+31%)	μ_a	$\lambda_{1,pes}$	$\lambda_{2,pes}$
Kontrollanlage (bestenfalls)	1962 (+61%)	μ_a	$\lambda_{1,opt}$	$\lambda_{2,opt}$

Der Einfluss eines Fehlers auf die Reparaturraten ist bei kontinuierlicher Modellierung nur gering und wurde daher hierfür nicht abgebildet. Bei der inkrementellen Auswertung wird bei einem Fehler das System am Ende eines Wartungsintervalls nicht in den Zustand 0 zurückgesetzt, wodurch die Eintrittswahrscheinlichkeit über das nächste Wartungsintervall hinweg weiter zunimmt. Mit zunehmender Anzahl fehlender Schrauben nimmt die Fehlerwahrscheinlichkeit nach Gleichung 5 ab, da mehrere Fehlerkennungen in Folge notwendig sind, um keine der Fehlschrauben zu erkennen.

$$p_F(t) = P_1(t)p_F + P_2(t){p_F}^2 \tag{5}$$

Bei inkrementeller Auswertung (Abbildung 12b) wird das Modell ohne Reparaturraten ($\mu = 0$) abschnittsweise über die Dauer eines Wartungsintervalls ausgewertet. Sowohl unter pessimistischen als auch unter optimistischen Annahmen ist am Ende eines Wartungsintervalls die Eintrittswahrscheinlichkeit für Zustand 2 um mehr als 60% abgesenkt im Vergleich zu den Sichtprüfungen bei der automatischen Anlage.

Die Auswertung der Modellstruktur über einen Zeitraum von einem Jahr verdeutlicht,

dass ein einzelner Fehler bei der automatischen Kontrollanlage eine signifikant geringere Gefährdung verursacht als ein Fehler bei den Sichtprüfungen (Abbildung 13). Um die gleiche Gefährdung der Sichtprüfungen nach einem Fehler zu erreichen, müssten drei aufeinanderfolgende Ergebnisse der automatischen Kontrollanlage fehlerhaft sein.

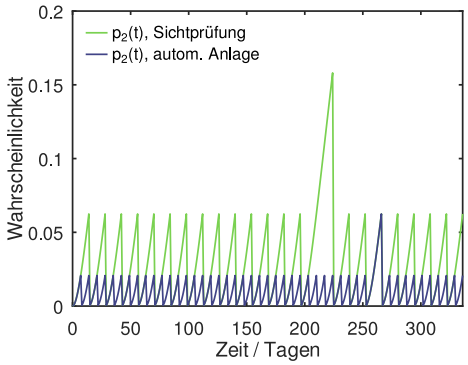


Abbildung 13: Inkrementelle Modellierung unter Berücksichtigung der Fehlerwahrscheinlichkeit

7 Zusammenfassung und Ausblick

Unter Verwendung eines tiefen neuralen Netzes zur Objekterkennung wurde eine Methode zur Erkennung von fehlenden Verschraubungen und Radreifenrutschern an Rädern von Straßenbahnen vorgestellt. Hierzu wurde eine Bildselektion entwickelt, die es ermöglicht, zusätzlich zu der Erkennung der Fehlstellen selbst, das Vorhandensein der Verschraubungen als Kriterium für die Fehlererkennung heranzuziehen.

Auf den selektierten Bildern kam es bei der Evaluation der Objekterkennung auf den bisherigen Daten zu einer geringen Anzahl falsch-negativer Ergebnisse bei der Erkennung von Verschraubungen, welche durch starke Verschmutzung oder Verdeckung verursacht wurden. Zu dem sicherheitskritisch relevanten Fall eines falsch-positiven Ergebnisses kam es hierbei nicht.

Als Bewertungsmaßstab wurde die menschliche Fehlerwahrscheinlichkeit mittels RARA quantifiziert. Unter Berücksichtigung von leistungsbeeinflussenden Faktoren wurde für das Übersehen einer fehlenden Schraube durch den Menschen die Wahrscheinlichkeit mit $5,9\%$ abgeschätzt.

Mittels eines Markov-Modells wurden unterschiedliche Wartungsintervalle und verschie-

dene Annahmen für die Eintrittswahrscheinlichkeiten der Schäden abgebildet. Es kann bei veränderter Datenlage angepasst werden, um das Risiko der Anlage neu zu bewerten. Es zeigte sich auf Basis der aktuellen Datenlage ein reduziertes Risiko der automatischen Kontrollen gegenüber den Sichtprüfungen, bedingt durch das kürzere Wartungsintervall von einer Woche gegenüber zwei Wochen.

Die Ergebnisse der Evaluation der Objekterkennung sind vielversprechend, da keine sicherheitskritischen Fehler aufgetreten sind. Die Datenlage ist zu diesem Zeitpunkt allerdings noch nicht repräsentativ. Insbesondere von dem Radtyp mit Bolzen sind bisher zu wenig Daten vorhanden, um die Fehlererkennung abschließend zu bewerten. Zukünftig sollen wöchentlich mehr als 100 Straßenbahnen vermessen und weitere Bilder der Fehlstellen erzeugt werden, um eine umfangreichere Validierung zu ermöglichen.

In der weiteren Bewertung gilt es ein besonderes Augenmerk auf systematische Fehler zu legen. Bei diesen könnte das Ergebnis der Objekterkennung bei aufeinanderfolgenden Erkennungen wiederholt ein falsches Ergebnis liefern, wenn beispielsweise eine Verschmutzung einem Schraubenkopf ähnelt. Dies wird in dem hier vorgestellten Ansatz bereits durch die redundante Struktur der Fehlererkennung adressiert. In Zukunft wird die Auswertung um die Erkennung von Anomalien in den Zeitreihendaten erweitert, wodurch ein weiteres Kriterium für die Fehlererkennung zur Verfügung steht, welches auf einem anderen Messprinzip basiert. Darüber hinaus können zusätzliche Metriken verwendet werden, um die Wahrscheinlichkeit für systematische Fehler zu reduzieren [6].

Session 13
Timo Schmitz, Fabian Hampel, Martin-Christopher Noll, Christian Schindler

Autoren

Schmitz, Timo
Timo Schmitz ist seit 2021 Entwicklungsingenieur bei i4M technologies GmbH. Er studierte an der RWTH Aachen Maschinenbau und Automatisierungstechnik.

Fabian, Hampel
Fabian Hampel studierte Maschinenbau in Aachen und Bahnsystemingenieurwesen in Dresden. Er arbeitet seit 2017 als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Schienenfahrzeuge und Transportsysteme der RWTH.

Noll, Martin-Christopher
Martin-Christopher Noll ist Geschäftsführer der i4M technologies GmbH. Er studierte Maschinenbau an der RWTH Aachen und begann 2013 seine Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Maschinenelemente und Systementwicklung (IMSE) und am Center for Wind Power Drives (CWD) der RWTH Aachen. Er gründete im Jahr 2016 gemeinsam mit Teilen der Institutsleitung des IMSE und des CWD die i4M technologies GmbH.

Schindler, Christian
Christian Schindler studierte Maschinenbau an der RWTH und promovierte zum Thema Schienenfahrzeugdynamik. Danach arbeitete er 12 Jahre in verschiedenen Positionen der Schienenfahrzeugindustrie. 2004 wurde er zum Professor für Konstruktion an der TU Kaiserslautern berufen. Seit 2016 leitet er das Institut für Schienenfahrzeuge und Transportsysteme an der RWTH Aachen.

Literatur

[1] M.-C. Noll, "Predictive Maintenance am Beispiel Schienennahverkehr: Auswirkungen von Gleisfehlstellen auf die mechanischen Belastungen an Straßenbahnrädern und Konzept zur zustandsorientierten Instandhaltung von Gleisinfrastruktur," in *IRSA 2019 – Proc. of 2nd International Railway Symposium Aachen*, i4M techologies GmbH, RWTH Aachen, 2020.

[2] W. Gibson, A. Mills, S. Smith, and B. Kirwan, *Railway action reliability assessment, a railway-specific approach to human error quantification*. 2013.

[3] G. Bolch, S. Greiner, H. de Meer, and K. S. Trivedi, *Queueing Networks and Markov Chains: Modeling and Performance Evaluation with Computer Science Applications*. USA: Wiley-Interscience, 1998.

[4] H. Gibson, *Railway Action Reliability Assessment user manual, A technique for the quantification of human error in the rail industry*, 2012.

[5] A. Hinzen, *Der Einfluß des menschlichen Fehlers auf die Sicherheit der Eisenbahn*. PhD thesis, Aachen, 1993.

[6] M. T. Le, F. Diehl, T. Brunner, and A. Knoll, "Uncertainty estimation for deep neural object detectors in safety-critical applications," in *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pp. 3873–3878, 2018.

IRSA 2023

SESSION 14

WASSERSTOFF TECHNOLOGIE

HYDROGEN TECHNOLOGY

Session 14
Markus Kordel, Matthew Maikel Heeland, Kevin Knetsch

Waste Energy AC Technologies in H2-Multiple Units

Kordel, Markus[1], Heeland, Matthew Maikel[2], Knetsch, Kevin[2]

[1] German Aerospace Center – Institute of Vehicle Concepts
[2] Wabtec Corporation

Summary

The Heating Ventilation and Air Conditioning (HVAC) systems require up to 40 % of the overall energy demand in regional railway vehicles. Improving efficiency of the whole train system is especially important in non-catenary or hybrid rolling stock, such as hybrid fuel cell multiple units. One approach can be the usage of unused energy (waste energy), which can be waste heat and pressure energy between tank and fuel cell system. Currently no market ready systems for rolling stock exist to utilize this waste energy and the potential of novel systems is not investigated sufficiently. Here we show a simulative investigation of a metal hydride refrigeration system and an absorption refrigeration system in a generic thermal car body. The results are evaluated on the basis of European standards (e.g. EN 50591) and two realistic tracks in Spain. The potential annual energy savings are highly climate zone dependent and vary between 795 kWh/a and 6106 kWh/a for the absorption refrigeration system and between 1547 kWh/a and 13226 kWh/a for the Hydrogen Powered Air Conditioning (HyPAC) system. The absorption refrigeration system is more sensitive to fluctuating fuel cell loads, whereas the HyPAC shows similar improvements for both tracks. Reducing HVAC energy demand needs to be investigated further and especially further improvements in the system design (sizing, material selection) can increase the energy improvements in future.

Keywords: Rolling Stock, Fuel Cell Powertrain, HVAC, Metal Hydrides, Absorption AC, Hydrogen

1 Introduction

The analysis of air conditioning technologies in a waste heat perspective is part of the holistic energy efficiency improvement analysis objective to increase autonomous range within the *FCH2Rail* EU-Project's framework. A bi-mode powertrain is implemented in an existing vehicle in this project. Thereby, the advantages of both, catenary operation and autonomous operation with fuel cells can be utilized [1].

The energy consumption through HVAC systems impose a relevant energy demand in railway applications. So far, HVAC systems are the second largest consumer of energy of a transit train, right behind the traction. For long-distance trains this can be 15 % to 20 % and for regional vehicles up to 40 % of the overall energy demand [1][2]. For overhead line independent technologies such as diesel powered, battery electric and fuel cell hydrogen (FCH) trains, the autonomy will therefore be reduced, if HVAC systems are used. To provide a comfortable riding experience, air conditioning (cooling or heating) is indispensable. Thus, it is necessary to investigate more efficient concepts to fulfill the need of air conditioning in order to reduce the train's overall energy consumption [3]. Therefore, novel HVAC concepts were investigated to reduce energy consumption while still meeting the required passenger comfort. This paper shows and evaluates two potential cooling technologies for the non-catenary sections of bi-mode FCH trains and therefore specific unused energy flows on the vehicle will be analyzed. The pressure energy and waste heat from the fuel cell system are in focus of this study.

Reference technology is the Vapor Compression Refrigeration Systems (VCRS), as it is the established standard and state of the art for railway applications. A VCRS is a closed refrigerant cycle, where the refrigerant changes between liquid and vapor state, changing the pressure, to transfer heat from one location to another [4]. Given by the laws of thermodynamics a compressor is needed to perform mechanical work to increase the pressure and to drive the cycle. The compressor is most characteristic for the VCRS and consuming a lot of energy. A VCRS compressor is commonly driven by electric motors.

Beside the high energy consumption of a VCRS, the refrigerants are subject of controversial debates due common refrigerants have an extensive global warming potential. However, natural refrigerants such as propane are currently established. Related technical alternatives, such as the closed or the open air-cycle system, which is used in German highspeed trains (ICE 3), do not provide the chance to replace the common VCRS so far, as they still need a lot of energy [5].

In the following, two novel cooling technologies are presented to utilized unused energy and therefore to reduce the total effort for the conventional HVAC system.

2 Waste Energy Refrigeration Concepts for Low Temperature Fuel Cells

This chapter outlines the particularities of the fuel cell power block including the Low Temperature Polymer Electrolyte Membrane (LT-PEM) fuel cell system with regards to

the temperature levels, waste heat production and hydrogen pressure levels. After explaining the unused energy sources in the fuel cell power block, the fundamentals of the Hydrogen Powered Air Conditioning (HyPAC) system and the Absorption Refrigerator (ABR) are explained.

2.1 Fuel Cell Hybrid Power Pack

The Fuel Cell Hybrid Power Pack (FCHPP) defines the main components for a fuel cell driven train system. The hybrid aspect is addressed by combining fuel cell systems battery storage and overhead line as energy sources and converters. Three fuel cell systems with three high temperature coolers and one low temperature cooler were defined for one CAF Civia prototype train [6]. This study only focuses these fuel cell related components, including the hydrogen tank, as these systems provide the majority of waste heat and pressure energy in autonomous operation mode. Therefore, improving the efficiency of these components will affect the train's range.

Currently the state-of-the-art fuel cell technology for railway vehicles is the PEM fuel cell system, as already demonstrated in prototypes and series vehicles [7]. The FCHPP uses this technology as well, which leads to several boundary conditions.

The fuel cell stack as core component consists of stacked, water-cooled single cells with semi permeable sulfonic acid membranes. These sulfonic acid groups change its morphology at temperatures above 90 °C to 100 °C [8] [9] and the membrane will be destroyed irreversible. Therefore, cooling agent temperatures lower than 70 to 85 °C at the fuel cell stack outlet are indicated.

Due to its low enthalpy exhaust flow, the majority of waste heat has to be recooled through the coolant. The electric fuel cell efficiencies vary between 45.8 % and 63.7 % of the Lower Heating Value (LHV), which leads to available waste heat of 36.3 % to 54.2 % of the LHV [9, 10].

Hydrogen- and air-pressures of 1 to 3 bar at the membrane are observed. However, this is not the minimum pressure range at the fuel cell system inlet. The balance of plants components in the hydrogen line need a higher prepressure to operate the pressure regulator and recirculation pump. Therefore, the fuel cell system pressure varies between 5 and 15 bar. The utilized system has an operating pressure of 8.5 bar, which will be considered as static pressure in the following [11].

2.2 Hydrogen Powered Air Conditioning

The HyPAC consists out of two switching metal hydride filled reactors, which absorb hydrogen from the train's pressure tank and desorb hydrogen towards the fuel cell system. The HyPAC has to be integrated in the hydrogen line of the train system. First, the tank pressure needs to be throttled down to 50 bar, that the hydrogen pressure does not exceed the mechanical stability of the reactors. The first reactor absorbs the hydrogen and second reactor desorbs the hydrogen in one half cycle. The desorbed hydrogen is controlled again by an additional pressure regulator to ensure a stable hydrogen pressure and mass flow for the fuel cell system.

To provide constant cooling power, a quasi-continuous operating strategy needs to be established, but a single reactor cannot absorb and desorb hydrogen simultaneously. It can either release hydrogen and provide the cold flow until the pressure drops underneath the fuel cell tolerable threshold, or it can absorb hydrogen until the maximum hydrogen pressure of the reactor is reached. In order to have a quasi-continuous cooling and heating flow, two loops have to be set up with at least one reactor each.

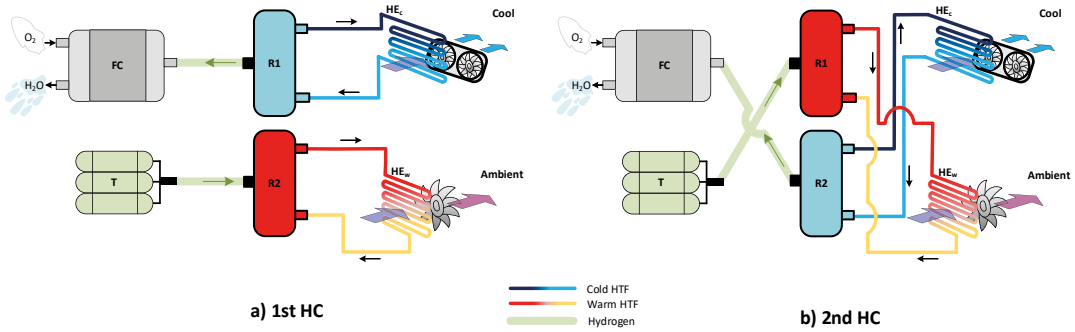


Figure 1: Scheme of two-reactor-concept to provide continuous heat and cold with half-cycle 1 (a) and half cycle 2 (b) [12]

Figure 1 shows the two half-cycles which can ensure the quasi-continuous heating and cooling power. In the first half cycle (a), reactor 1 (R1) desorbs hydrogen and directs it towards the Fuel Cell and the cold heat transfer fluid will be directed to a heat exchanger that cools down the supply air for the passenger saloon in the train. Meanwhile reactor 2 absorbs the hydrogen from the hydrogen tanks, the aforementioned exothermic reaction than heats up the transfer fluid. With an ambient heat exchanger, heat will be recooled from the transfer fluid. When the desorbing reactor reaches the equilibrium pressure the

reaction slows down and cannot provide enough hydrogen anymore without decreasing the pressure underneath the tolerable fuel cell pressure threshold. If equilibrium state is reached, the HyPAC controller switches from first half cycle to the second half cycle by triggering a switching mechanism for the hydrogen valves and the heat transfer fluid valves. Now the reactor 1 absorbs the hydrogen and recools towards the ambient and reactor 2 (R2) desorbs hydrogen and provides a cold flow for the passenger saloon in our case. Half-cycle 2 switches to half cycle 1 again, when the pressure of the desorbing reactor decreases again.

The achievable cooling power ($\dot{Q}_c$) and cooling temperature is hydrogen mass flow, tank pressure, fuel cell pressure and metal hydride's material parameter dependent.

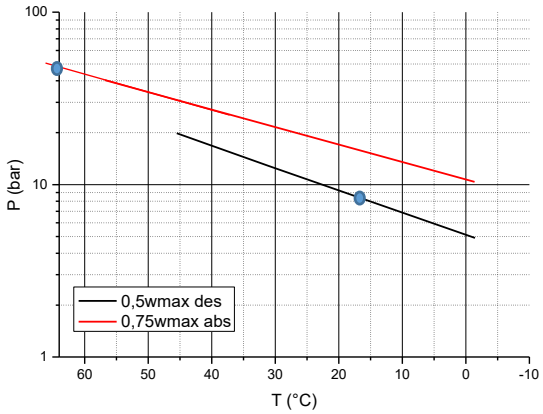


Figure 2: Van't hoff diagramm of C2 Hydralloy material (modified [13])

Figure 2 depicts the temperature-pressure isotherms of the C2 Hydralloy material, which is utilized in the small scale DLR testbench prototype and for all described simulation studies. The red line represents the hydrogen absorption until 75 % of the material's maximum capacity (0.75wmax abs). At a minimum tank pressure of 50 bar, this leads to a regeneration and therefore recool temperatures higher than 65 °C can be achieved. At a minimum tank pressure of 50 bar, this leads to regeneration and therefore recool temperatures higher than 65 °C. The fuel cell pressure itself defines the desorption temperature at 8.5 bar and the hydrogen is desorbed until 50 % of the material's maximum capacity for this temperature and pressure combination (0.5wmax des). This leads to a minimum metal hydride material temperature of 18.5 °C. This indicates, that a system with this material selection cannot be operated standalone regarding the cooling temperatures. Therefore, a combination with a VCRS system is considered in the first place.

2.3 Absorption Refrigeration

In an ABR, the selective absorption of a gas or solute by a liquid or porous solid is applied. Physically, absorption is the dissolution of two or more substances into each other. The absorption of substance flows is a reversible process and can therefore also be applied in refrigeration. Since a solvent circulates in the circuit of an absorption refrigeration cycle in addition to the refrigerant, special attention is paid to the selection of the working substance pair. Common substance pairs are ammonia as refrigerant and water as solvent or water as refrigerant and lithium bromide as solvent.

The solution circuit represents the so-called thermal compressor and replaces the mechanical compressor, which is used in a VCRS. Instead of compressing and discharging the compressed, hot refrigerant gas from the compressor, the liquid solvent enriched with refrigerant is conveyed to the desorber. There, heat is supplied to the solution from the outside. As a result, the temperature and pressure of the solution increases, the refrigerant evaporates and will flow to the condenser. The homogeneous solution in the absorber, saturated with refrigerant, is called the rich solution. After the refrigerant exits the solution circuit, it undergoes isobaric condensation in the condenser. This is followed by refrigerant expansion to the pressure level of the evaporator. After expansion of the low-refrigerant solution, widely referred to in refrigeration technology only as poor solution, it enters the absorber. To increase the efficiency of the solution circuit, an internal heat exchanger is used. This means that a smaller amount of heat is required in the desorber, as the rich solution is preheated. The transport of the rich solution from the absorber to the desorber is realized with the help of a low-power pump. Waste heat utilization for only absorption refrigeration operation below a certain temperature level is not applicable. A simple application of an ABR, which uses the waste heat of the fuel cell of the rail vehicle for desorption is therefore not realistic. Hence, the usage of ABR in the research project serves as a merely efficiency improvement of the VCRS [14, 15].

3 Methodology

To meet the objective of a reproducible energy saving potential evaluation, testcases were identified based on European standards, meteorological data and generic and real track data. These use cases are then input data for the simulation tool chain.

3.1 Climatic Use Cases

Several European standards were utilized to calculate the annual energy consumption of the train's HVAC system. In general, the climatic constraints are defined by ambient conditions, which define the static heating and cooling use cases and the operating hours per year for these heating and cooling use cases. The parameters to calculate an annual energy demand for HVAC systems in regional trains are not explicitly defined in only one standard (e.g. EN 50591-2019) as long-distance use cases and regional use cases are mixed. However, to ensure a realistic and trustworthy test plan, all climatic testcases were matched with the current regional train standard (EN 14750-2:2006) and the under-review standard (EN 14750-2022). Therefore, some temperature requirements in the cabin needed to be changed, as stricter control corridors might apply in the upcoming standard. 27 testcases to reflect climate zone 1 (Southern Europe) and climate 2 (Northern Europe) were finally chosen to calculate the energy demand. As the use case Zaragoza-Canfranc has a fluctuating ambient temperature, the authors considered to define four additional climatic use cases, based on meteorological weather data. The used weather data gives us the minimum, maximum and average temperature in a month and based on further research, the minimum and maximum humidity at certain temperatures can be stated as well. To define climatic use cases, further assumptions are finally needed. Occupancy data and average solar radiation are defined as static and either 0 W/m² for heating use cases or 600 W/m² for cooling use cases. The humidity was linear approximated with four grid points (-5 °C, 48 % rel. humidity and 44.5 °C and 77 % rel. humidity for Zaragoza and -12°C, 48 % rel. humidity and 41.0 °C and 81 % rel. humidity for Jaca) due to lack of data. Based on a generic car body defined in *Fine 2* [16] the switching point between a heating and cooling operating mode was calculated with the weather data. Based on these calculations, a cooling use case exists above 14 °C and a heating use case below 14 °C. Analyzing a cumulative distribution function (CDF) of the temperatures indicates, that the HVAC operates 60 % of the time in heating mode for Zaragoza and 44 % for Jaca (closest weather station to Canfranc). Therefore, the characteristic heating use cases are weighted with 60 %, respectively 44 % of the annual operating time.

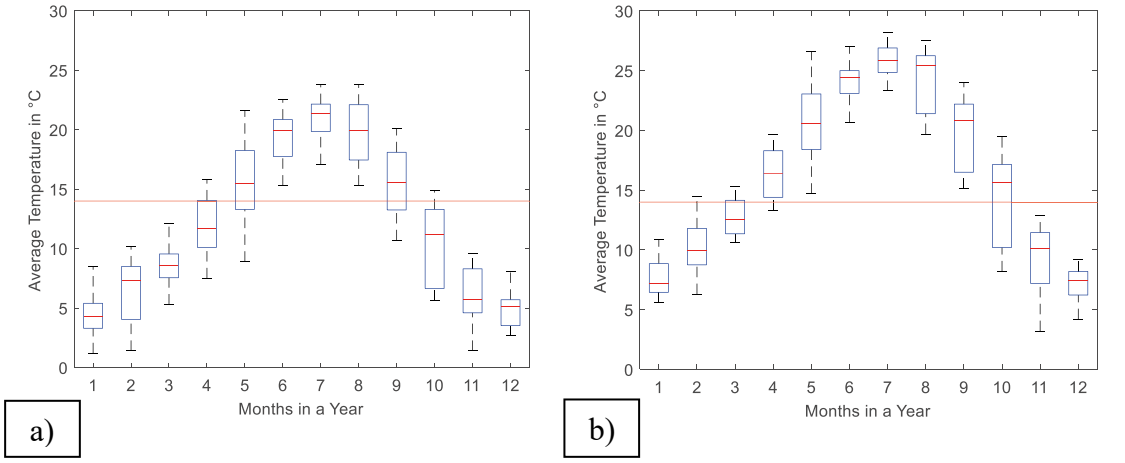


Figure 3: Boxplots of average temperatures for Jaca (a) and Zaragoza (b) with switching point between heating and cooling at 14 °C (red line)

In a next step, characteristic temperatures for the four additional heating and cooling use cases need to be identified. Therefore, all temperature data points above the heating-cooling switching point and all temperatures below switching points were analyzed separately with a probability density function analysis (Figure 3).

Table 1: Additional use cases based on weather data

	Zaragoza		Jaca	
	Heating	Cooling	Heating	Cooling
Outside Temperature	7.2 °C	23.5 °C	5.3 °C	22.3 °C
Relative Humidity	90 %	80 %	90 %	80 %
Solar Radiation	0 W/m²	600 W/m²	0 W/m²	600 W/m²
Occupancy	32 %	32 %	32 %	32 %
Annual Operating Hours	2460.6 h/a	1640.4 h/a	1804.4 h/a	2296.6 h/a

The four additional use cases are summarized in Table 1 and annual operating hours of 8160 hours per year was assumed similar to the EN 50591 standard.

3.2 Track data

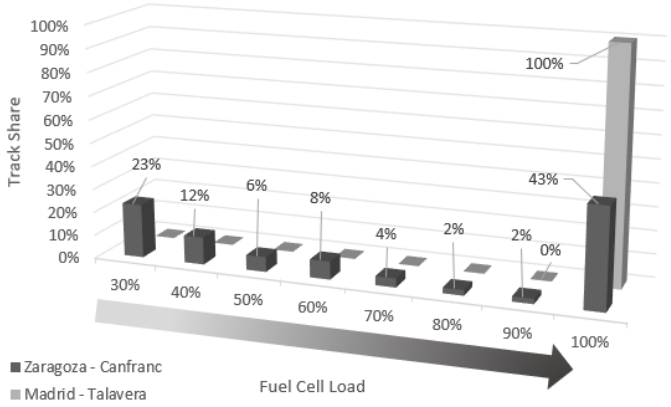


Figure 4: Fuel Cell Loads in relation to Track Share

On the test drive from Zaragoza to Canfranc, the fuel cells were operated at full load for 43 % of track share, as this track is partly electrified with an overhead line. On nearly a fourth of the total track, the load of the fuel cell was only about 30 %. The total measurement time was almost 6.2 hours. During the measurement, the maximum waste heat output was 78 kW and the minimum was 13 kW. The minimum waste heat temperature is 64 °C and the maximum temperature of the fuel cell waste heat is 75 °C. This track was considered as worst case, as the waste energy amount is quite low. On the track from Madrid to Talavera, the fuel cells were operated at full load, resulting in a waste heat temperature of 75 °C and a waste heat output of 78 kW for the entire route. The total measurement lasted approximately 2.5 hours. This non-electrified use case is considered as best case for the waste energy usage.

4 Simulation Models

The utilized simulation models are mentioned in Figure 5. The Thermal Car Body Model Light (TCBM Light) gives the heating and cooling demand in stationary operating points based on the climatic use cases mentioned in chapter 3.1.

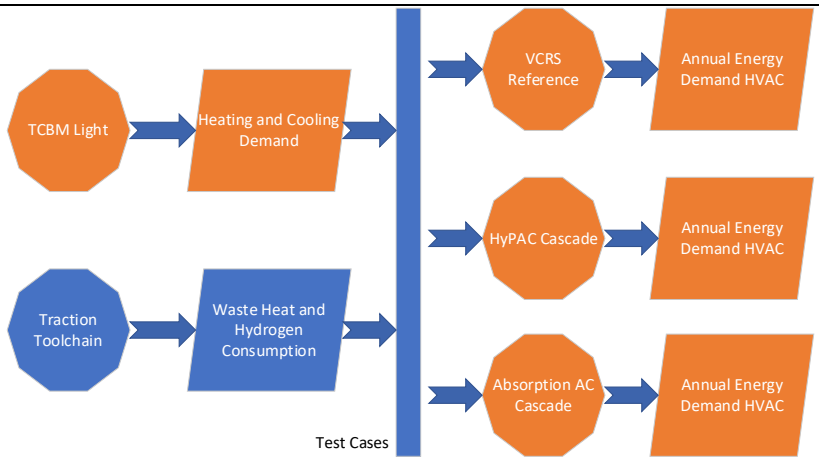


Figure 5: Simulation Tool Chain

The waste heat and temperature consumption based on the tracks defined in chapter 3.2 are calculated by the traction toolchain which is described in [17]. Both, the calculated heating and cooling demand as well as the waste heat and hydrogen consumption are input values for the baseline scenario, calculated by the VCRS reference model, the HyPAC scenario and the absorption air conditioning scenario. All orange colored models are explained in the following.

4.1 Thermal Car Body Model Light for Cooling and Heating Capacity

The TCBM Light calculates the baseline heating and cooling demand for a generic car body based on defined static climatic testcases. The generic car body model was already defined in the *Fine 2* project [16]. The tool is programmed in python language and calculates the heat transfer through wall and windows, solar radiation, latent and sensible human heat based on lookup tables and enthalpy flow influences due to dehumidification and air mixture. The humid air calculations are implemented with the *cool prop* open source package [18]. The calculations can be either performed by a .csv input file which can calculate all testcases at once, or a web tool, which can calculate additional climatic test cases. This tool was plausibility checked with an industry tool from Wabtec. The average deviation between the industry tool and the TCBM Light was 5.6 %. However, a maximum deviation of 16 % was observed. This outlier was due to different target humidity, as the Wabtec tool dehumidified down to 40 % rel. humidity and the TCBM Light met the standard requirements of 65 % rel. humidity. Considering this, the TCBM Light tool is suitable to provide baseline cooling and heating capacities for further investigations.

4.2 Vapor Compression Refrigeration System Reference Model

As the VCRS is the common AC technology so far, a roof-mounted compact HVAC model with VCRS needs to be designed, to calculate the reference electrical power consumption needed for covering the cooling demands. The reference VCRS model is based on inputs of the CAF Civia reference car and the given information about the compact HVAC unit, used for the *FCH2Rail* project (Table 2).

Table 2: Mechanical characteristics of HVAC components

Compressor:	2x
Type	Bitzer, four pistons (4JE-22Y)
Power regulation	No (separate hot gas bypass only)
Condenser heat exchanger:	**2x**
Length	1,2 m
Geometry	25 x 21.5 mm (height, width)
Tubes	9.52 x 0.4 mm (diameter, wall thickness), Cu
Nr. of tubes	18 x 6 (height, width)
Fins	0.3 x 3 mm (thickness, distance), Al
Air flow	3500 m^3/h
Condenser fan	Axial, 900 W
Evaporator heat exchanger:	**1x (interlaced)**
Length	0.8 m
Geometry	25 x 21.5 mm (height, width)
Tubes	9.52 x 0.4 mm (diameter, wall thickness), Cu
Nr. of tubes	32 x 6 (height, width)
Fins	0.3 x 3 mm (thickness, distance), Al
Air flow	5000 m^3/h
Supply air fan	2x radial, 2x 900 W

Using an internal HVAC simulation tool and the given inputs (chapters 4.1 and 4.2) the reference VCRS power consumption was determined and is summarized in Table 2.

Table 3: Reference Data for trend line

Cli-mate zone	Trial Number DIN EN 50591-2019	Outside Temperature [°C]	Heating (H) or cooling (C)	Net cooling or heating demand [kW]	Ø Power consumption comp [kW]	Ratio of Ø power cons. and cooling demand [-]
1 + 2	1	-10	H	-9.8	-	-
	2	0	H	-15.8	-	-
	3	10	H	-3.6	-	-
	4	15	C	0.9	1.9	2.145
	5	22	C	20.5	6.5	0.315
	6	28	C	28.9	15.3	0.532
	9	-10	H	-8.1	-	-
	10	0	H	-6.8	-	-
	11 / 15	15	H	-2.2	-	-
	12	22	C	0.2	1.6	(8.834)
1	7	40	C	37.6	25.0	0.665
	13	40	C	7.5	5.7	0.772
2	7	35	C	33.4	20.1	0.522
	13	35	C	5.3	4.1	0.773
Z1	-	7.2	H	-5.2	-	-
Z2	-	23.5	C	9.2	1.6	0.605
Z3	-	5.3	H	-6.4	-	-
Z4	-	22.3	C	8.3	5.0	0.599

The last column shows a VCRS specific ratio of the average electrical power consumption of the compressor and the cooling demand can be generated. This is a very rough estimation, but as good as needed to represent the behavior of this specific VCRS within the range of the trials, so it can be used for the upcoming investigations. It represents the specific characteristics of the VCRS, incl. used heater exchanger, compressors, power regulation on/off of one or two compressors as well as the use of the hot gas bypass.

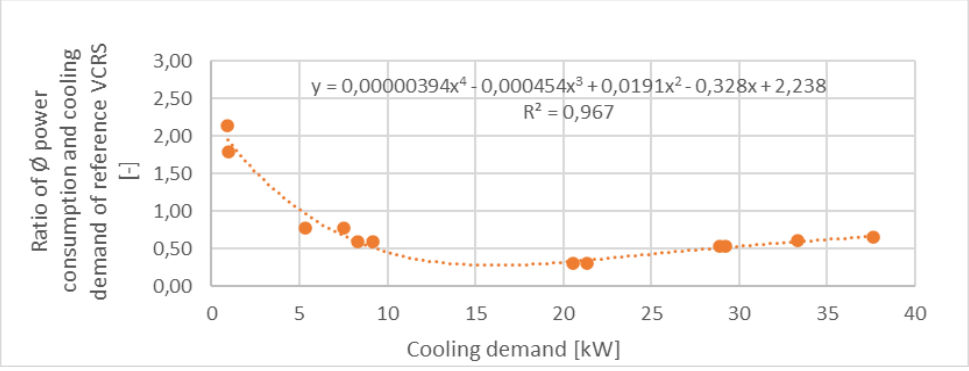


Figure 6: VCRS reference incl. trend line

Finally, a trend line (*Figure 6*) of this specific ratio can be used to simplify the simulation models and to calculate the power demand for novel and combined HVAC concepts.

4.3 Cascade Absorption Refrigerator

The simulation integrates mathematical models that access material data to calculate the refrigeration cycles of the ABR and VCRS. The overall performance of the ABR is considered by combining established balances under a specific sequence of operation of the system. Essential assumptions and requirements have been defined to simplify the calculation as much as possible without compromising basic physics. The system is simulated under the assumption of stationary conditions. This means that the mass flow of water vapor produced in the desorber is the exact same as the amount of water vapor absorbed in the absorber. The second constraint is that the pressure drop in the pipes and containers is negligible, as are the heat losses from the desorber to the environment and the heat gains from the environment to the evaporator. Furthermore, the thermal compression of the rich solution and the expansion process of the refrigerant and the poor solution in the expansion valves occurs isenthalpic. All assumptions concerning the losses of the system, such as pressure or heat losses, must be taken in account to simplify the mathematical calculations that run in the background of the simulation as much as possible. Among other things, this makes it possible to reduce the duration of the simulation even with much data to be processed. Also relevant in the simulation with *Matlab* are the substance data of the substances used. For each state point, all relevant substance data must be tapped or, if necessary, calculated using calculation formulas. For water, which is used as a refrigerant in the absorption refrigeration system, *X Steam for Matlab* plug-in is used. To obtain the material data of a water - lithium bromide solution, an implementation like the procedure for the material data of water must be used.

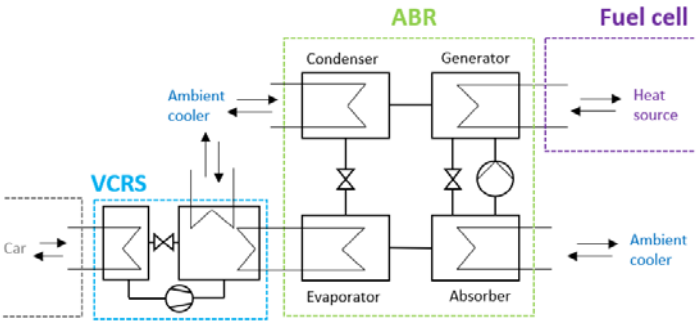


Figure 7: ABR cascade system

This is done using *Matlab* functions, which calculate the concentration for the corresponding lithium bromide - water solution temperatures and saturation pressures within the range according to the curve fitting equation and enthalpies at the respective states. The operation mode of the cascade depends on various conditions. Cascade operation (Figure 7) is not possible if the rich solution approaches the crystallization limit too closely, if the heat output provided by the fuel cell is too low or if the evaporator output of the ABR is too low.

4.4 Hydrogen Powered Air Conditioning Cascade

The metal hydride model is an equation based 0-D Modell described in [13, 19] and implemented in the *Kuli* simulation software. The model was validated with test-bench data with a good accuracy [19]. However, the test bench's cooling power is not sufficient to climatize a train cabin and therefore the reactor needs to be scaled up. The scaling factor is based on the maximum usable hydrogen mass flow, which is 40 times higher than in the test bench system. All scale-up parameters are summarized in Table 4.

Table 4: Scale up parameter for the HyPAC System

	Reactor Parameter		
	Test Bench		Train
Hydrogen mass flow	4.5 g/min		178.2 g/min
Metal hydride mass	3 kg		120 kg
Scaling MH mass		1:40	
Heat transfer fluid mass	0.8 kg		31.2 kg
Metal mass	9.6 kg		233.6 kg
Scaling metal mass		1:25	
Sum	13.4 kg		384.8 kg

According to Figure 2, the cooling fluid temperatures should not change when the system is scaled up, but cooling power should increase by increasing the hydrogen mass flow. This correlation allows a plausibility check and can estimate if the scaled-up system behaves similar to the test bench system.

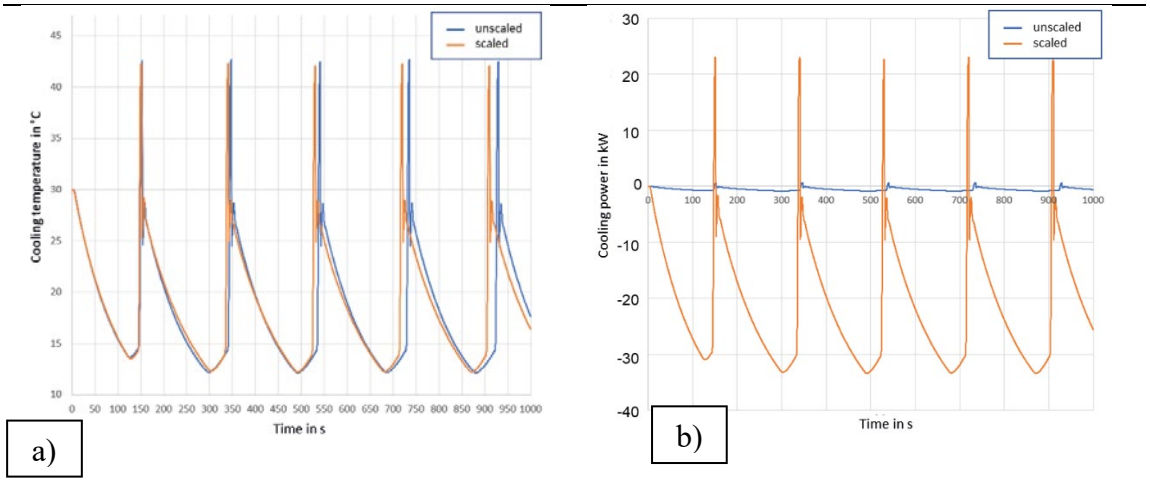


Figure 8: Cooling temperatures for 4.5 g/min hydrogen mass flow (unscaled) and 178 g/min hydrogen mass flow (scaled) (a) and scaled and unscaled cooling power (b)

Figure 8 a) shows the temporal course of the cooling temperatures in an unscaled and a scaled reactor at 4.5 bar desorption pressure (fuel cell pressure) as test bench system has this desorption pressure level. The desorbing half-cycles and therefore the switching between two reactors can be clearly seen by the high temperature peaks. The minimum temperatures differ less than 1 % between the scaled and unscaled curves. Only the cycle time between the half cycles differs. One reason might be the slightly different initial values and the non-optimized switching trigger. However, the cooling power (Figure 8 (b)) is almost 30 times higher than in the test-bench system which was expected. The simulation itself was performed in a Co-Simulation platform based on *Dymola* and *Kuli,* whereas the VCRS system was implemented in *Dymola,* based on the reference system in chapter 4.2 and the Metal Hydride system was implemented and validated in *Kuli.*

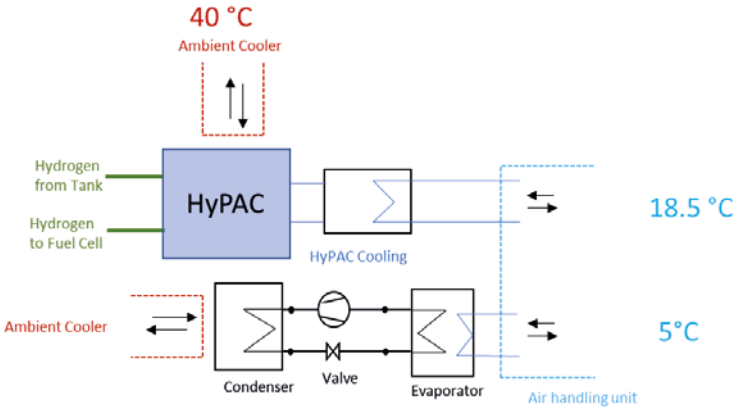


Figure 9: System architecture of the HyPAC system combined with a VCRS system (modified [11])

A combination of a VCRS system and the metal hydride refrigeration system is necessary, because the cooling power from the metal hydride system is hydrogen mass flow dependent and therefore fluctuates, when fuel cell power changes.

Figure 9 shows the VCRS with condenser, evaporator, compressor and expansion valve and the HyPAC system. Both are implemented in the air handling unit, while the HyPAC system precools either mixed air (fresh air + cabin air) or fresh air only and the VCRS system provides the rest of the cooling demand. The simulation results indicate, that the mixed air integration is beneficial for use cases with higher fuel cell load, such as the Madrid-Talavera track (Figure 4) because the higher available cooling power can compensate the small distance to the equilibrium point of the metal hydride. For use cases with part load operation, the fresh air integration is more beneficial as the difference between equilibrium temperature and ambient air is higher than the difference between cabin air (mixed air) and the equilibrium temperature of the metal hydride. However, the results only show the mixed air integration, as this architecture can operate even if no passengers and therefore no fresh air will be ventilated towards the cabin.

5 Results

The heating and cooling capacity comparison in Figure 10 indicates, that especially the use case Zaragoza-Canfranc cannot be assigned clearly to one standardized climatic zone. The heating demand based on weather data is clearly higher than the one for the Spanish climate Zone 1, while the cooling demand is definitely lower.

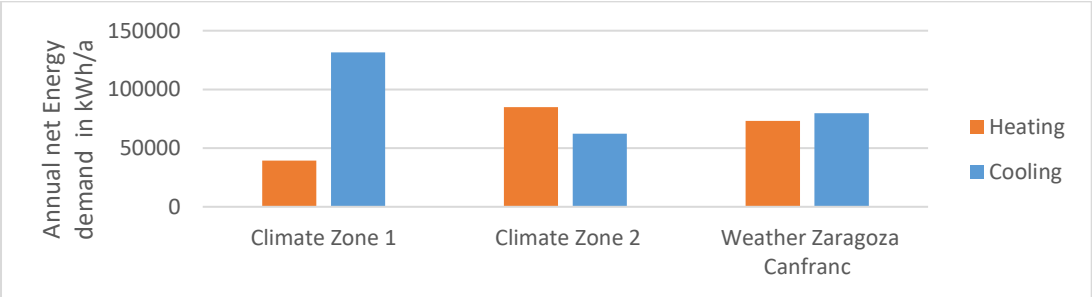


Figure 10: Cooling capacity and net annual heating demand according to EN 50591 and based on weather data

Therefore, the authors decided to evaluate both climate zones for the use-cases Zaragoza-Canfranc and Madrid-Talavera. Moreover, only in-operation use cases were considered (Test cases 5, 6 and 7), as the presented hybride power pack can operate under overhead line as well. Thus, it can be foreseen, that the fuel cell is not running in non-operation

situations, such as in stations. The annual energy savings are stated per standardized coach.

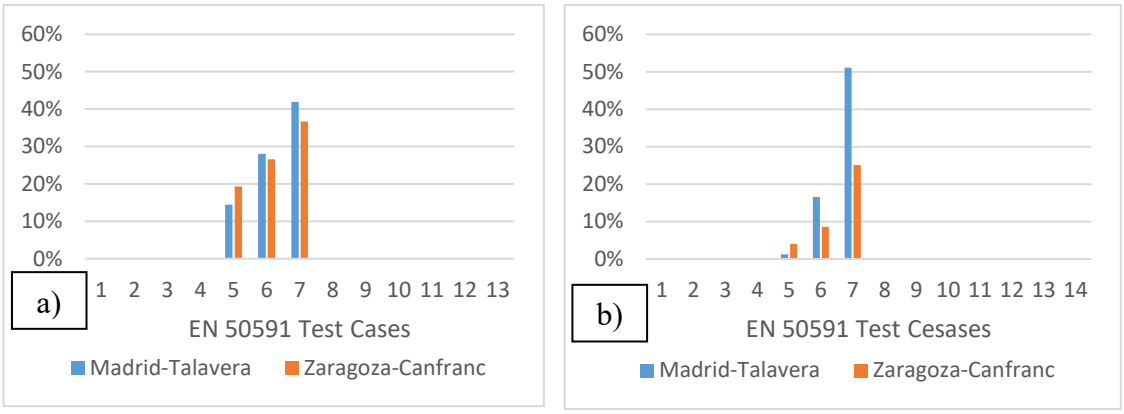


Figure 11: Energy reduction potential for absorption refrigeration cycle in climate zone 1 a) and climate zone 2 b) for in operation use cases

The absorption refrigeration cycle's energy reduction potential differs between the climate zones on the one hand. But, on the other hand a clear difference between the two use-cases is observable as well (Figure 11). The higher efficiency improvements up to 51 % can be explained with a higher cooling agent temperature and with a higher amount of usable waste heat due to the fuel cell load. The overall electrical energy savings for climate zone 1 are 6102 kWh/a in the Madrid-Talavera use-case and 5955 kWh/a in the Zaragoza Canfranc use-case. In climate zone 2 the authors observe electrical energy savings of 1275 kWh/a for Madrid-Talavera and 795 kWh/a for Zaragoza-Canfranc.

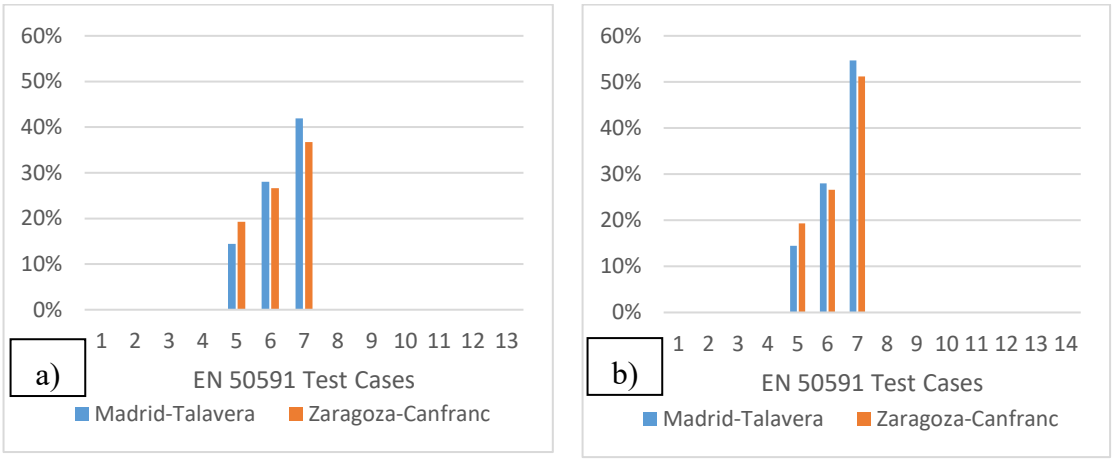


Figure 12: Energy reduction potential for the HyPAC in climate zone 1 a) and climate zone 2 b) for in operation use cases

In contrast to the absorption refrigerator results, the HyPAC improvements are not as sensitive to the fuel cell load. One reason might be, that the providable cooling power is not related to the cooling temperature of fuel cell system, but to the hydrogen mass flow. Even lower hydrogen mass flows in the use case Zaragoza-Canfranc seem to be sufficient to support the VCRS adequate. But also, the HyPAC system shows maximum 51 % improvement. Regarding the annual energy demand for climate zone one, the authors observed electrical energy savings of 7213 kWh/a for Madrid-Talavera and 13226 kWh/a for Zaragoza-Canfranc. The absolute energy savings in climate zone 2 are lower than in climate zone one. However, 1547 kWh/a for Madrid-Talavera and 1799 kWh/a for Zaragoza-Canfranc were observable.

6 Conclusion and Outlook

This first simulative approach provides potential efficiency improvements of the HVAC system for fuel cell powered train systems. In specific two realistic tracks were chosen and evaluated with standardized use cases. Both technologies don't need additional electrical energy, but waste energy instead. The energy efficiency improvements are more sensitive to the chosen use-case for the ABR. The HyPAC is not as use case sensitive.

However, the metal hydride material showed disadvantages for low ambient temperature, as the equilibrium temperature is 18.5 °C at the fuel cell pressure level for this material. Therefore, either other metal hydride materials or lower fuel cell pressure would show even better results at lower ambient temperatures. A substitution of the VCRS system cannot be foreseen, when fuel cell is not operating. To estimate realistic and concrete energy savings for the ABR, further investigations are necessary in follow-up to this first evaluation of the technical and economical applicability of the system. This means to assess the sensitivity of the calculated potential savings, for example, in the course of an error tolerance consideration. Also, the unbeneficial heat transfer coefficients of the water - lithium bromide solutions in the internal heat exchanger of the ABR have to be further investigated. In order to reduce assumptions and therefore increase the accuracy of the calculation, the development of a tool, which also accesses material data or tables by entering a *Matlab* function and determines the heat transfer coefficients from this, should be considered. Furthermore, it is possible to transfer or link the *Matlab* calculation to a Simulink model. This requires the exact design of all components within the system and the solution of the existing problem that for *Simulink* it is not possible to use lithium bromide or a solution of water and lithium bromide. Therefore, the solution circuit would

only be implementable as a mathematical model in *Simulink*, which represents considerable losses in terms of accuracy and level of detail.

Acknowledgment

This project has received funding from the *Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking* (now *Clean Hydrogen Partnership*) under Grant Agreement No 101006633. This Joint Undertaking receives support from the European Union's Horizon 2020 Research and Innovation program, Hydrogen Europe and Hydrogen Europe Research.

7 References

[1] FCH2RAIL Consortium, *Grant Agreement Number- 101006633 - FCH2Rail*.

[2] École polytechnique fédérale de Lausanne and Kongress, *Future buildings & districts sustainability from nano to urban scale: Proceedings*. Lausanne: Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), 2015.

[3] U. Deh, *Kfz-Klimaanlagen,* 3rd ed. (EBL-Schweitzer). Würzburg: Vogel, 2011. [Online]. Available: http://swb.eblib.com/patron/FullRecord.aspx?p=802228

[4] ASHRAE, *Guideline 1.3-2018 -- Building Operations and Maintenance Training for the HVAC&R Commissioning Process*, 2018.

[5] U. Adolph, "Cold air systems in the ICE-3. Practical performance; Kaltluftanlagen in Schienenfahrzeugbetrieb des ICE-3. Erfahrungen beim Betrieb,", *Die Kaelte-und Klimatechnik*, vol. 57, 2004.

[6] F. Bouyssou, *D5.1.- FCHPP Implementation and Integration in Demonstrator Train*, 2022. [Online]. Available: https://verkehrsforschung.dlr.de/public/documents/2023/FCH2RAIL_D5.1_FCHPP%20Implementation%20and%20Integration%20in%20Demonstrator_submitted.pdf

[7] Y. Sun, M. Anwar, N. M. S. Hassan, M. Spiryagin, and C. Cole, "A review of hydrogen technologies and engineering solutions for railway vehicle design and operations,", *Rail. Eng. Science*, vol. 29, no. 3, pp. 212–232, 2021, doi: 10.1007/s40534-021-00257-8.

[8] V. Sanz i López, R. Costa-Castelló, and C. Batlle, "Literature Review of Energy Management in Combined Heat and Power Systems Based on High-Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cells for Residential Comfort Applications,", *Energies*, vol. 15, no. 17, p. 6423, 2022, doi: 10.3390/en15176423.

[9] P. Kurzweil, *Brennstoffzellentechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016.

[10] H. Lohse-Busch *et al.,* "Automotive fuel cell stack and system efficiency and fuel consumption based on vehicle testing on a chassis dynamometer at minus 18 °C to positive 35 °C temperatures,", *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 1, pp. 861–872, 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.10.150.

[11] M. Kordel, F. Heckert, K. Knetsch, and L. Boeck, "Using Absorption Refrigerator and Metal Hydrides in Hydrogen Fuel Cell Trains: Draft Design Process and Feasibility," in *European Hydrogen Energy Conference 2022*, 2022. [Online]. Available: https://elib.dlr.de/186538/

[12] G. X. V. Zapata, "Highly integrated valve distribution arrangement for metal hydride cooling system,", Universität Stuttgart, 2021. [Online]. Available: https://elib.dlr.de/144203/

[13] C. Weckerle, "A metal hydride air-conditioning system for fuel cell vehicles," Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2021. [Online]. Available: https://elib.dlr.de/142101/

[14] F. Höper, *Primärenergetischer Vergleich von Verfahren der solar unterstützten Kühlung zur Gebäudeklimatisierung* (Zugl.: Dortmund, Univ., Diss., 1998) (Berichte aus der Thermodynamik). Aachen: Shaker, 1998.

[15] M. M. Heeland, *Untersuchung der Möglichkeiten der Abwärmenutzung zur Klimatisierung bei Triebzügen mit Brennstoffzelle: - Bachelorarbeit*, 2019.

[16] Sylvio Donner, Holger Dittus, and Inaki Elola, "Validation of a BEMU Thermal Car Body Model for the Shift2Rail Project FINE-2," in *3. International Railway Symposium Aachen*, W. Rik, Nils Nießen, and Nadine Friesen, Eds., 2021. [Online]. Available: https://elib.dlr.de/186158/

[17] Florian Kühlkamp *et al.,* "The FCH2RAIL Project: A Demonstration of a Modular Fuel Cell Hybrid Power Pack," in *TRA - Transport Research Arena*, 2022. [Online]. Available: https://elib.dlr.de/188691/

[18] I. H. Bell, J. Wronski, S. Quoilin, and V. Lemort, "Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp,", *Industrial & engineering chemistry research*, early access. doi: 10.1021/ie4033999.

[19] J. Pöhl, M. Kordel, F. Heckert, A. Wimmer, and I. Bürger, "Benefit studies of an innovative metal hydride air-conditioning system for FCEVs by using thermal management simulation," in *2021 ECS SIMU-LATION CONFER-ENCE*, 2021. [Online]. Available: https://elib.dlr.de/144222/

Session 14
Markus Kordel, Matthew Maikel Heeland, Kevin Knetsch

Authors

Kordel, Markus

German Aerospace Center (DLR), Institute for Vehicle Concepts, Research Associate.

Markus Kordel received his master's degree in energy engineering from RWTH University Aachen in 2019. Since January 2020 he is research associate and project lead for the subproject Air-Condition Auxiliary Power Unit (A/C-APU) at DLR Institute for Vehicle Concepts in Stuttgart.

His research focus is on hydrogen-based technologies, such as fuel cell electric vehicles and integration of metal hydride cooling systems into those

Heeland, Matthew Maikel

Faiveley Transport Leipzig GmbH & Co. KG, a company of the Wabtec Corporation, System Engineer HVAC

Matthew Maikel Heeland graduated with an M.Eng. degree in energy and environmental engineering from HTWK Leipzig in 2022. In his graduation theses, he focused especially on absorption refrigeration technology. Since September 2022, his area of responsibility has been interdisciplinary technical HVAC concept with a focus on refrigeration technology in the rail vehicle industry.

Knetsch, Kevin

Faiveley Transport Leipzig GmbH & Co. KG, a company of the Wabtec Corporation, System Engineer HVAC

Kevin Knetsch graduated in 2015 as M.Eng. from HTWK Leipzig and is working as system engineer in international railway HVAC solutions since 2019. His responsibility is the interdisciplinary technical HVAC concept with focus on the refrigeration system design, technical requirement management and testing.

He also brings four years of experiences as R&D engineer for air heat exchangers.

Session 14
Marcel Scharmach, Moritz Schenker, Holger Dittus

Comparison of simulative methods for dimensioning of fuel cell-battery hybrid powertrains in FCH2Rail and Virtual-FCS

Scharmach, Marcel[1], Schenker, Moritz[1] und Dittus, Holger[1]

[1]German Aerospace Center (DLR) - Institute of Vehicle Concepts, Pfaffenwaldring 38-40, Stuttgart 70569, Germany

Summary

The dimensioning process of fuel cell and batteries in hybrid railway applications is one of the biggest challenges in this kind of powertrain. In this paper, methods for modelling and designing fuel cell hybrid power trains are investigated and functionally compared. Subsequently, an exemplary dimensioning is carried out on the basis of a specific scenario. The tools in focus are, on the one hand, the Hybridization Tool and SEnSOR, both developed by the German Aerospace Center and used in the European project FCH2Rail and, on the other hand, the open source model developed by the European project Virtual-FCS. The approach and target of the tools is fundamentally different. Their features are compared in order to understand which impact different models can have on the design and evaluation process of fuel cell hybrid powertrains.

Keywords: Fuel cell hybrid power pack; FCH2Rail; Virtual-FCS; alternative powertrain dimensioning; railway; powertrain; series hybrid

Session 14
Marcel Scharmach, Moritz Schenker, Holger Dittus

1 Introduction

This paper focuses on the technical characteristics of railway powertrains for operation on partly or non-electrified tracks. One suitable and locally emission-free solution for these scenarios is a series hybrid system consisting of fuel cells and batteries, such as the Fuel Cell Hybrid Power Pack (FCHPP) developed in the FCH2Rail project [1] (*Figure 1*). A key issue in the design process of such hybrid systems is the dimensioning of the fuel cells and batteries in a way that the energy and power requirements are fulfilled and at the same time the costs, total mass and required space are kept to a minimum. Since there are few empirical values and standards established, the development and application of appropriate methods for component dimensioning and energy management are crucial subjects to ensure success of the technology.

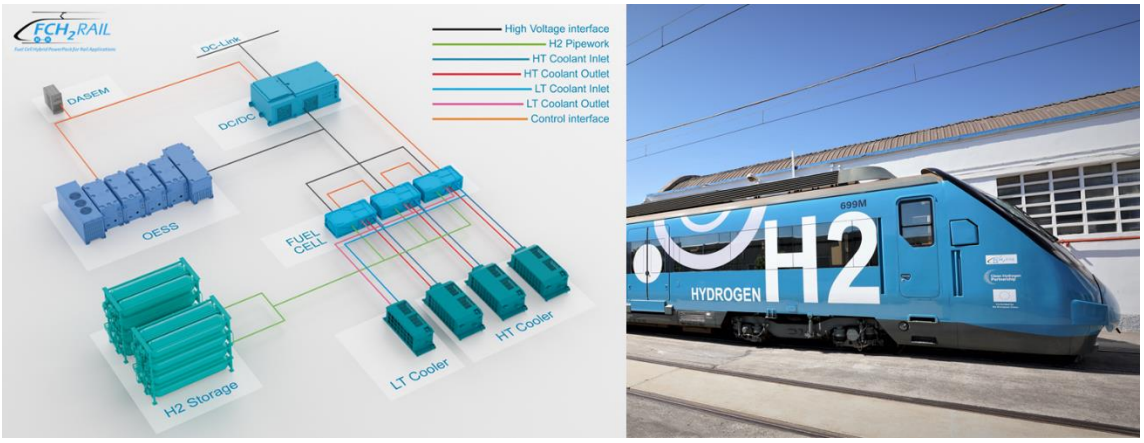


Figure 1: Fuel Cell Hybrid Power Pack (FCHPP) schematic and demonstrator train of FCH2Rail project. [2, 3]

2 Methodology of this study

The study aims to provide a comprehensive understanding of different modeling and design approaches for hybrid fuel cell powertrains. This shall lead to a more profound power pack design, which matches the requirements of individual application scenarios. In the first step, we introduce and describe three different simulation tools (see *Figure 2*). In the second step, we compare the differences in methodology, the characteristics of the models and the underlying assumptions and boundary conditions.

The first two tools, used in the FCH2Rail project [4, 5], are the **Hybridization Tool** and the **Smart Energy and Speed Optimizer Rail (SEnSOR)**, both developed by DLR. The third tool is the open source simulation library developed in the **Virtual-FCS** project [6].

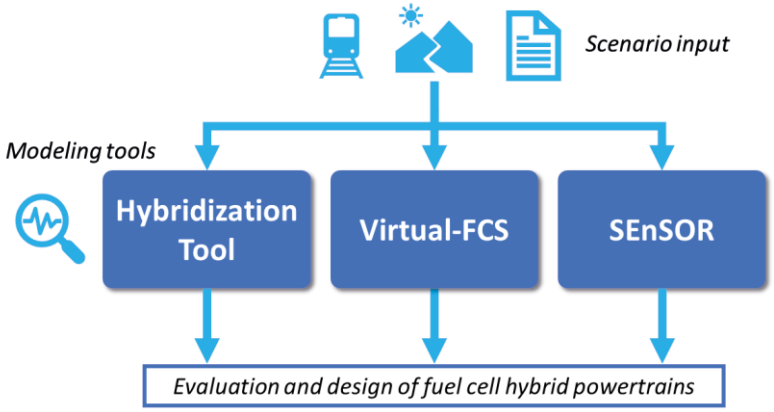


Figure 2: Modeling tools for powertrain design, analysis and component dimensioning.

Each tool offers a specific scope with varying benefits and disadvantages, e.g. in component sizing or estimation of hydrogen consumption. This is caused by difference in modelling approach, powertrain dimensioning and energy management strategy (EMS), as well as degree of model detail. This paper will provide a functional, qualitative assessment of all tools. As an outlook, we also provide first results for the Hybridization Tool as an indication on the component sizing. Future works will use these results as input for the other tools to provide a quantitative analysis.

3 Characterization of the Powertrain Tools

3.1 Hybridization Tool

The Hybridization Tool is part of a DLR in-house software tool box for simulation and optimization of energy systems in railway vehicles. Its main features and goals are:

- Data-driven system dimensioning (battery- and fuel cell component sizes)
- Rule-based EMS for fuel cell hybrid powertrains
- Estimation of hydrogen consumption based on realistic operation conditions and component characteristics

With a given power profile at the wheels, it is possible to evaluate the main components of a fuel cell hybrid system either by automatically determining the necessary component sizes or by estimating the hydrogen consumption with predefined sizes. For this purpose, a heuristic, rule-based EMS for the power split between the fuel cell and battery was developed. The modelling of power flows in the fuel cell hybrid system includes all electric components in the efficiency chain between the DC-link of the train and the battery and fuel cell, respectively. Additionally, the drivetrain components

(motor/generator and traction inverter) are included. The H2 storage is not explicitly modeled. The same applies to the fuel cell coolers, which are considered as auxiliary demand for the balance of plant (BoP).

3.2 Virtual-FCS

The primary objective of the Virtual-FCS library is to enhance the design process of hybrid fuel cell and battery systems by achieving the following key objectives [6]:

- *"Accurately predicting the lifetime, reliability, and performance of systems to effectively reduce costs.*
- *Facilitating improved hybridization and control strategies for various fuel cell applications.*
- *Enabling the integration of software-model-hardware in-the-loop design for hybrid systems.*
- *Demonstrating and validating the approach with the support and involvement of end users.*
- *Establishing the continuous development and widespread adoption of the tool"*

This research primarily focuses on the functionalities of hybridization, the control strategy pertaining to objective 2, and the energy output results, which act as inputs for objective 3.

The Virtual-FCS library offers three distinct drivetrain options: A battery electric drivetrain, a serial hybrid drivetrain, and a parallel hybrid drivetrain. Among these, the serial hybrid drivetrain has been validated, making it the most developed option. The structure of the serial hybrid is pictured in *Figure 3*.

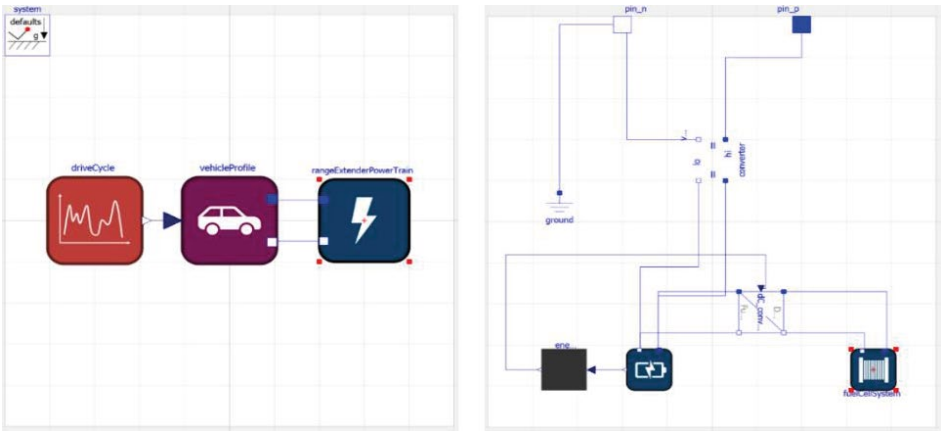


Figure 3: Range extender vehicle model: (left) Modelling assembly including the input of the powertrain; (right) serial hybrid consisting of battery system, fuel cell system, EMS and DC-link

Figure 3 shows the overall layout incorporated in the open source software environment Open Modelica. The Virtual-FCS tool requires a driving cycle with speed as a function of time as input. Initially designed for simulating passenger vehicles or heavy-duty vehicles, this setup can be adapted for use in any drivetrain application. The right side of *Figure 3* illustrates the sub model of the serial hybrid powertrain, consisting of the fuel cell system and a battery system, connected via an ideal working DC-DC converter to the battery system. An EMS sub model regulates the energy distribution between the fuel cell system and the battery system. A detailed explanation and comparison of the underlying EMS will be presented in chapter 4. Virtual-FCS entails comprehensive component modeling, including thermal models for the battery and fuel cell, as well as a detailed model of the fuel cell stack and the BoP.

3.3 Smart Energy and Speed Optimizer Rail (SEnSOR)

SEnSOR [7, 8] is a DLR in-house algorithm for numerical optimization of various aspects of railway operation. The two key targets are optimized EMS and speed profile. Here, SEnSOR is capable to optimize each of them individually or both simultaneously. It utilizes a gradient-based solver with non-linear direct method optimization. Given track, train and electric component characteristics, SEnSOR aims to provide a tailored solution for each individual scenario, i.e. adapting the speed profile to the specific train and power sources for minimum energy demand. Moreover, through reduced energy throughput and additional constraints, degradation accelerating behavior (wear and tear as well as component ageing) is also reduced. The three main use cases are (see also *Figure 4*):

1. **Speed profile optimization**: If the internal train characteristics are unknown, the pure speed profile can be optimized at the wheels, with regards to energy demand. The result (speed and power profile at the wheels) can be used for track analysis or fed into any EMS.
2. **EMS optimization**: Given a speed and power profile at the wheels or the DC-link, the EMS is optimized, i.e. the power split between different power sources and charge control of the batteries. The result is an energy management control and the consumption at the sources.
3. **Combined optimization**: Taking benefits of both features described above, this gives a holistic optimization of the operation, yielding the lowest energy consumption with coordinated EMS and speed control. This means that, within the given boundary conditions of the timetable etc., the speed can be adapted to optimal operational points of the fuel cell, for example.

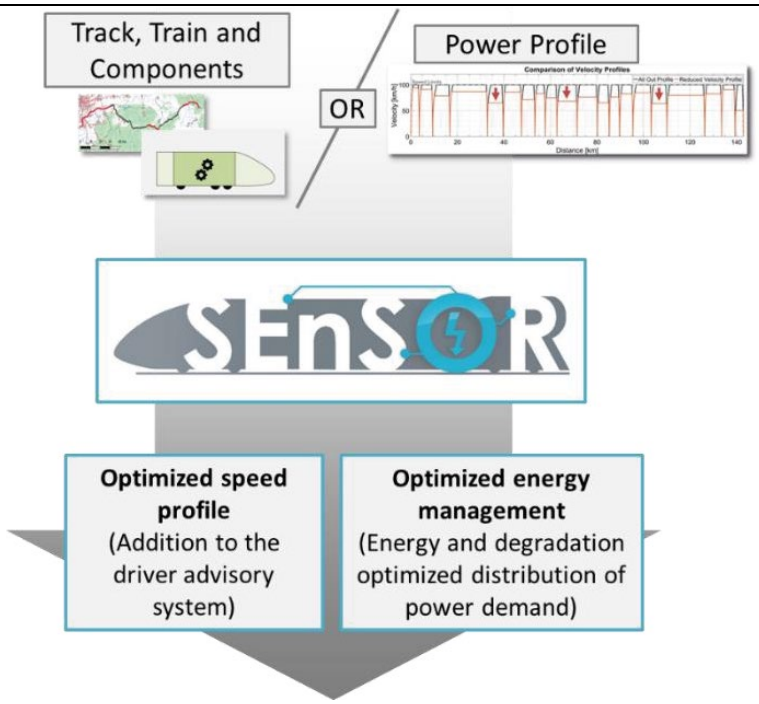


Figure 4: Smart Energy and Speed Optimizer Rail – general data flow with inputs and results.

With these features, SEnSOR can serve as a benchmark for EMS. In the current version of the tool, multiple powertrain architectures are implemented (battery electric multiple unit, fuel cell electric multiple unit, bi-modal fuel cell train). Other architectures can also be optimized, as the modular algorithm is easily adaptable to different powertrain architectures.

4 Functional Comparison

From the description above, it is evident that the tools differ in their main functionalities and implementation. **Virtual-FCS** serves mainly as an evaluation tool to estimate the system efficiency and hydrogen consumptions. Its focus is on road vehicles, but it can be adapted with an interface to utilize power profiles from other vehicles as well. The **Hybridization Tool** is specifically developed for dimensioning the powertrain architecture in railway applications. However, all power profiles and generic components characteristics are accepted as input. Thus, it is not restricted to railway scenarios. Similarly, **SEnSOR** focuses on various rail applications. When not using the speed optimization, it has an interface to read in power profiles for pure EMS optimization (case 2). Thus, it can be used for other vehicles as well. In general, the scope is to provide a benchmark of the EMS and hydrogen consumption of the hybrid powertrain. In the following subchapters, the most important distinctions between the tools are analyzed.

4.1 Energy Management Strategy (EMS)

The three modelling tools are capable of estimating the final energy demand in terms of the hydrogen consumption. However, the underlying EMS of the hybrid powertrain varies significantly. Both the Hybridization Tool and Virtual-FCS utilize a rather simple rule-based control EMS, which results in a deterministic approach to estimate the hydrogen demand.

Virtual-FCS offers a BoP and detailed thermal models, but a simplified two-point EMS. In this control strategy, the fuel cell power switches between a high and low power level, depending on the SoC of the battery, i.e. high power if the battery needs to be charged and vice versa to maintain the SoC within the desired range.

The **Hybridization Tool** goes one step further by utilizing power tracking and use case specific power levels of the fuel cell. When the battery does not need to be charged, the fuel cell follows any positive power demand on the DC-link. At the same time, the high-power level of the fuel cell is lowered to a more efficient operating point as long as charge-sustaining operation is still guaranteed (see *Figure 5*).

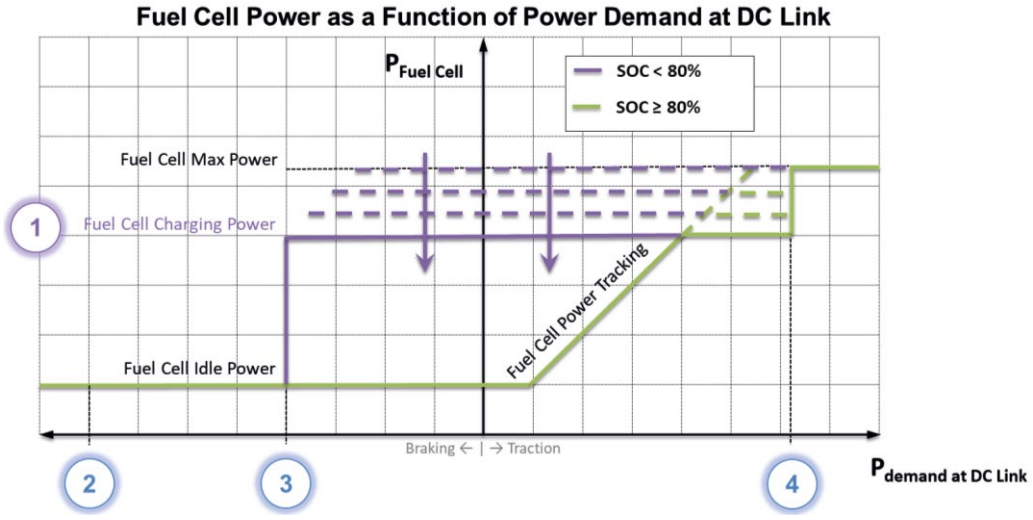


Figure 5: EMS of the Hybridization Tool – Hysteresis with two power levels and power tracking.

In order to enable energy savings in hybrid powertrains, optimization of the energy management is required. **SEnSOR** offers this functionality by providing an optimized power split in each operating point. While considering the efficiency characteristics in each operation point, SEnSOR also holistically considers the boundary conditions of the optimization problem, ensuring charge-sustaining operation and operability in each part of the track. To achieve this, the algorithm includes the following steps:

- Pre-Processing: Process data input, automatic generation of objective functions and constraints based on the given input, automatic calculation of derivative matrices
- Solving: interface to IPOPT [9]
- Post-Processing: analysis and visualization of results

Here, pre-processing is the most extensive and important step as it determines the capabilities and computational performance of the algorithm. A high grade of modularity, automatization and code efficiency enable SEnSOR to provide converging results of long tracks (>100 km) within the order of minutes. This process leads to a highly complex EMS, which is currently not real-time capable, but serves as a benchmark.

4.2 Dimensioning

A common goal of both projects, Virtual-FCS and FCH2Rail, is the design process of a hybrid fuel cell powertrain which suits the needs of a specifics use case considering the power demand, lifetime aspects and fuel consumption. The **Hybridization Tool**'s scope and main functionality is directly targeting this by estimating the battery energy content and maximum required fuel cell power. Given the power profile, three steps are followed (see *Figure 6*):

1. The algorithm automatically pre-sizes battery and fuel cell based on accumulated energy values of the power profile and then resizes the fuel cell. In this first dimensioning step, a simplified two-point EMS is used. The size of the fuel cell is then iteratively increased until a charge-sustaining operation of the battery is possible.
2. In the second step, a more advanced EMS (as described in the previous section, see *Figure 5*) is applied to reduce the jumps in fuel cell power. By iteratively lowering the upper limit of fuel cell power, the lowest point is determined which is necessary to fulfil the required boundary conditions of charge-sustaining operation. Taking the characteristic fuel cell efficiency curve into account, the operating points shift towards lower consumption, implicitly using more efficient fuel cell operating points.
3. Finally, the permissible currents at the battery are checked. If they exceed the specified limits, the battery is resized and step two is repeated. Therefore, the whole procedure follows an iterative approach until suitable fuel cell and battery sizes are determined.

Currently, the dimensioning is strictly energy demand-based and thus not optimized with regards to costs, mass or installation space.

Virtual-FCS aims to serve the same purpose. However, at the moment, the dimensioning process has to be done manually in an iterative trial-and-error approach. Automated wrappers could help to improve the dimensioning process in the future, but currently this is not possible. Similarly, **SEnSOR** does not explicitly target the dimensioning of the components. Nevertheless, utilizing the optimized EMS with reduced hydrogen consumption can serve a crucial role in the design process, as it provides an indication if the components are under- or oversized

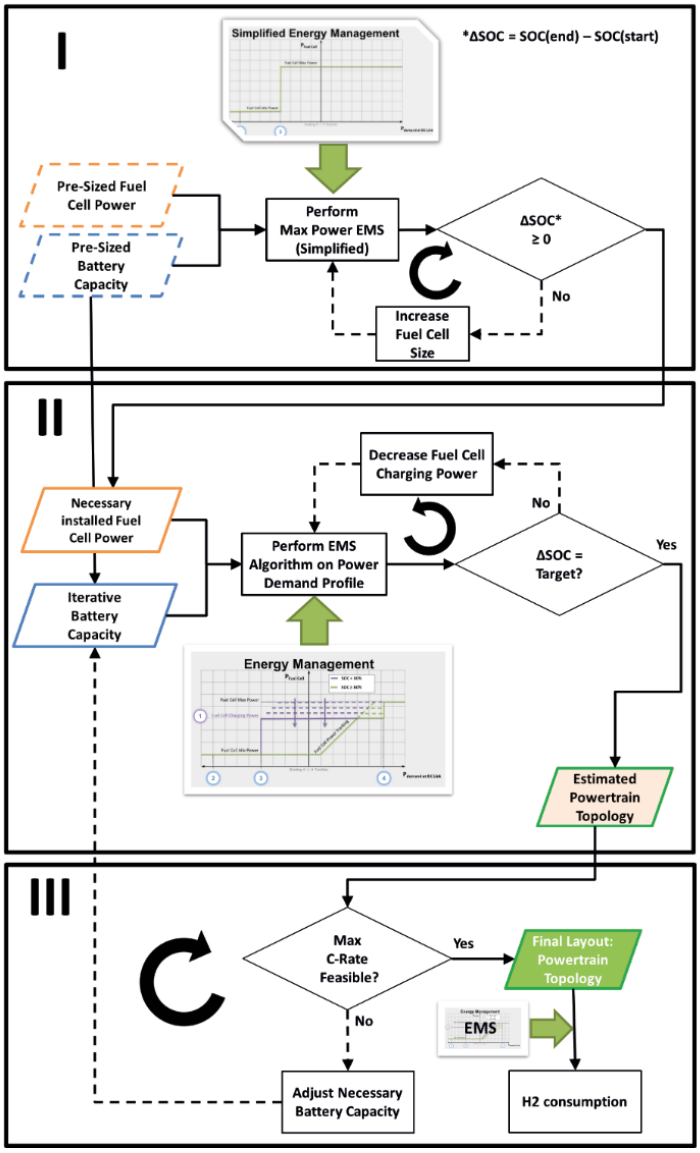


Figure 6: Hybridization Tool dimensioning process in three steps: (I) Determining the necessary fuel cell power, (II) determining the required battery energy content and (III) iteratively adapt above values with respect to system limitations.

4.3 Depth of Model Detail

With regards to model detail, both the **Hybridization Tool** and **SEnSOR** currently work with a mix of efficiency curves and maps in most components. The battery is represented by an internal resistance model in SEnSOR and the fuel cell model is based on polarization curves. Any BoP aspects are subsumed in the auxiliary demands with is assumed as constant or power dependent. **Virtual-FCS** applies varying degrees of model depth. While converters are idealized, fuel cell stack, battery characteristic and their thermal behavior are configured in detail. Given the required input data are available, a detailed thermal simulation of the battery as well as the fuel cell stack is conducted. Hereby, characteristics of hydrogen are based on ideal gas assumptions and BoP aspects are considered with dynamic loads of pumps, compressor.

4.4 Summary of functional comparison

All three models intend to provide powertrain component dimensioning capabilities and are based on a data-driven methodology. However, in the versions tested only the hybridization tool is providing an automatic dimensioning of the main power pack components. The details of the functional comparison can be seen in *Table 1*.

The DLR **Hybridization Tool** applied in FCH2Rail can be utilized for different powertrain alternatives, consisting of batteries and fuel cells. Based on realistic operations and drive train characteristics, the power pack component sizes are determined, taking into consideration the power demand and component limitations. With the deployed EMS, it is also possible to evaluate the hydrogen consumption, once the component sizes have been dimensioned.

The **Virtual-FCS** library is an open-source platform combining software and hardware parameters for designing and optimizing PEM fuel cells and battery hybrid power systems. [10] It is aiming to fit various transport and other mobile applications and further includes a detailed component modelling. The detailed modelling of the subsystems allows to simulate the thermal behavior of battery system, fuel cell stack and system and considers additional aspects besides energy and power requirements. This makes it an interesting tool to learn more about the physical behavior of the powertrain and the power pack components. Currently, an effortful, manual dimensioning process would be required, which has no established standard procedure yet. Furthermore, the level of detail of the battery model is high compared to the efficiency calculation of the fuel cell, which is currently based on a function which is fitting a stored efficiency curve. Announcements

of the Virtual-FCS project plan new software releases, which will consider the degradation of the fuel cell system. This functionality could be a great added value.

SEnSOR is centered on achieving an optimized individual power split between the battery and fuel cell components to reduce energy consumption and decrease component wear. This is accomplished through numerical optimization of the EMS. The resulting output provides a comprehensive analysis of battery and fuel cell operation, as well as valuable insights into motor operating points, which play a pivotal role in the powertrain's performance.

The current model boundaries of both SEnSOR and the Hybridization Tool involve simplifications of the battery, fuel cell, BoP and auxiliary components. Enhancing the level of detail within these aspects could potentially yield even more profound results and lead to accurate measures, which lower the energy consumption. It can be concluded that the scopes and the implementation of all three tools are very distinctive. The Hybridization Tool focuses on dimensioning with a simplified EMS. Virtual-FCS currently serves mainly to evaluate hydrogen consumption and thermal behavior. It is publicly available and strives to consider degradation effects, but currently does not provide automated dimensioning or advanced EMS. SEnSOR optimizes the latter in detail without directly targeting the powertrain dimensioning. It is specialized for railway applications and can also be applied to optimize the speed profile of a train.

Table 1: Functional Comparison

	Hybridization Tool	**Virtual-FCS**	**SEnSOR**
Language	MATLAB	Open Modelica	MATLAB
Licensing	Proprietary	Open source [11]	Proprietary
Scope	Railway application with series hybrid powertrain (fuel cell and battery, optionally bi-mode with catenary supply)	Various FC hybrid applications (focus road), battery drivetrains, fuel cell-battery hybrid drivetrain (serial and parallel (only fundamental layout available))	Railway applications with any kind of powertrain (tested: electric, battery electric, fuel cell-battery hybrid, bi-mode with catenary supply)
Energy management	Heuristic hysteresis with power tracking	Two-point control	Numerical optimization
Modelling approach	Functional programming: Reverse component models with power flow and iterative steps for dimensioning	Object-oriented equation based: Reverse modeling of road vehicle power cycles and generic powertrain components	Functional programming: Train in specified environment, including track description, timetable, train and component models.
Goal, specific features	• Component dimensioning • Energy consumption calculation	• Energy consumption calculation • System efficiency determination • Temperature tracking and cooling demand estimation	• Optimized energy consumption • Optimized speed profile
Input	• Dynamic time-spaced profiles (*P(t), v(t)*) • Component efficiency parameters (mixture of 2D and 1D characteristics)	Driving Profile: • Driving cycle (*v(t)*) • Driving resistances • Component size and efficiency characteristic (const.)	Three use cases: • Speed optimization: Track and train characteristics • EMS optimization: Component characteristics (1D/2D) • Isolated EMS optimization: Dynamic power and speed profile (*P(t), v(t)*)

Output	Files: mat, csv and fig/png • H_2 consumption • Component Sizes: Battery energy content and fuel cell max. power • Dynamic profiles: fuel cell and battery power, SoC • Analysis of operating points and power split	Files: png, svg, bmp and csv • Fuel consumption • Dynamic profiles: fuel cell and battery power, battery SoC • Temperature of battery and fuel cell system	Files: mat, txt, fig/png • Energy demand • Dynamic profiles: Power at each source, SoC, speed profile • Analysis of battery and fuel cell operation, motor operating points and power split
Boundary Conditions	• Charge-sustaining or depleting operation • Permissible C-rates, SoC window	• Battery: Initial SoC, nominal capacity, mass and size of the battery pack • Fuel cell: mass and size, limiting current	• Drivetrain architecture • Equation of motion with Davis resistance and gradients, force and acceleration constraints • Fuel cell power gradient limitations • Permissible C-rates, SoC window
Limitations	• Simplified models for battery, fuel cell, BoP and auxiliaries • no objective cost model yet	• Constant efficiency of drivetrain and regenerative braking • Efficiency of fuel cell based on a polynomial equation and a specific fuel cell	• Simplified models for battery, fuel cell, BoP and auxiliaries • Local optimization (globality not guaranteed) • Control results can be complex and not necessarily viable for a human driver

5 Exemplary Dimensioning of Power Pack

This chapter presents initial simulations carried out with the Hybridization Tool, aiming to establish the framework for future comparative analyses of energy management and hydrogen consumption of the three tools.

The exemplary use case for dimensioning with the Hybridization Tool is the roundtrip from A Coruña to Ferrol and back in a worst-case scenario with very high auxiliary power demand. This use case was defined in the FCH2Rail project [12]. The key characteristics of this service profile are given in the upper part of *Table 2*. It is a regional track without electrification, speeds below 105 km/h and a stop roughly every 5 km.

Table 2: Use case A Coruña – Ferrol – A Coruña: Service Profile characteristics, power demand at DC-link and dimensioning results for battery and fuel cell system.

Parameter	Value
Service Profile	
Length in km	137,4
Max. Speed in km/h	105
Avg. Speed in km/h	48,3
No. Stops	25
Roundtrip duration hh:mm	02:51
Power demand on DC-Link	
Max. / Min. power in kW	869,6 / -505,1
Avg. power in kW	249,3
Max avg. power for 2 / 5 / 10 min time windows	860,5 / 672,7 / 518,3
Total energy in kWh (and traction / braking)	709,4 (841,9 / -132,6)

The power profile is characterized maximum demands at the DC-link of approximately 870 kW, with maximum regenerative power of 505 kW. While the average power is 250 kW, but reaches 5 min stretches with up to 670 kW (see also lower part of *Table 2*). The upper diagram in *Figure 7* also illustrates the demand on the DC-link over time. From this information, the dimensioning of fuel cell and battery is not straightforward, but the Hybridization Tool provides feasible component sizes with viable results in terms of power demands and permissible operation of the components.

The final powertrain design and key performance indicators of this dimensioning by the Hybridization Tool are given in *Table 3*. The fuel cell is sized with a maximum power of 350 kW, while the battery should provide 267 kWh of installed energy.

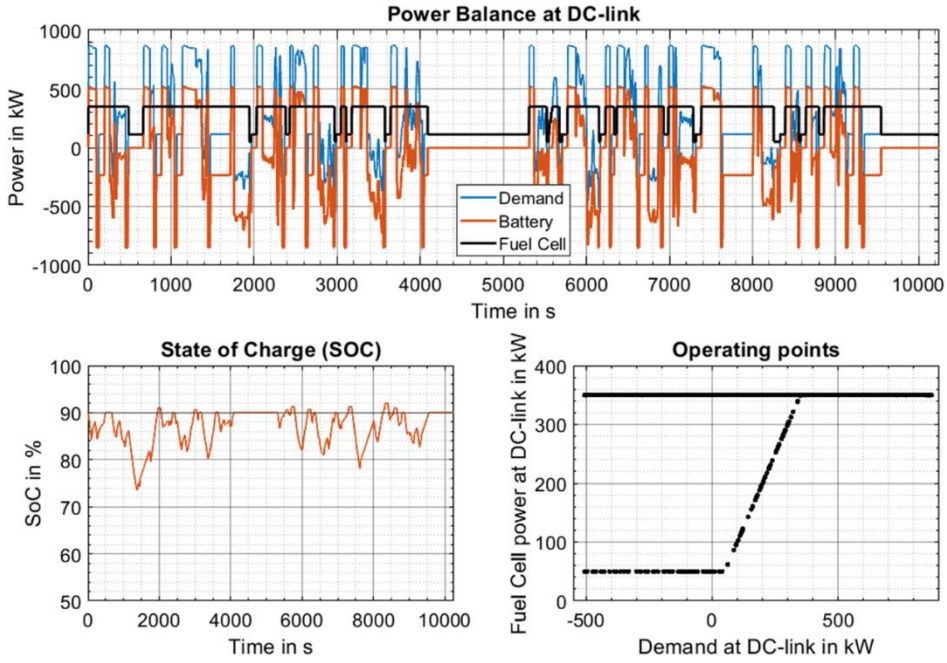


Figure 7: Use case A Coruña – Ferrol – A Coruña: (upper) power demand on DC-link versus time; (lower left) battery state of charge; (lower right) operating points of the fuel cell versus the demand at DC-link.

The behavior of the dimensioned powertrain after application of the Hybridization Tool EMS is presented in *Figure 7*. Besides the demand on the DC-link, the upper diagram includes the power distribution of fuel cell and battery, respectively. In the lower left diagram, the SoC characteristic with an initial charge of 90% and charge-sustaining operation is shown. Minimal deviations above 90% are due to recuperation in recharged state and permissible. In the lower right, the fuel cell behavior according to the EMS is illustrated. The EMS yields a majority of operating points in the high power level, but also utilizes power tracking and the lower level with higher fuel cell efficiency.

As shown in *Table 3*, this leads to a hydrogen consumption of 39 kg per 100 km and maximum C-rates of 3.2. Both, the C-rates and the SoC, stay within the constraint limits.

Table 3: Results of the Powertrain Design of the Hybridization Tool

Results of dimensioning	
Max fuel cell power in kW	350
Battery energy content in kWh	267
Max C-rate battery in 1/h	3,2
H2 consumption in kg/100 km	39,0

6 Conclusions and Outlook

The primary objective of this research was to explore the potential of different approaches by employing three distinct tools in designing a fuel cell hybrid power pack. The tools under analysis were the Hybridization Tool, Virtual-FCs, and SEnSOR, and a functional comparison was conducted.

Based on the analysis, it can be inferred that currently, only the Hybridization Tool has the capability to support automated component dimensioning for a fuel cell hybrid power pack. This ability was demonstrated during the roundtrip from A Coruña to Ferrol as part of the FCH2Rail project, resulting in power pack dimensions of 350 kW Fuel Cell power combined with 267 kWh of battery energy content. Furthermore, the tool Virtual FCS partly offers detailed physical modeling, including the fuel cell balance of plant, providing valuable insights into the system's behavior. On the other hand, SEnSOR surpasses both tools by offering intelligent, optimized energy management strategies. The dimensioning results of the Hybridization Tool will be used in future works to compare the simulation tools and to demonstrate the difference in energy management strategies as well as in analyzation of the hydrogen consumptions based on representative use cases.

As a further outlook, these findings will subsequently be compared with the parameters of existing and projected vehicles, as well as with the findings of the EU StasHH project [13], which focuses on standardizing fuel cell block sizes for diverse applications. [14]

Acknowledgements

The FCH2Rail project has received funding from the Clean Hydrogen Partnership under Grant Agreement No 101006633. This Joint Undertaking receives support from the European Union's Horizon 2020 Research and Innovation program, Hydrogen Europe and Hydrogen Europe Research.

Clean Hydrogen Partnership

Co-funded by the European Union

We would also like to thank the Virtual-FCS project for the development of the open source tool for fuel cell powertrain dimensioning and analysis.

Literature

References

[1] FCH2Rail, *Fuel Cell Hybrid PowerPack for Rail Applications: Grant agreement ID: 101006633.* Accessed: Apr. 11 2023. [Online]. Available: https://cordis.europa.eu/project/id/101006633

[2] FCH2Rail, *Testing the Fuel Cell PowerPack at CNH2.* Accessed: Mar. 11 2023. [Online]. Available: https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=mC7EGb9VA7w

[3] F. Kühlkamp *et al., The FCH2Rail Project: A Demonstration of a Modular Fuel Cell Hybrid Power Pack*. TRA - Transport Research Arena, 14. - 17. Nov. 2022, Lissabon. [Online]. Available: https://elib.dlr.de/188691/

[4] *FCH2Rail: Fuel Cell Hybrid PowerPack for Rail Applications.* [Online]. Available: https://www.fch2rail.eu/en/projects/fch2rail (accessed: Apr. 11 2023).

[5] H. Dittus *et al.,* "The EU Project FCH2RAIL: Fuel Cell Hybrid PowerPack for Rail Applications," in *World Congress on Railway Research 2022, Birmingham, UK.* Accessed: Mar. 11 2023. [Online]. Available: https://elib.dlr.de/186768/

[6] VIRTUAL-FCS, *Objectives.* Accessed: Apr. 11 2023. [Online]. Available: https://www.sintef.no/projectweb/virtual-fcs/objectives/

[7] F. Kühlkamp, M. Schenker, M. Konrad, and H. Dittus, "Applicability and development of a direct method algorithm for simultaneous optimization of trajectories and energy minimizing control for hybrid fuel cell railway vehicles," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit.*, vol. 237, no. 5, pp. 621–630, 2023, doi: 10.1177/09544097221128765.

[8] M. Schenker, T. Schirmer, and H. Dittus, "Application and improvement of a direct method optimization approach for battery electric railway vehicle operation," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit.*, vol. 235, no. 7, pp. 854–865, 2021, doi: 10.1177/0954409720970002.

[9] A. Wächter and L. T. Biegler, "On the implementation of an interior-point filter line-search algorithm for large-scale nonlinear programming," *Math. Program.*, vol. 106, no. 1, pp. 25–57, 2006, doi: 10.1007/s10107-004-0559-y.

[10] A. Pinard *et al., VirtualFCS: Modelica library for hybrid hydrogen fuel cell and battery power systems*: VirtualFCS, 2023. [Online]. Available: https://github.com/Virtual-FCS/VirtualFCS#virtualfcs-library

[11] Yash Raka, Simon Clark, Mike Gerhardt, kvid, Dietmar Winkler, and benjamsy, *Virtual-FCS/VirtualFCS: v2.0.0*: Zenodo. Accessed: Jun. 25 2023. [Online]. Available: https://doi.org/10.5281/zenodo.7552220

[12] S. Herwartz-Polster and F. Kühlkamp, *Trajectories and driving profiles for hybrid h2 multiple units*: Zenodo. Accessed: Jun. 25 2023. [Online]. Available: https://doi.org/10.5281/zenodo.6359030

[13] StasHH, *Standard-Sized Heavy-duty Hydrogen: Grant agreement ID: 101005934.* Accessed: Apr. 11 2023. [Online]. Available: https://cordis.europa.eu/project/id/101005934/de

[14] R. Bouwman and F. Zenith, *D3.2: Standard Sized definition: Heavy-duty Hydrogen*. STASHH. [Online]. Available: https://www.stashh.eu/sites/default/files/

StasHH%20standard%20%28part%201%29%20-%20Size%20definition.pdf (accessed: Apr. 11 2023).

Authors

Scharmach, Marcel

Marcel Scharmach, M.Sc. is a scientific employee doing research in alternative propulsion system for train application at the German Aerospace Center since 2022. He previously studied mechanical engineering and specialized on energy efficient usage, receiving his Master of Science degree at the University of Stuttgart.

Schenker, Moritz

Moritz Schenker, M.Sc., Study of physical engineering at Technische Universität Berlin, finished in 2019 and joined the Institute of Vehicle Concepts at German Aerospace Center (DLR) in Stuttgart in the same year. There, research associate, currently working on the topics modelling and optimizing the energy management of railway vehicles, in particular with alternative, sustainable powertrain solutions.

Dittus, Holger

Holger Dittus is a researcher and project coordinator at the Institute of Vehicle Concepts at German Aerospace Center (DLR). His scientific scope is in energy management for railway vehicles with alternative traction systems such as hybrid, battery electric and fuel cell vehicles. He received a degree in Mechanical Engineering (Dipl.-Ing) from RWTH Aachen in 2006 and joined DLR the same year, with participation in EU Shift2Rail projects and standardization group (EN 50591:2018). He is project coordinator of the EU Horizon 2020 Project FCH2Rail and project manager of the DLR Project Propulsion & Coupling (ProCo) since 2021 and 2022 respectively.

IRSA 2023

SESSION 15

INSTANDHALTUNG VON INFRASTRUKTUR

MAINTENANCE OF INFRASTRUCTURE

Session 15
Lea Elfert, Hakan Aktaş, Steffen Höhn, Markus von Bohr, Kunibert Lennerts

Bewertung des Infrastrukturzustandes von Bahnhöfen – Entwicklung einer Kennzahl

Elfert, Lea[1], Aktaş, Hakan[2], Höhn, Steffen[2], von Bohr, Markus[2], Lennerts, Kunibert[1]

[1]Institut für Technologie und Management im Baubetrieb, Karlsruher Institut für Technologie
[2]DB Station&Service AG

Zusammenfassung

Bahnhofsinfrastrukturunternehmen benötigen Informationen über den Zustand der Anlagen, um Instandhaltungsbedarfe identifizieren zu können. Der Zustand kann mittels Kennzahlen abgebildet werden. Aufbauend auf der Arbeit von Bluhm et al. (2021) zur Eisenbahninfrastrukturqualität wird eine Kennzahl entwickelt, die den Zustand der Bahnhofsinfrastruktur wiedergibt.

Keywords: Eisenbahninfrastruktur; Bahnhofsinfrastruktur; Zustand; Qualität; Kennzahl

1 Einleitung

Die Eisenbahninfrastruktur ist „in einem qualitativ hochwertigen Zustand zu erhalten bzw. zu verbessern“ [1]. Die Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU) sind dazu gemäß Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung III (LuFV III) aufgefordert. Dafür ist es notwendig, den aktuellen Zustand der Schienenwege vollständig und transparent zu bewerten. Der Bundesrechnungshof weist zudem darauf hin, dass der Bund als Eigentümer der Schienenwege „mittels transparenter Indikatoren“ den Zustand dokumentieren muss [2]. Im vorliegenden Beitrag wird eine Methodik vorgestellt, die die Ermittlung eines Key Performance Indicators (KPI) für den Zustand der Bahnhofsinfrastruktur ermöglicht. Als KPI wird dabei nach DIN 15341 eine „als

bedeutend betrachtete Leistungskennzahl“ bezeichnet [3]. In der Literatur werden hierfür die Begriffe KPI und Kennzahl verwendet (u. a. bei [4–7]), weshalb die beiden Begriffe im vorliegenden Beitrag synonym verwendet werden.

2 Bewertung des Infrastrukturzustands

Insgesamt gewinnen KPIs in der strategischen Infrastrukturplanung an Bedeutung [4] und es gibt bereits normative Vorgaben für Kennzahlen in diesem Bereich. So beschreibt DIN 15341 wesentliche Leistungskennzahlen für die Instandhaltung, u. a. für Infrastruktur und Transportsysteme [3]. Dabei beziehen sich die vorgeschlagenen Kennzahlen auf die Beurteilung der Managementaufgabe und nicht die der Anlage. Gleiches gilt für DIN EN 15221 im Bereich des Facility Managements. Für andere Infrastrukturbetreiber wie der Straße finden sich Quellen zur Entwicklung und Anwendung von Kennzahlen z. B. bei [8] und [9] sowie im Gebiet des Facility Managements z. B. bei [5]. Für den Bereich der Eisenbahninfrastruktur finden sich in der Literatur Berichte zum Anlagenzustand, die jedoch nicht im Detail auf die zugehörige Erhebungsmethodik eingehen. Es konnte die Arbeit von Bluhm et al. (2021) identifiziert werden, welche detailliert beschreibt, wie eine Kennzahl aus Sicht eines Infrastrukturbetreibers entwickelt werden kann. Es wurde ein modularer und allgemeingültiger Ansatz vorgestellt, der für andere Infrastruktursysteme modifiziert werden kann [10]. Diese Arbeit dient daher als Grundlage für den vorliegenden Beitrag.

Zur Beschreibung des Zustandes der Eisenbahninfrastruktur finden sog. Qualitätskennzahlen Anwendung. Derzeit werden für die Bahnhofsinfrastruktur der Deutschen Bahn (DB) drei Kennzahlen erhoben: Die sog. Qualitätskennzahl „Bewertung AnlagenQualität“ (Qkz BAQ) beschreibt den Zustand der wesentlichen baulichen und technischen Anlagen. Dazu wird eine Sichtprüfung durchgeführt und die Ergebnisse anhand definierter Schadensbilder in eine Bewertungssystematik überführt. Relevant dafür sind die aufgetretene Schadensqualität und -quantität. Im Ergebnis erhält jede Anlage eine technische Zustandsnote zwischen 1,0 und 6,0, die auf Bahnhofsebene und bundesweit zur Qualitätskennzahl „Bewertung AnlagenQualität“ aggregiert wird. Die Qualitätskennzahl „Funktionalität Bahnsteige und weitreichende Barrierefreiheit“ (Qkz FB-B) erfasst den Ausstattungsgrad von Stationen hinsichtlich verschiedener Kriterien wie beispielsweise Wetterschutz, Reisendeninformation und Barrierefreiheit. Für die Kriterien werden einzelne Punkte vergeben, z. B. für die Herstellung der Barrierefreiheit durch taktile Leitsysteme und Stufenfreiheit. Zusätzlich erfolgt mithilfe der Kennzahl „Substanzwert“ eine monetäre Bewertung der Infrastruktur. Dabei werden der

Wiederbeschaffungswert, die durchschnittliche technische Nutzungsdauer und das Alter der Anlagen berücksichtigt. Die Kennzahlen werden im Rahmen des jährlich erscheinenden Infrastrukturzustands- und -entwicklungsberichts (IZB) veröffentlicht.

Die Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB) bewerten das Netz in den Kategorien „Zustand und Substanz“, „Funktionalität“ sowie „Sicherheit und Qualität“. Innerhalb jeder Kategorie finden sich einzelne Kennzahlen wie beispielsweise Langsamfahrstellen oder Restlebensdauer. Die Teilnoten der Kategorien werden zu einer Gesamtnote aggregiert. Dabei werden die Anlagen nach dem Wiederbeschaffungswert gewichtet, um die technische und monetäre Heterogenität der Anlagen auszugleichen. [11]

Die Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) beschreiben den Zustand ebenfalls mithilfe einer Gesamtnote, der sogenannten Substanznote. Hier wird der Zustand anhand der möglichen Restnutzungsdauer und definierter Verschlechterungsfunktionen geschätzt. Der Zustand wird wie bei den ÖBB und Bluhm et al. (2021) auf Basis von Anlagen über den Zustand ganzer Anlagengruppen zu einer Gesamtnote aggregiert. Die Gewichtung der Anlagengruppen erfolgt über den kumulierten Wiederbeschaffungswert. [10]

3 Methodik zur Entwicklung einer Zustandsnote Bahnhöfe

Bei der Wahl von Kennzahlen ist insbesondere die Perspektive auf den Bewertungsgegenstand relevant [8]. Der vorliegende Beitrag ist aus Sicht eines Infrastrukturbetreibers verfasst. Weitere hier relevante wesentliche Stakeholder sind der Staat als Eigentümer der Schienenwege sowie die Eisenbahnverkehrsunternehmen und die Reisenden als Nutzer der Infrastruktur.

Aus der Sicht eines Infrastrukturbetreibers haben Bluhm et al. (2021) eine Methode zur Bestimmung des Eisenbahninfrastrukturzustands entwickelt und vorgestellt [10]. Auf Basis dieser Methode und der bestehenden Kennzahl „Bewertung AnlagenQualität“ wird eine neue Kennzahl für den Zustand der Bahnhofsinfrastruktur entwickelt. Unterschiede in den betrachteten Anlagenklassen erfordern eine Anpassung der Methode von Bluhm et al. (2021). Zudem weisen Bluhm et al. (2021) darauf hin, dass der allgemeingültige Ansatz hinsichtlich der Gewichtungsfaktoren und der einzubeziehenden Teilnoten für den jeweiligen Anwendungsfall zu modifizieren ist [10].

In einem ersten Schritt werden daher Anforderungen und Ziele definiert. Es werden die von Bluhm et al. (2021) vorgeschlagenen Handlungsfelder *Alter (Lebenszyklus)* und *Verfügbarkeit* hinsichtlich der Eignung für die Zielstellung geprüft. Anschließend wird der hierarchische Ansatz nach [10] untersucht und für die Bahnhofsinfrastruktur

modifiziert. Dies umfasst die Aggregationslogik von der untersten Anlagenebene bis zur Gesamtnote der Bahnhofsinfrastruktur sowie die Gewichtungsmethodik. Abschließend wird die allgemeine Aussagekraft der gewählten Notensystematik geprüft und eingeordnet. Zusammenfassend wird an einem Beispiel die Berechnung der Note gezeigt.

3.1 Zielsetzung einer Zustandsnote Bahnhöfe

Mit dem Einsatz von KPIs können verschiedene Ziele verfolgt werden. Neben dem Benchmarking und Vergleich unterschiedlicher Anlagen kann die Kennzahl der Entscheidungsfindung in der Auswahl von Instandhaltungsmaßnahmen dienen [5]. Die Maßnahmenwahl soll mithilfe der Kennzahl nachvollziehbar gemacht werden [12]. Bezogen auf die Bahnhofsinfrastruktur soll sie Transparenz über den Zustand der Bahnhöfe schaffen und diesen vergleichbar machen. Entscheidungen der Planung und Steuerung der Kernprozesse des Unternehmens, dem Bau und Betrieb der Bahnhöfe, sollen unterstützt werden. Aufgrund der Trennung zwischen Eigentümer und Betreiber der Schienenwege soll die Kennzahl auch als Größe der Outputsteuerung genutzt werden können. Zusammenfassend hat die Zustandsnote Bahnhöfe somit zum Ziel,

- den Zustand der Bahnhöfe realitätsnah zu bewerten,
- die Steuerung der Kernprozesse des Unternehmens zu ermöglichen und
- gegenüber dem Eigentümer den sinnvollen Mitteleinsatz nachzuweisen.

3.2 Anforderungen an eine Zustandsnote Bahnhöfe

Werden die Ziele operationalisiert, so ergeben sich verschiedene Anforderungen an die Kennzahl und ihre Entwicklung. Um eine realitätsnahe Bewertung abbilden zu können, muss der KPI repräsentativ und aussagekräftig sein. Das bedeutet, dass mit ihm die Darstellung des gesamten Systems auch auf Basis einer Teilmenge möglich ist und dass er eine sinnvolle Aussage ermöglicht [9]. Um als Entscheidungsgröße und damit zur Steuerung nutzbar zu sein, muss der KPI nach [9] daneben ebenso zielorientiert, wirtschaftlich und reversibel sein. Dies bedeutet, dass er einem Ziel dient, dass er mit vertretbarem Aufwand erhebbar ist und auch umgekehrte Verhältnisse ausweisen kann [9]. Zudem besteht die Anforderung, dass er auf verschiedenen Ebenen ausgegeben werden kann. So weisen Lavy et al. darauf hin, dass Kennzahlen so zu gestalten sind, dass sie sowohl ganzheitlich als auch zur Bewertung einzelner Teilbereiche genutzt werden können [5]. Um den sinnvollen Mitteleinsatz gegenüber dem Eigentümer nachweisen zu können, muss die Kennzahl darüber hinaus einen Ursache-Wirkungs-Zusammenhang

(UWZ) zwischen finanziellen Mitteln und Infrastrukturqualität aufweisen [13] wie z. B. in [14] und [15] dargestellt.

3.3 Bewertungsumfang

Zwei wesentliche Anforderungen an die Kennzahl sind, dass sie repräsentativ und aussagekräftig ist. Daraus lässt sich ableiten, dass möglichst alle relevanten Gewerke in den Betrachtungsumfang einzubeziehen sind. Die Relevanz ergibt sich hier aus dem Wiederbeschaffungswert, der Bedeutung für das Eisenbahnsystem und dem Instandhaltungs- und Erneuerungsaufwand. Insgesamt sind aufgrund dieser Kriterien 22 Anlagenklassen identifiziert worden, welche in Abbildung 1 dargestellt sind. Die ermittelten Anlagenklassen der Bahnhofsinfrastruktur lassen sich in drei Gruppen unterteilen: bauliche Anlagen, technische Anlagen und Anlagen der Informations- und Kommunikationstechnik (ITK). Die Anlagen des Empfangsgebäudes (EG) umfassen dabei bauliche und technische Anlagen.

Anlagenklasse	Gruppe
Bahnsteigdächer	baulich
Bahnsteige	baulich
Bahnsteighallen	baulich
Einhausungen	baulich
Personenüberführungen (PÜ)	baulich
Personenunterführungen (PU)	baulich
Post- und Gepäcktunnel	baulich
Rampen	baulich
Treppen	baulich
unterird. Personenverkehrsanlagen (uPVA)	baulich
Wetterschutzhäuser	baulich
Windschutzsysteme	baulich

Anlagenklasse	Gruppe
Beschallungsanlagen (ELA)	ITK
Dynamische Schriftanzeiger (DSA)	ITK
Fahrgastinformationsanlagen (FIA)	ITK
FIA-Infotafeln	ITK
Uhrenendgeräte	ITK
Video- und Kamerasysteme	ITK
Beleuchtungsmaste	technisch
Fahrtreppen	technisch
Personenaufzüge	technisch
Empfangsgebäude*	EG

*umfasst mehrere Anlagenklassen

Abbildung 1: In der Zustandsnote Bahnhöfe berücksichtigte Anlagenklassen[1]

3.4 Teilnoten

Für eine realitätsnahe Beschreibung der Infrastruktur sind die für eine Zustandsbeschreibung relevanten Kriterien einzubeziehen. Diese können in Form von Teilnoten erhoben und als solche ausgewiesen werden. Für die Bahnhofsinfrastruktur wird der Zustand derzeit im Rahmen der baulich-technischen Anlagenqualität erfasst. Diese Teilnote wird zur besseren Unterscheidung von der Gesamtzustandsnote als Teilnote *Qualität* bezeichnet. Anhand definierter Schadensbilder wird die Qualität der

[1] Eigene Darstellung.

baulichen und technischen Anlagen bei einer Sichtprüfung beurteilt. Bei Ingenieurbauwerken wird die Qualität anhand der Ergebnisse der Inspektionsberichte bewertet. Bei ITK-Anlagen wird die Qualität auf Basis der Ergebnisse der Wartung und Inspektion beurteilt. Die Abnutzung von Komponenten und der Instandhaltungsbedarf werden hier deutlich.

Die Kriterien *Alter* und *Verfügbarkeit* werden von Bluhm et al. (2021) als weitere relevante Kriterien eingestuft und finden sich auch bei den ÖBB und SBB wieder [10]. Im Folgenden wird bewertet, ob eine Ergänzung um diese Kriterien für die Bahnhofsinfrastruktur zielführend ist, bevor eine mögliche Implementierung beider Kriterien diskutiert wird.

Das zweite Kriterium *Alter* gibt an, an welcher Stelle im Lebenszyklus sich eine Anlage befindet. Die Teilnote kann herangezogen werden, um Ersatzinvestitionsbedarfe und den technischen Vorrat bewerten zu können. Ebenfalls kann über dieses Kriterium der technologische Wandel transparent gemacht werden. So haben beispielsweise ITK und technische Anlagen je nach Anlagenklasse Nutzungsdauern von sieben bis 15 Jahren. Nach Ablauf dieser können die Anlagen zwar noch funktionsfähig sein, entsprechen aber nicht mehr dem Stand der Technik (z. B. Fallblattanzeiger) und sollten daher durch den technologischen Nachfolger ersetzt werden. Darüber hinaus kann mithilfe des Kriteriums der Zustand über die voraussichtliche Verfügbarkeit von Ersatzteilen abgebildet werden [7]. Mit zunehmendem Alter der Anlagen sinkt die Ersatzteilverfügbarkeit [16]. Wenn Komponenten während der Nutzungsdauer nicht mehr zur Verfügung stehen, wird von Obsoleszenz gesprochen [6]. In der Konsequenz wird statt der Instandsetzung von Komponenten der Austausch der gesamten Anlage erforderlich. Auch dieser Umstand wird durch die Teilnote *Alter* deutlich. Sie deckt folglich über die *Qualität* hinaus relevante Sachverhalte ab, die einen Austauschbedarf anzeigen sollen.

Das dritte Kriterium umfasst den Aspekt der *Verfügbarkeit*. Insbesondere für technische und ITK-Anlagen kann die Verfügbarkeit als signifikante Größe angesehen werden. Ergebnisse aus der Erhebung der bestehenden Kennzahlen zeigen, dass Anlagen eine gute Zustands- resp. Qualitätsbewertung erhalten können, obwohl die Anlagen nicht verfügbar sind. Um auch die Funktionsfähigkeit einer Anlage abzubilden, kann die *Verfügbarkeit* als Messgröße ergänzt werden. Technische und ITK-Anlagen sind im Vergleich zu baulichen Anlagen besonders störanfällig (bspw. Treppe im Vergleich zur Fahrtreppe). Die Teilnote *Verfügbarkeit* ergänzt folglich insbesondere bei technischen und ITK-Anlagen die *Qualität* um ein relevantes Kriterium.

Die Analyse der Kriterien *Verfügbarkeit* und *Alter* zeigt, dass deren Integration in eine Zustandsnote Bahnhöfe sinnvoll erscheint. Der Anlagenzustand kann so aussagekräftiger abgebildet werden. Daher werden die Teilnoten in die Ermittlungsmethodik aufgenommen:

Zur Berechnung der Teilnote *Alter* wird der Quotient aus Alter und technischer Nutzungsdauer gebildet. Die technische Nutzungsdauer beschreibt dabei „den durchschnittlichen Zeitraum, in dem Anlagen einer Bauart technisch in der Lage sind, ihren Verwendungszweck zu erfüllen“ [17]. Die Nutzungsdauern sind zuvor für jeden Anlagentyp auf Basis von Fachliteratur, Systemauswertungen und Experteneinschätzungen hergeleitet worden [17]. Das Alter einer Anlage entspricht der Differenz zwischen dem aktuellen Kalenderjahr und dem Baujahr der Anlage. Ein Quotient von 0,3 sagt demnach aus, dass die Anlage 30 Prozent ihrer technischen Nutzungsdauer erreicht hat. Dieses Verhältnis wird im nächsten Schritt mithilfe einer Umrechnungstabelle in eine Note zwischen 1,00 und 6,00 übersetzt. Beispielsweise erhält eine Anlage, die 30 Prozent ihrer Nutzungsdauer erreicht hat, die Teilnote 2,50.

Im Rahmen der Zustandsnote wird eine Anlage als verfügbar definiert, wenn die anlagenspezifischen funktionalen Anforderungen erfüllt sind. Die *Verfügbarkeit* entspricht dem Verhältnis des Zeitraums, in dem die Funktionalität der Anlage gegeben ist, zum Betrachtungszeitraum, der je Anlagenklasse definiert werden kann. Bei baulichen Anlagen wird die Barrierefreiheit mitberücksichtigt. Es ergibt sich für die Teilnote *Verfügbarkeit* eine Quote, der eine Note zwischen 1,00 und 6,00 zugewiesen wird. Zur Ermittlung der Teilnote werden Systemauswertungen herangezogen.

3.5 Aggregationsstufen und Gewichtung

Von Bluhm et al. (2021) wird vorgeschlagen, dass die Noten der unterschiedlichen Ebenen auf den Noten der jeweils darunter liegenden Ebenen basieren [10]. Dies wird als hierarchischer Ansatz bezeichnet. Ausgehend von der Anlagenebene werden die Teilnoten über Anlagen- und Stationsnoten zu einer Gesamtnote aggregiert. Dies erfordert eine Aggregationslogik mit Gewichtungskriterien, um die Heterogenität des Anlagenportfolios auszugleichen und bei der Konsolidierung zu einer Gesamtnote eine realitätsnahe Bewertung des Portfolios zu erhalten. Für die Wahl des Gewichtungskriteriums bei der Aggregation der Noten stehen unterschiedliche Möglichkeiten zur Verfügung. Die Gewichtung und damit die Wahl des Gewichtungskriteriums wirken sich maßgeblich auf die ermittelten Noten aus [10].

Wie in Abbildung 2 dargestellt, bilden die drei Teilnoten je Anlage die unterste Ebene. Hier erhält jede Anlage der in Kapitel 3.3 genannten Anlagenklassen eine Teilnote für *Alter*, *Qualität* und *Verfügbarkeit*. In der ersten Gewichtungsebene (G1) werden die drei Teilnoten gewichtet und zu einer Anlagennote zusammengefasst.

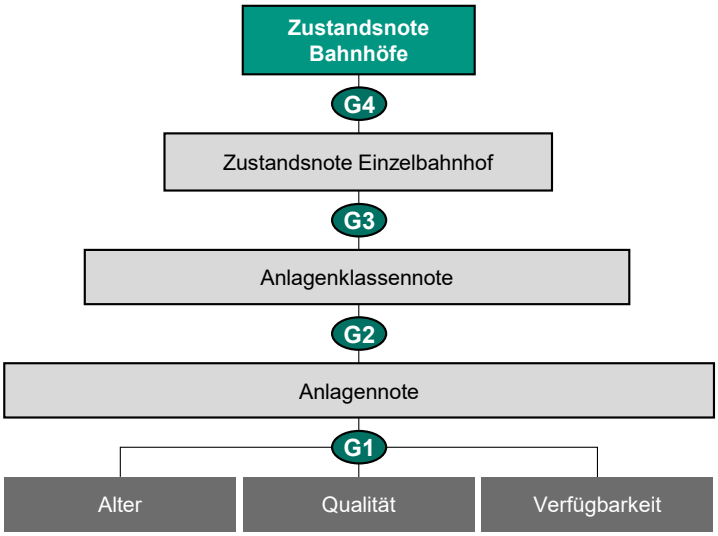


Abbildung 2: Gewichtungsebenen der Zustandsnote Bahnhöfe[2]

Bei der gewählten Gewichtung für die Bahnhofsinfrastruktur sollen anlagenspezifische Merkmale berücksichtigt werden. Bei den baulichen Anlagen wird die *Qualitätsnote* als wichtigste Teilnote angesehen, da die betrachteten baulichen Anlagen lange technische Nutzungsdauern von 40 bis 120 Jahre haben und daher über einen langen Zeitraum einen geeigneten baulichen bzw. technischen Zustand aufweisen müssen. Bei den ITK- und technischen Anlagen werden die Teilnoten *Verfügbarkeit* und *Alter* stärker gewichtet, um den technischen Vorrat, den technologischen Wandel, die Obsoleszenz und die Störanfälligkeit der Anlagen zu berücksichtigen.

Auf Bahnhofsebene wird für jede Anlagenklasse der Mittelwert aller Anlagen der Anlagenklasse gebildet (G2). Dies entspricht der Anlagenklassennote für den jeweiligen Bahnhof. Mit einer dritten Gewichtung (G3) werden die Anlagenklassen untereinander gewichtet. Durch diese Gewichtung können die Anlagenklassennoten zu einer Zustandsnote für jeden Bahnhof zusammengefasst werden. Für das Gewichtungskriterium muss eine Eigenschaft verwendet werden, die an allen Anlagen gemessen werden kann [10]. Wie auch bei [10] ist die Gewichtung über die Menge der Anlagen nicht möglich, da die Anlagen unterschiedliche Mengeneinheiten aufweisen (bspw. bei Bahnsteigen Fläche; bei Beleuchtung Leuchtpunkte). Bluhm et al. (2021)

[2] Eigene Darstellung.

verwenden daher für die anlagenübergreifende Gewichtung wie auch die SBB und ÖBB die Wiederbeschaffungswerte der Anlagen [10]. Bei der Anwendung auf die Bahnhofsinfrastruktur fällt auf, dass einige Anlagenklassen stark ins Gewicht fallen, während andere kaum Einfluss auf die Noten haben. Drei Anlagenklassen haben einen Anteil von mehr als 50 Prozent an der Gesamtnote, während acht andere Klassen einen Anteil von jeweils weniger als einem Prozent haben. Zudem erhält eine Anlagenklasse (unterirdische Personenverkehrsanlagen) die zweithöchste Gewichtung, die an nur einem Prozent der Stationen vertreten ist. Daher wird das Gewichtungskriterium des Wiederbeschaffungswertes um die regionale Verbreitung erweitert. Unter der regionalen Verbreitung einer Anlage wird der Anteil der Stationen verstanden, die mindestens eine Anlage der jeweiligen Anlagenklasse aufweisen. Beide Kriterien werden zu 50 Prozent herangezogen. Auf diese Weise wird beispielsweise der Einfluss der genannten Anlagenklasse mit geringer regionaler Verbreitung und hohem Wiederbeschaffungswert halbiert.

Für die Berechnung der Gesamtnote können in einem letzten Schritt die Zustandsnoten der einzelnen Bahnhöfe untereinander gewichtet werden (G4). Ein Gewichtungskriterium könnte hier das Reisendenaufkommen sein, das beispielsweise bei der Kennzahl Bewertung AnlagenQualität verwendet wird. Hier wird eine Gleichgewichtung angenommen, da die zustandsorientierte Bedeutung der Anlagen aus Sicht des EIUs unabhängig von Einflüssen wie dem Reisendenaufkommen ist.

Mit dieser Vorgehensweise können auch Noten für Teilbereiche berechnet und für Berichte vergleichend ausgewertet werden. So können beispielsweise Aussagen über Regionen oder Anlagenklassen getroffen werden. Zudem können Veränderungen des Zustandes über die Zeit wie beispielsweise Verbesserungen dargestellt werden. Dazu ist es von Bedeutung, dass die Erhebung und Berechnung der Zustandsnote zu den verschiedenen Zeitpunkten über die gleiche Methodik erfolgt.

3.6 Notensystematik

Die Notenlogik der Zustandsnote wird in Anlehnung an die allgemein bekannte deutsche Schulnotenlogik gewählt [Note 1,00 bis Note 6,00]. Da die Kennzahl zur Anlagenqualität ebenfalls in dieser Form erhoben wird, ist eine konsistente Überführung in die erweiterte Kennzahl möglich. Jede Anlage erhält je nach Ausprägung der drei Kriterien eine Teilnote (*Alter*, *Qualität* und *Verfügbarkeit*), die entsprechend der beschriebenen Gewichtung (G1) zu einer Anlagennote aggregiert wird. Jede Teilnote hat den gleichen Definitionsbereich [1,00 bis 6,00]. Dabei werden die Teilnoten so vergeben, dass die Note

1,00 den besten annehmbaren Zustand und die Note 6,00 den schlechtesten annehmbaren Zustand in der jeweiligen Teilnote beschreibt.

Auf diese Weise soll sichergestellt werden, dass die Noten über die Anlagenklassen hinweg vergleichbar sind. In der nachfolgenden Übersicht werden die Zustandsnoten anhand von Beispielen beschrieben und die Notenspezifikation am Beispiel bauliche Anlagen gezeigt (siehe Abbildung 3):

Zustandsnote			Beschreibung	Notenspezifikation am Beispiel bauliche Anlagen
Note		Bereich		
1	Neuwertig	1,00 ≤ x < 2,00	Anlagen, die **neu oder neuwertig** sind und in allen Qualitätsaspekten keine oder nur unbedeutende Beeinträchtigungen aufweisen.	Neuwertiger Zustand: Kombination aus A) Beginn des Lebenszyklus Q) Sehr guter baulich-technischer Zustand V) Keine oder vernachlässigbare Verfügbarkeitseinschränkungen
2	Gut	2,00 ≤ x < 3,00	Anlagen, die **neu oder so gut wie neu** sind und geringfügige Beeinträchtigungen in Qualitätsaspekten aufweisen.	Guter Zustand: Kombination aus A) Leicht fortgeschritten im Lebenszyklus Q) Guter baulich-technischer Zustand V) Sehr geringe Verfügbarkeitseinschränkungen
3	Mittelmäßig	3,00 ≤ x < 4,00	Anlagen, die in **einer oder mehreren Qualitätsdimensionen mäßige Beeinträchtigungen** aufweisen. Die Anlage sollte bei strategischen Ersatzinvestitionsentscheidungen berücksichtigt werden.	Mittelmäßiger Zustand: Kombination aus A) Mittlerer Lebenszyklus Q) Befriedigender baulich-technischer Zustand V) Geringe Verfügbarkeitseinschränkungen
4	Schlecht	4,00 ≤ x < 5,00	Die Anlage weist **wesentliche Beeinträchtigungen in einer oder mehreren Qualitätsdimensionen** auf. Es besteht eine erhöhte Wahrscheinlichkeit für hohe Folgekosten und/oder betriebliche Auswirkungen, Ersatzinvestition sollte geplant werden und ist in einigen Fällen überfällig.	Schlechter Zustand: Kombination aus A) Fortgeschrittener Lebenszyklus Q) Ausreichender baulich-technischer Zustand V) Mittlere Verfügbarkeitseinschränkungen
5	Mangelhaft	5,00 ≤ x < 6,00	Die Anlage wird in **einer oder mehreren Qualitätsaspekten als unzureichend** eingestuft. Sie kann den Betrieb beeinträchtigen, hohe Folgekosten verursachen, Anforderungen werden nicht erfüllt und/oder die Lebensdauer ist überschritten – Anlage hätte bereits erneuert werden müssen.	Mangelhafter Zustand: Kombination aus A) Ende des Lebenszyklus Q) Mangelhafter baulich-technischer Zustand V) Hohe Verfügbarkeitseinschränkungen
6	Ungenügend	x = 6,00	Die Anlage hat **potenziell schwerwiegende Auswirkungen** auf den Betrieb. Es wurden Abhilfemaßnahmen ergriffen.	Ungenügender Zustand: Kombination aus A) Lebenszyklus überschritten Q) Ungenügender baulich-technischer Zustand V) Erhebliche Verfügbarkeitseinschränkungen
Selbst wenn eine Anlage eine ungenügende Zustandsnote aufweisen sollte (Note 6,0), ist dies kein Indiz für ein Sicherheitsrisiko.				

Abbildung 3: Definitionen der Notenbereiche der Zustandsnote Bahnhöfe[3]

Neben der Abbildung des Zustandes kann anhand der Kennzahl eine Indikation für einen Maßnahmenbedarf abgeleitet werden. Dabei wird zwischen folgenden Maßnahmen unterschieden: präventive Instandhaltung, reaktive Instandhaltung, palliative Instandhaltung und Ersatzinvestition.

Unter präventiver Instandhaltung werden hier Maßnahmen zur Vermeidung des Eintretens einer schädlichen Abweichung vom Sollzustand von Anlagen verstanden, ohne die Anlagen dabei zu ersetzen. Dies umfasst zeitlich geplante Maßnahmen, die als Routinen individuell für Anlagenklassen mit konkreten Maßnahmeninhalten definiert sind. Reaktive Instandhaltung ist hier die Wiederherstellung des Sollzustandes, ohne die Anlage zu ersetzen. Dies umfasst ereignisorientierte, anlassbezogene Maßnahmen zur Beseitigung von Störungen oder zum Austausch von Komponenten. Unter palliativer

[3] Eigene Darstellung in Anlehnung an [18].

Instandhaltung werden hier Maßnahmen verstanden, die erforderlich sind, um die Anlage bis zu ihrem Ersatz zu betreiben.

Unter Ersatzinvestition wird hier die Wiederherstellung des Sollzustandes einer Anlage durch Ersatz der betreffenden i. d. R. abgängigen Anlagen durch eine neue Anlage gleicher Funktionalität an gleicher Stelle verstanden.

Die Zustandsnote zeigt somit, ob eine Anlage ersetzt oder unter Durchführung von Instandhaltungsmaßnahmen erhalten werden soll, wie in Abbildung 4 dargestellt.

Zustandsnote			Indikation Maßnahmenbedarf
Note		Bereich	
1	Neuwertig	1,00 ≤ x < 2,00	Präventive Instandhaltung
2	Gut	2,00 ≤ x < 3,00	Präventive Instandhaltung und punktuelle reaktive Instandhaltung
3	Mittelmäßig	3,00 ≤ x < 4,00	Präventive und reaktive Instandhaltung
4	Schlecht	4,00 ≤ x < 5,00	Prüfung des Bedarfs einer Ersatzinvestition, präventive und reaktive Instandhaltung
5	Mangelhaft	5,00 ≤ x < 6,00	Ersatzinvestition und palliative Instandhaltung
6	Ungenügend	x = 6,00	Ersatzinvestition und palliative Instandhaltung

Abbildung 4: Indikation des Maßnahmenbedarfs auf Basis der Zustandsnote Bahnhöfe[4]

Für neuwertige Anlagen, d. h. Anlagen mit Zustandsnoten besser als 2,00 werden präventive Instandhaltungsmaßnahmen empfohlen, die bis Noten besser als 4,00 durch reaktive Instandhaltungsmaßnahmen ergänzt werden können. Im Notenbereich zwischen 4,00 und besser als 4,50 kann der Bedarf einer Ersatzinvestition geprüft werden und ggf. noch präventive und reaktive Instandhaltung durchgeführt werden. Ab einer Note von 4,50 zeigt die Zustandsnote einen Ersatzinvestitionsbedarf auf, der bis zum Ersatz durch palliative Instandhaltung begleitet werden kann.

Sicherheitsrelevante Aspekte werden in der Zustandsnote nicht berücksichtigt. Somit kann aus der Zustandsnote selbst kein Sicherheitsrisiko abgeleitet werden.

3.7 Evaluation

Zur Evaluation der Kennzahl wurde eine Extremwertbetrachtung durchgeführt, um die realitätsnahe Beschreibung zu prüfen und die Eignung als Steuerungsgröße zu validieren. Es wurden Zustandsnoten von Extremszenarien gebildet und der indizierte Maßnahmenbedarf durch Fachexperten validiert. Damit soll geprüft werden, ob die unterste Gewichtungsebene konsistent und die Maßnahmenindikation zielführend ist. Ein

[4] Eigene Darstellung in Anlehnung an [18].

Extremszenario liegt vor, wenn jede der Teilnoten *Alter*, *Qualität* und *Verfügbarkeit* entweder neuwertig (Note 1,00) oder ungenügend (Note 6,00) ausgeprägt ist.

In Kapitel 3.6 wurde dargestellt, dass die Zustandsnote ab 4,50 eine Ersatzinvestition anzeigt, bei einer besseren Zustandsnote Instandhaltungsmaßnahmen durchzuführen sind und im Notenbereich zwischen 4,00 und 4,50 individuell zwischen den Maßnahmen zu entscheiden ist.

Die Handlungsempfehlung, die sich aus der Zustandsnote je Extremszenario ableitet, wurde von Fachexperten jeweils für bauliche, technische und ITK-Anlagen geprüft. Dabei wurde auf Basis der Teilnoten ohne Kenntnis der Zustandsnote eine Handlungsempfehlung der Optionen Instandhaltung, Ersatz oder Instandhaltung/Ersatz der Anlage abgegeben. Es wurde deutlich, dass der indizierte Maßnahmenbedarf durch die Note in rund 70 Prozent der Fälle von den Fachexperten gleich eingeschätzt wurde (n=35).

Damit wurde gezeigt, dass die Zustandsnote den Anlagenzustand mithilfe der vorgenommenen Gewichtung realitätsnah abbildet. Auf Basis der evaluierten Handlungsempfehlungen kann die Zustandsnote als eine weitere Entscheidungsgröße für Instandhaltungs- und Ersatzinvestitionsmaßnahmen herangezogen werden. Damit eignet sie sich für die Steuerung der Kernprozesse des Unternehmens.

Außerdem wurde geprüft, ob die entwickelte Kennzahl die Anforderungen erfüllt, die an sie gestellt werden. Die Anforderungen sind: repräsentativ, aussagekräftig, wirtschaftlich, zielorientiert, reversibel, ganzheitlich und auf Teilbereichen ausgebbar. Um repräsentativ und aussagekräftig zu sein, wurde die bisherige Bewertung der *Qualität* um die Teilnoten *Alter* und *Verfügbarkeit* erweitert. Der Betrachtungsumfang wurde so gewählt, dass der als relevant eingestufte Teil der Anlagen berücksichtigt wird und sich auf Grundlage der betrachteten Anlagen Rückschlüsse auf die Gesamtheit der Bahnhöfe ziehen lassen. Durch die Nutzung vorhandener Daten wird sichergestellt, dass die Kennzahl mit vertretbarem Aufwand erhebbar und damit wirtschaftlich ist.

Die Kennzahl ist somit für eine realitätsnahe Abbildung des Zustandes sowie zur Nutzung von Steuerungszwecken geeignet. Sie ist geeignet, um Verschlechterungen und Verbesserungen des Portfolios abzubilden, d. h. sie ist reversibel. Auch kann sie auf verschiedenen Teilbereichen beispielsweise für bestimmte Anlagenklassen oder Regionen ausgegeben werden.

Damit ist die Kennzahl aus Sicht des EIUs geeignet, den Infrastrukturzustand wiederzugeben. Vor dem Einsatz der Kennzahl sind weiterer Stakeholder einzubeziehen

und die Anforderungen zu eruieren. Erste Untersuchungen deuten darauf hin, dass der Ursache-Wirkungs-Zusammenhang auch für die erweiterte Kennzahl herstellbar ist, womit das Ziel zum Nachweis der geeigneten Mittelverwendung erreicht werden kann.

4 Anwendung der Zustandsnote Bahnhöfe

An einem Beispiel soll die Kennzahl zur Anwendung gebracht werden. Ein Bahnsteig des Beispielbahnhofs erhält für sein Alter die Teilnote 4,86, für seine Qualität die Note 3,99 und für seine Verfügbarkeit die Note 2,25. Gewichtet ergibt sich für die Anlage die Note 4,08. Die anderen Bahnsteige an der Beispielstation haben die Noten 3,54 und 2,46. Aufgrund der Gleichgewichtung innerhalb der Anlagenklasse ergibt sich die Anlagenklassennote *Bahnsteige* am Beispielbahnhof von 3,36. Neben den Bahnsteigen hat die Station noch Wetterschutzhäuser mit Note 1,84 und Beleuchtungsmaste mit Note 2,47. Werden die Anlagenklassen mit dem beschriebenen Gewichtungsfaktor aus Wiederbeschaffungswert und regionaler Verbreitung gewichtet, ergibt sich für den Beispielbahnhof eine Zustandsnote von 2,89, wie in Abbildung 5 dargestellt.

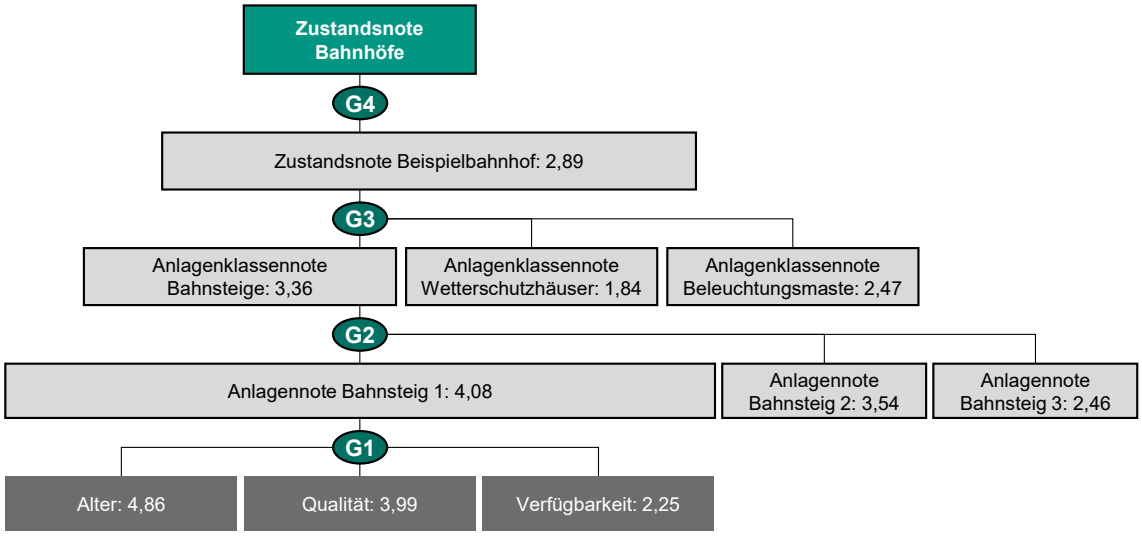


Abbildung 5: Notengewichtung am Beispielbahnhof[5]

Im nächsten Schritt werden die Zustandsnoten der zu bewertenden Einzelbahnhöfe gleichgewichtet zusammengefasst, sodass sich die Gesamtnote ergibt. Die Gesamtnote kann auch für bestimmte Regionen oder ausgewählte Anlagenklassen berechnet und berichtend verwendet werden.

[5] Eigene Darstellung.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Zur transparenten Darstellung des Zustandes und Identifikation des Instandhaltungsbedarfes ist die Entwicklung einer Kennzahl für Bahnhofsinfrastruktur erforderlich. Als Ziele für die Kennzahl sind die realitätsnahe Beschreibung des Anlagenzustands, die Steuerung der Kernprozesse eines Infrastrukturbetreibers sowie der Nachweis der geeigneten Mittelverwendung gegenüber dem Eigentümer identifiziert worden. Darüber hinaus bestehen Anforderungen wie repräsentativ und aussagekräftig zu sein. Für die hierarchische Aggregation werden die Kennzahlen der Einzelanlagen zunächst auf Anlagenklassenebene und anschließend auf Einzelbahnhofsebene zusammengefasst. Maßgeblichen Einfluss auf die Gesamtnote hat dabei die Gewichtung der Anlagenklassen [10]. Dafür wird abweichend von den Ansätzen der Schweizerischen und der Österreichischen Bundesbahnen nicht nur der Wiederbeschaffungswert der Anlagen als Messgröße verwendet, sondern auch die regionale Verbreitung herangezogen. Es wird damit sichergestellt, dass Anlagenklassen mit hohem Investitionsvolumen die Note nicht maßgeblich beeinflussen, wenn sie nicht auch an einer hohen Anzahl an Bahnhöfen vorhanden sind.

Die Notensystematik umfasst neben der bestehenden Kennzahl für die *Qualität* die von Bluhm et al. (2021) vorgeschlagenen Felder *Alter* und *Verfügbarkeit*. Insbesondere für technische sowie informations- und kommunikationstechnische Anlagen ist die Messung des Zustands über Verfügbarkeitsparameter geeignet. Um Ersatzinvestitionsbedarfe bewerten zu können, wird die Teilnote *Alter* hinzugezogen. Sie beschreibt, in welchem Abschnitt des Lebenszyklus sich eine Anlage befindet.

Weiterer Forschungsbedarf besteht darin, einen sog. Ursache-Wirkungs-Zusammenhang für die neu entwickelte Kennzahl herzustellen. Damit kann in einem weiteren Schritt der bidirektionale Zusammenhang zwischen dem Mittelbedarf und dem Zustand der Bahnhofsinfrastruktur in Form der Zustandsnote Bahnhöfe ausgewiesen werden. Um die Kennzahl schlussendlich einsetzen zu können, sind die Anforderungen weiterer Stakeholder zu prüfen.

Literatur

[1] Eisenbahn-Bundesamt (Hrsg.): *Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung III (LuFV III)*. 2020

[2] Bundesrechnungshof; Scheller, Kay: *Bericht nach § 99 BHO zur Dauerkrise der Deutschen Bahn AG - Hinweise für eine strukturelle Weiterentwicklung*. 15.03.2023

[3] Deutsches Institut für Normung e. V.: *DIN EN 15341:2022-08, Instandhaltung - Wesentliche Leistungskennzahlen für die Instandhaltung; Deutsche Fassung EN 15341:2019+A1:2022*

[4] Degelmann, Robert: *Key Performance Indicators Kennzahlen für die Weiterentwicklung der Straßeninfrastruktur in Bayern*: *Vortrag zum Deutschen Straßen- und Verkehrskongress 2016* (2016)

[5] Lavy, Sarel; Garcia, John A.; Dixit, Manish K.: *Establishment of KPIs for facility performance measurement: review of literature*. In: *Facilities* 28 (2010), 9/10, S. 440–464

[6] Reichel, Jens; Müller, Gerhard; Haeffs, Jean: *Betriebliche Instandhaltung*. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg, 2018

[7] Schenk, Michael (Hrsg.): *Instandhaltung technischer Systeme*: *Methoden und Werkzeuge zur Gewährleistung eines sicheren und wirtschaftlichen Anlagenbetriebs*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010

[8] OECD: *Performance Indicators for the Road Sector*: *Summary of the Field Tests*. Paris: OECD Publishing, 2001

[9] Speer, Arne: *Entwicklung von Key Performance Indikatoren auf dem Weg vom Erhaltungsmanagement zum Asset Management für Bundesautobahnen*. Braunschweig, 2019

[10] Bluhm, Saskia; Wink, Christopher; Dickenbrok, Björn; Helfenstein, Andreas; Nießen, Nils: *Qualität der Eisenbahninfrastruktur - Eine methodische Herangehensweise zur umfassenden Bestimmung des Infrastrukturzustands*. In: de Doncker, Rik W.; Nießen, Nils; Friesen, Nadine; Schindler, Christian (Hrsg.): *IRSA 2021: Tagungsband, Proceedings: 3rd International Railway Symposium Aachen, 21-23 November 2021*. Aachen: RWTH Aachen University, 2022, S. 93–107

[11] ÖBB-Infrastruktur AG: *Netzzustandsbericht 2021*. Wien, 2022

[12] Balzer, Gerd; Schorn, Christian: *Asset Management für Infrastrukturanlagen - Energie und Wasser*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014

[13] Jacke, Tobias; Dickenbrok, Björn; Friesen, Nadine; Grub, Alexandra Angelika; Nießen, Nils: *Ursache-Wirkung-Zusammenhang: Zusammenhang zwischen Mitteleinsatz und Infrastrukturqualität abbilden*. In: *Eisenbahntechnische Rundschau* (2019), Nr. 9, S. 37–41

[14] Maus, Maren; Lampe, Felix; Friesen, Nadine; Heckmann, Mark; Elfert, Lea; Nießen, Nils: *Degradation functions for railway station equipment quality based on maintenance-influenced data*. In: *2021 IEEE 17th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)* : *23-27 Aug. 2021*: IEEE, 2021

[15] Heckmann, Mark; Elfert, Lea; Höhn, Steffen; Schubert, Christopher; Aktas, Hakan; Dittberner, Friederike; Grob, Felix; Lampe, Felix; Nießen, Nils: *Ursache-Wirkungs-Zusammenhang zwischen Mitteleinsatz und erzielbarer Anlagenqualität am Beispiel von Verkehrsstationen*. In: de Doncker, Rik W.; Nießen, Nils; Friesen, Nadine; Schindler, Christian (Hrsg.): *IRSA 2021: Tagungsband, Proceedings: 3rd International Railway Symposium Aachen, 21-23 November 2021*. Aachen: RWTH Aachen University, 2022, S. 334–349

[16] Pawellek, Günther: *Integrierte Instandhaltung und Ersatzteillogistik*: *Vorgehensweisen, Methoden, Tools*. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2016

[17] Schubert, Christopher; Heckmann, Mark; Höhn, Steffen; von Pappritz, Julien; Elfert, Lea: *Investitions- und Instandhaltungsstrategie von Personenbahnhöfen*. In: *Der Eisenbahningenieur* 71 (2020), Nr. 10, S. 35–39

[18] DB Netz AG: *Netzzustandsbericht DB Netz AG 2022*: *Fokus Netzzustandsnote*. unveröffentlicht

Session 15

Lea Elfert, Hakan Aktaş, Steffen Höhn, Markus von Bohr, Kunibert Lennerts

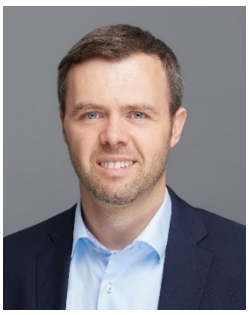
Autoren

Elfert, Lea

Lea Elfert ist Doktorandin am Karlsruher Institut für Technologie und verantwortet als Projektleiterin bei der DB Station&Service AG mit dem Projektteam die Themen Ursache-Wirkungs-Zusammenhang und Zustandsnote. Sie studierte Facility Management an der Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin und der Beuth Hochschule für Technik Berlin.

Aktaş, Hakan

Hakan Aktaş studierte bis 2020 Wirtschaftsingenieurwesen an der Technischen Universität Berlin und ist seitdem bei der DB Station&Service AG als Teilprojektleiter im Projekt „Ursache-Wirkung-Zusammenhang und Zustandsnote“ tätig.



Höhn, Steffen

Steffen Höhn studierte Betriebswirtschaftslehre und Internationale Beziehungen und ist seit 2017 bei der DB Station&Service AG tätig. In der aktuellen Aufgabe als Leiter der Abteilung „Grundsätze FM“ verantwortet er mit dem Projektteam die Themen des Ursache-Wirkungs-Zusammenhangs und auch der Zustandsnote.

Von Bohr, Markus

Markus von Bohr studierte bis 2015 Bauingenieurwesen an der Technischen Hochschule Mittelhessen und der Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig. Seit 2015 arbeitet er bei der DB Station&Service AG und ist aktuell Anlagentyp-verantwortlicher.

Lennerts, Kunibert

Prof. Dr.-Ing. Kunibert Lennerts ist seit dem Jahr 2000 Professor für Facility Management am Karlsruher Institut für Technologie. Er wurde für diese erste deutsche Universitätsprofessur für Facility Management berufen, nachdem er als Bereichsleiter Immobilienmanagement/Facility Management in der Zentrale der Deutsche Bahn Immobiliengesellschaft mbH tätig war.

Session 15
Christopher Wink, Björn Dickenbrok, Felix Lampe, Martin Lempp, Leonie Meinerzhagen, Tobias Hausberg, Nils Nießen

Herstellen des Ursache-Wirkung-Zusammenhangs zwischen Mitteleinsatz und Netzzustandsnote

Wink, Christopher[1], Dr.-Ing. Dickenbrok, Björn[2], Lampe, Felix[1], Dr. Lempp, Martin[2], Meinerzhagen, Leonie[1], Hausberg, Tobias[1], Univ.-Prof. Dr.-Ing. Nießen, Nils[1]

[1]Verkehrswissenschaftliches Institut (VIA) – RWTH Aachen
[2]DB Netz AG, Planung und Segmentsteuerung (I.NAP), Frankfurt (Main)

Zusammenfassung

Um die zukünftige Qualitätsentwicklung der Eisenbahninfrastruktur in Abhängigkeit vom Mitteleinsatz prognostizieren zu können, werden die Modelle zur Abbildung des Ursache-Wirkung-Zusammenhangs (UWZ) der RWTH Aachen mit der Netzzustandsnotenlogik der DB Netz AG gekoppelt. Dazu werden die Merkmale der Netzzustandsnote mit den Abnutzungsfunktionen sowie den Instandhaltungs- und Erneuerungsmaßnahmen und deren Wirkung aus den UWZ-Modellen abgebildet und dadurch eine realitätsnahe Prognose der Netzzustandsnote erreicht.

Keywords: Infrastrukturmanagement; Infrastrukturzustand; Infrastrukturqualität; Zustandsnote; Netzzustandsnote; Prognose

1 Einleitung

Für Eisenbahninfrastrukturunternehmen wie die DB Netz AG besteht die Herausforderung darin, die Infrastruktur mit den zur Verfügung stehenden Finanzmitteln für Ersatzinvestition und Instandhaltung in einem möglichst guten Zustand zu halten und damit den Kundinnen und Kunden eine möglichst hohe Beförderungsqualität zu bieten.

Dazu ist es zum einen erforderlich, ein möglichst objektives und umfassendes Bild des Infrastrukturzustands im Status quo zu haben und zum anderen die weitere Entwicklung des Infrastrukturzustands in Abhängigkeit von der Abnutzung durch Zugfahrten und den durchgeführten Instandhaltungs- und Ersatzinvestitionsmaßnahmen prognostizieren zu können. Für beide Anforderungen sind modelltechnische Lösungen erforderlich, um Bewirtschaftungsstrategien in Kontext der weiteren Infrastrukturzustandsentwicklung ableiten zu können.

Um die Entwicklung des Infrastrukturzustands prognostizieren zu können, wurde das Verkehrswissenschaftliche Institut der RWTH Aachen (VIA) von der DB Netz AG beauftragt, wissenschaftliche Modelle zur Abbildung eines Ursache-Wirkung-Zusammenhangs (UWZ) zwischen Finanzmitteln und spezifischen Zustandsmerkmalen der Infrastruktur zu entwickeln und umzusetzen [1]. Damit ist bei Vorgabe von Budgets für Ersatzinvestitions- und Instandhaltungsmaßnahmen eine Prognose der zukünftigen Entwicklung der Zustandsmerkmale, sowie bei Vorgabe eines Qualitätsziels die Prognose der benötigten Finanzmittel möglich.

Darüber hinaus wurde bei der DB Netz AG die sogenannte Netzzustandsnotenlogik entwickelt, um den technischen Zustand der Infrastruktur umfassend und intuitiv verständlich mittels einer Schulnotenlogik zu bewerten. Damit ist es möglich, die unterschiedlichen Anlagentypen und deren spezifische Zustandsmerkmale in eine Note zu übersetzen und vergleichbar zu machen.

Durch eine Kombination der Netzzustandsnotenlogik und des UWZ kann der Ursache-Wirkung-Zusammenhang zwischen Mitteleinsatz und Netzzustandsnote hergestellt werden. Dabei werden die UWZ-Modelle genutzt, um die Entwicklung der zur Ermittlung der Netzzustandsnote verwendeten Zustandsmerkmale in Abhängigkeit der verfügbaren Finanzierungsmitteln zu prognostizieren. Mittels der Netzzustandsnotenlogik werden die prognostizierten Zustandsmerkmale in die Zustandsnote übersetzt. Der Fokus liegt mit Blick auf die Finanzierungszeiträume auf Prognosehorizonten von zehn bis zwanzig Jahren, theoretisch sind mit dem gewählten Ansatz auch längere Prognosezeiträume möglich. Im Folgenden werden zunächst die beiden modelltechnischen Lösungen vorgestellt und anhand eines Beispiels die Verknüpfung beider Ansätze beschrieben.

2 Die Netzzustandsnotenlogik

Um den technischen Zustand der Infrastruktur mittels der Netzzustandsnotenlogik zu beschreiben, wird jede Infrastrukturanlage einzeln anhand ihrer spezifischen

Session 15
Christopher Wink, Björn Dickenbrok, Felix Lampe, Martin Lempp, Leonie Meinerzhagen, Tobias Hausberg, Nils Nießen

Zustandsmerkmale mit einer Note zwischen eins und fünf bewertet, wobei die Note eins eine neuwertige Anlage in einwandfreiem Zustand und die Note fünf eine dringend erneuerungsbedürftige Anlage beschreibt (siehe Abbildung 2-1). Zusätzlich wird noch eine sechste Notenstufe definiert, um kurzfristigen Handlungsbedarf abbilden zu können.

Abbildung 2-1: Notenskala und Bedeutung der Notenstufen.

Dazu wird jedes Zustandsmerkmal über definierte Notenmetriken und einen festgelegten Gewichtungsalgorithmus zu einer Zustandsnote je Einzelanlage verrechnet. Für die einzelnen Anlagentypen werden die relevanten Zustandsmerkmale in den Qualitätsdimensionen Inspektion, Verfügbarkeit, Lebenszyklus und besondere Sachverhalte berücksichtigt. Dabei werden unter anderem Messergebnisse für die Gleislage oder die Zustandskategorie von Brücken in der Qualitätsdimension „Inspektion“, die Störungshäufigkeit oder Langsamfahrstellen in der Qualitätsdimension „Verfügbarkeit“ sowie die Restnutzungsdauer in der Qualitätsdimension „Lebenszyklus“ verwendet.

Über einen Aggregierungsalgorithmus können die Zustandsnoten einer beliebigen Auswahl an Einzelanlagen auch gewerkeübergreifend zu einer durchschnittlichen Gesamtnote verrechnet werden (siehe Abbildung 2-2). Damit ist es möglich, den Zustand der Infrastruktur von der Einzelanlage über beliebige Netzausschnitte bis zum Gesamtnetz mittels einer einheitlichen Notenlogik darzustellen [2].

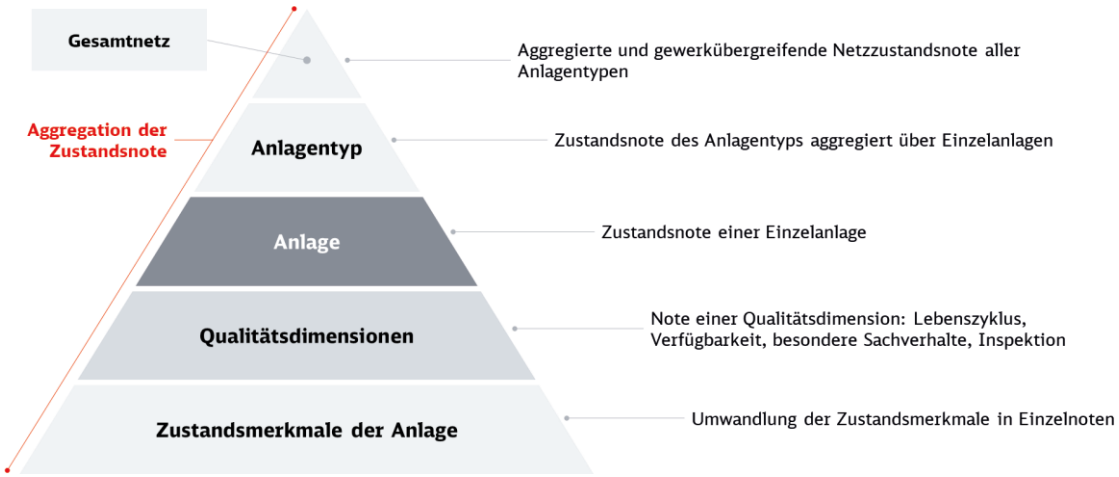


Abbildung 2-2: Aggregationsstufenebenen der Notenlogik.

3 Die Modelle des Ursache-Wirkung-Zusammenhangs

Die bisher entwickelten UWZ-Modelle umfassen die Anlagentypen der Gleise [3], Weichen & Kreuzungen, Stellwerke [4], Bahnübergänge, Brücken, Tunnel und Stützbauwerke jeweils mit ihren führenden Merkmalen zur Beschreibung und Prognose des Anlagenzustands. Zusätzlich sind entsprechende Maßnahmen mit ihren spezifischen Wirkungen auf die Anlagenmerkmale definiert. Die Prognose berechnet damit bei Vorgabe von Budgets für Ersatzinvestition und Instandhaltung die zukünftige Entwicklung der Zustandsmerkmale; bei Vorgabe eines Qualitätsziels berechnet sie die dafür benötigten Finanzmittel. Die entwickelten Algorithmen wurden wissenschaftlich erarbeitet und validiert, sodass sie zur Berechnung zukünftiger Netzzustandsnoten verwendet werden können.

Für die vorhandenen Modelle der Anlagentypen Stellwerke, Weichen & Kreuzungen sowie Bahnübergänge können die Vorarbeiten aus der Modellerstellungsphase, die mit Machine-Learning-Algorithmen durchgeführt wurde, sehr gut adaptiert werden. Die Modelle zur Prognose der Längshöhenfehler und Risstiefen der Gleise können ebenso mit geringen Anpassungen mit der Netzzustandsnote verknüpft werden.

Für die Modellierung von Anlagen des konstruktiven Ingenieurbaus wird das gemeinsame Verweildauermodell genutzt, was bei den Brücken auch die Wirkung von Instandhaltungsmaßnahmen abbilden kann. In den folgenden Kapiteln werden deshalb am Beispiel von Brücken das Verweildauermodell und die Maßnahmenwirkung für die Prognose der Zustandsentwicklung vorgestellt.

3.1 Verweildauermodell für den konstruktiven Ingenieurbau

Im Zuge der Kopplung des UWZ mit der Netzzustandsnote wurden die Modelle der Anlagentypen des konstruktiven Ingenieurbaus – Brücken, Tunnel und Stützbauwerke – mit dem gemeinsamen Verweildauermodell vereinheitlicht.

Ziel des Verweildauermodells ist die Modellierung der Anlagenzustände in Bezug auf ihre jeweilige Zustandskategorie (ZK). Die ZK bildet ein maßgebliches Zustandsmerkmal, welches in die Netzzustandsnote einfließt. Das Bewertungsspektrum der Zustandskategorie beinhaltet ganzzahlige Ergebnisse von 1 (Neuzustand) bis 4 (Erneuerungsbedarf). Die Definitionen der einzelnen Zustandskategorien können Tabelle 3-1 entnommen werden.

Jedes Bauwerk wird in vorgeschriebenen Abständen – bei Brücken beispielsweise alle 6 Jahre – inspiziert und auf Schäden untersucht. Aus diesen Bewertungen wird die ZK für jedes Bauwerk abgeleitet.

Tabelle 3-1: Definition der Zustandskategorien [5].

Zustandskategorie (ZK)	Definition
ZK 1	Keine Schäden oder geringfügige Schäden am Bauwerksteil / Bauwerk, die sich auf den technischen Erhaltungszustand auswirken. Für einen Zustandserhalt sind bei Bedarf kleinere Instandsetzungsmaßnahmen erforderlich.
ZK 2	Schäden begrenzten Umfangs am Bauwerksteil / Bauwerk, die sich auf den technischen Erhaltungszustand auswirken. Für einen Zustandserhalt bzw. eine Zustandsverbesserung sind Instandsetzungsmaßnahmen zur Behebung einzelner Schäden erforderlich.
ZK 3	Umfangreiche Schäden am Bauwerksteil / Bauwerk, die sich auf den technischen Erhaltungszustand auswirken. Für einen Zustandserhalt bzw. eine Zustandsverbesserung sind umfangreiche Instandsetzungsmaßnahmen erforderlich.
ZK 4	Gravierende Schäden am Bauwerksteil / Bauwerk, die sich auf den technischen Erhaltungszustand auswirken. Eine Instandsetzung ist aufgrund des Umfangs nicht mehr sinnvoll bzw. möglich. Sicherheits- und/oder bestandserhaltende Maßnahmen bis zur Teilerneuerung bzw. Ersatzneubau sind teilweise erforderlich.

Für das Verweildauermodell werden die Zeitspannen, die eine Anlage in einer Zustandskategorie verweilt, datenbasiert ausgewertet. Dabei wird bewusst auf die Berücksichtigung des realen Alters eines Bauwerks verzichtet, da dies aus mehreren Gründen bei Betrachtung eines Bauwerks im Gesamten nur einen sehr schwachen Zusammenhang zum technischen Zustand aufweist. Vielmehr soll der aktuelle Zustand der Anlagen Einfluss auf die zukünftige Abnutzung haben. Daher ist es erforderlich, eine Degradation ohne Berücksichtigung des tatsächlichen Alters zu modellieren.

Bei den Brücken stehen hierfür die Zustandsbewertungen aus den Jahren von 1994 bis 2021 zur Verfügung. Hierin sind den einzelnen Brücken jeweils Bewertungen – insgesamt ca. 126.000 Bewertungen – und das entsprechende Jahr der Bewertung zugeordnet. Dabei erfolgt die eindeutige Identifizierung der Brücke über den sogenannten technischen Platz (TP 3). Neben diesen Daten liegen weitere Informationen über die durchgeführten Erneuerungen von Brücken aus den Jahren 1994 bis 2021 vor.

Aus diesen beiden Datensätzen wird für jede Brücke ein Sequenzdatensatz erstellt. Dieser beinhaltet den Zustand der Brücke für jedes einzelne Jahr, wobei die Zustände der Brücke zwischen zwei vorliegenden Bewertungen als gleichbleibend angesetzt werden. Die Erstellung des Sequenzdatensatz ist für eine Beispielbrücke in Abbildung 3-1 dargestellt.

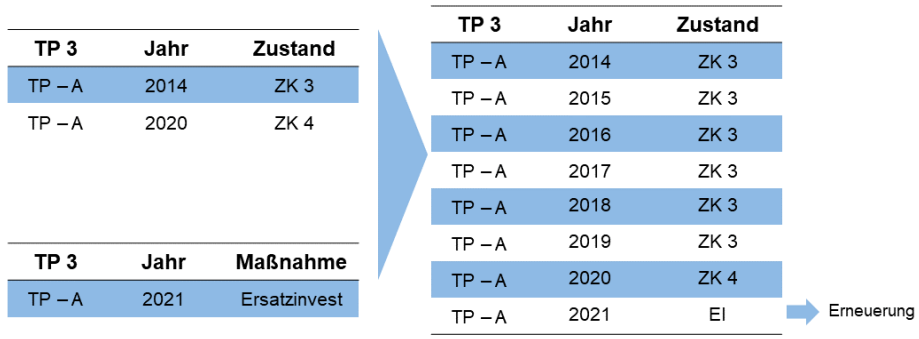


Abbildung 3-1: Erstellung des Sequenzdatensatzes.

Diese Sequenzdatensätze werden im Hinblick auf die Verweildauern in den unterschiedlichen Zustandskategorien analysiert. Brücken, und auch die anderen Gewerke des konstruktiven Ingenieurbaus, haben eine vergleichsweise lange technische Nutzungsdauer mit teilweise über 100 Jahren. Es liegen jedoch nur Daten mit den Zustandsbewertungen für einen Zeitraum von 27 Jahren für die Brücken vor. Der Zustand der Brücken vor 1994 ist unbekannt und somit auch die Verweildauer in der Zustandskategorie der ersten vorliegenden Bewertung der Brücken. Daher wird in den Sequenzdaten nach einem ersten Wechsel der Zustandskategorie gesucht. Dieser ist dann der Startwert für die Verweildauer in der nächsten Zustandskategorie. Anschließend wird der Sequenzdatensatz auf weitere Wechsel der Zustandskategorien analysiert. Eine Erneuerung einer Brücke wird dabei ebenfalls als Wechsel der Zustandskategorie (von der ZK 4) gewertet. Diese Auswertung wird für jede Bauform der Brücken und für jede Zustandskategorie durchgeführt.

Somit können verschiedene Verweildauern in den jeweiligen Zustandskategorien für jede Bauform ermittelt werden. Aus den ermittelten Zeiträumen wird ein kumuliertes Risiko für einen Wechsel der Zustandskategorie über die Verweildauer für alle Brücken einer Bauform bestimmt. Das kumulierte Risiko wird mittels einer Funktion gefittet und anhand dieser Funktion werden Verweildauern für verschiedene Risiken abgeleitet. Dabei wird für jede Zustandskategorie individuell der beste Fit aus der Weibull-, der Lognormal-, der Loglogistic und der Exponentialfunktion gewählt. Für die Bestimmung der Verweildauern wird im Modell ein Risiko von 0,5 bzw. 50 % gewählt, da ab diesem Risiko ein Wechsel der Zustandskategorie wahrscheinlicher als ein Verbleib in der

bisherigen Zustandskategorie ist (vgl. Abbildung 3-2). Zudem wird durch die Festlegung des Risikos von 50 % berücksichtigt, dass bei vielen Brücken im Betrachtungszeitraum (1994-2021) kein Wechsel der Zustandskategorie in den Daten erfasst worden ist und diese daher Verweildauern besitzen, die größer sind als der betrachtete Zeitraum.

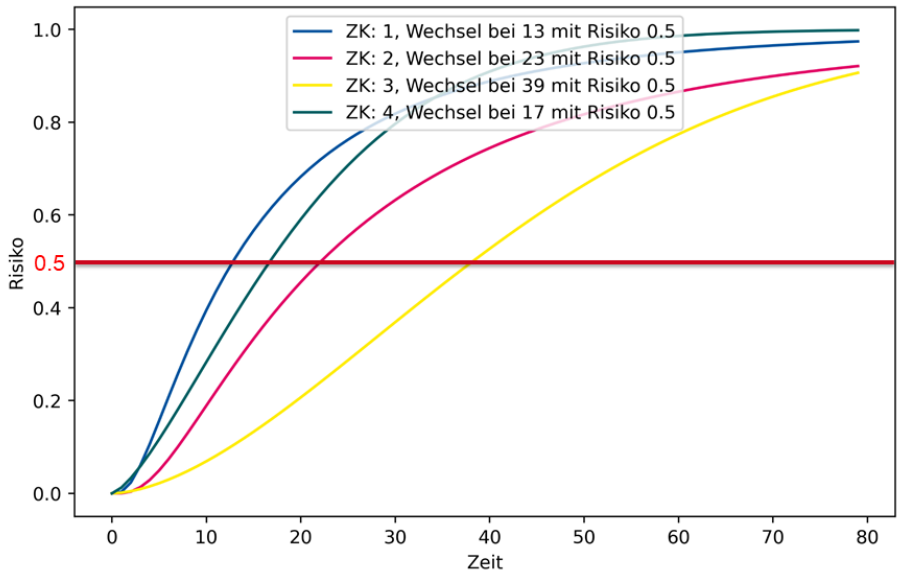


Abbildung 3-2: Auswertung der Verweildauern.

Anhand dieser Auswertungen ist für jede Bauform eine Verweildauer in den Zustandskategorien 1 bis 4 ableitbar. Diese Verweildauern werden angesetzt, um die Degradation der Brücken zu prognostizieren. Die Anlagenqualität der Brücken, Tunnel und Stützbauwerke werden somit unabhängig vom tatsächlichen Anlagenalter und aufbauend auf dem tatsächlichen Zustand der Anlagen prognostiziert. Dabei kann die Prognosegüte des Verweildauermodells durch Datenerweiterungen mit den Zustandsbewertungen aus den kommenden Jahren stetig verbessert werden.

3.2 Maßnahmenwirkung am Beispiel von Brücken

Der Zustand eines Bauwerks kann sich durch verschiedene Maßnahmen verbessern. Hierfür gibt es im UWZ bereits bewährte Modell, die im Zuge der Kopplung in die Netzzustandsnote übernommen und adaptiert werden.

In den UWZ-Modellen wird grundsätzlich zwischen zwei Budgetarten unterschieden, dem Ersatzinvestitions- und dem Instandhaltungsbudget. Maßnahmen, die eine Erneuerung der Infrastruktur beschreiben, werden durch Mittel im Ersatzinvestitionsbudget gedeckt, während die finanziellen Mittel für Maßnahmen der

Wartung und Instandhaltung aus dem Instandhaltungsbudget finanziert werden. Beide Maßnahmenarten mit ihren jeweiligen Wirkungen sind im UWZ modelliert und wurden für die Netzzustandsnotenprognose adaptiert.

Bei einer Ersatzinvestition handelt es sich um den Ersatz einer Anlage, was einem Neubau der Anlage entspricht. Dementsprechend weisen Brücken nach einer Ersatzinvestition einen neuwertigen Zustand auf und werden so modelliert, dass sie mit einem Alter von null Jahren und einer Zustandskategorie von eins in die Berechnung der Netzzustandsnote einfließen. Ersatzinvestitionen sorgen folglich für eine Verjüngung und eine Verbesserung des Anlagenbestands.

Auch eine Instandhaltungsmaßnahme verbessert den Zustand einer Anlage, jedoch in geringerem Maße. Hierbei wird zwischen einer kleinen und einer großen Instandhaltungsmaßnahme unterschieden. Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, wird jede Brücke alle sechs Jahre begutachtet und daraus ihre Zustandskategorie abgeleitet. Neben der aktuellen Zustandskategorie wird auch eine Prognose für die Brücke in 6 und in 18 Jahren erstellt. Daraus ergibt sich ein sogenanntes ZK-Tripel aus dem jeweiligen aktuellen Zustand einer Anlage und dem prognostizierten Zustand.

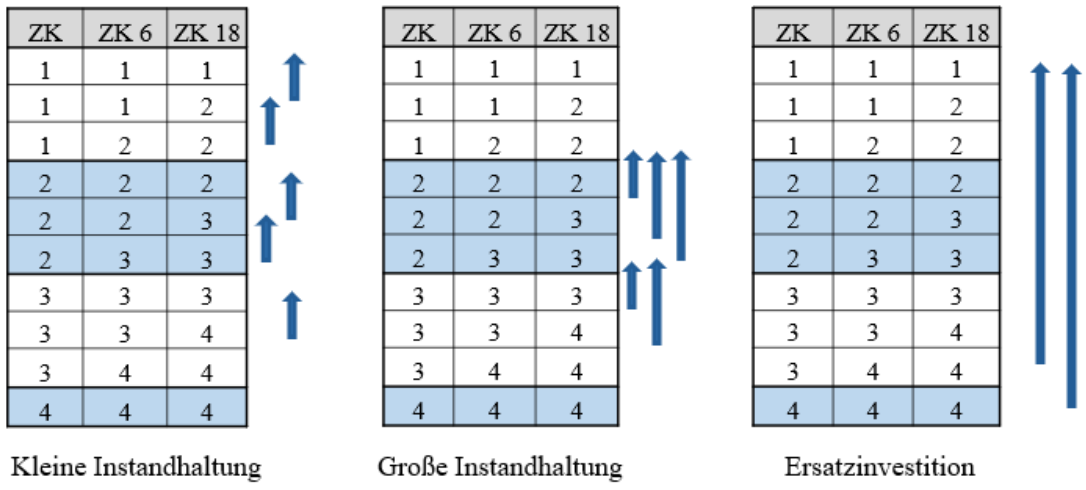


Abbildung 3-3: Beispielhafte Maßnahmenwirkungen bei Brücken.

Modellhaft wird die Wirkung der Instandhaltungsmaßnahmen [6] wie folgt abgebildet: Eine kleine Instandhaltungsmaßnahme verbessert eine Anlage um eine Stufe im ZK-Tripel, jedoch nicht auf eine bessere, aktuelle Zustandskategorie. Das heißt, dass eine Anlage in der ZK 2-3-3 auf eine ZK 2-2-3 verbessert werden kann. Eine Anlage in der ZK 2-2-2 bleibt hingegen in dieser ZK 2-2-2. Lediglich die Verweildauer in dieser Zustandskategorie wird auf 0 gesetzt. Eine große Instandhaltungsmaßnahme verbessert

eine Anlage um eine Zustandskategorie in das entsprechende letzte ZK-Tripel. Also können Anlagen der ZK 3-3-4 oder 3-3-3 auf eine ZK 2-3-3 verbessert werden. Dieser Zusammenhang und die Wirkung der jeweiligen Maßnahmen ist beispielhaft in Abbildung 3-3 dargestellt. Je nach aktuellem Zustand einer Brücke kann eine Maßnahme im Modell auch ohne Wirkung sein, sodass diese im Anschluss auch nicht ausgewählt wird.

Für das Verweildauermodell wird die Maßnahmenwirkung auf das ZK-Tripel durch eine Anpassung der aktuellen ZK – wenn relevant – sowie der Berechnung eines neuen, fiktiven Starts der Anlage in der jeweiligen ZK abgebildet. Damit kann also die Anlage eine längere Verweildauer als ohne Maßnahme aufweisen, was der Maßnahmenwirkung entspricht.

4 Die Kopplung der Ansätze am Beispiel von Brücken

Für die Bewertung des Zustands von Brücken mittels der Netzzustandsnotenlogik werden die maßgeblichen Zustandsmerkmale von Brücken in die Notenlogik übersetzt. Dabei stellt das wesentliche Zustandsmerkmal die bei der Inspektion erfasste Zustandskategorie dar. Zusätzlich werden in der Qualitätsdimension „Inspektion“ Befundmeldungen, mit denen Instandhaltungsmaßnahmen ausgelöst werden, sowie Lasteinschränkungen und auffällige Befunde, die auf das Risiko einer Nutzungseinschränkung hindeuten können, berücksichtigt. In der Qualitätsdimension „Verfügbarkeit“ wird die Störungshäufigkeit, sowie das Vorliegen von anlagenbedingten Langsamfahrstellen und langfristigen Geschwindigkeitseinschränkungen verwendet. Die Qualitätsdimension „Lebenszyklus“ wird mittels der Restnutzungsdauer bewertet, die entweder auf Basis statischer Nachrechungen der Brückenbauwerke, oder über die mittlere technische Nutzungsdauer gemäß definierter Lebenszyklusmodelle ermittelt wird.

Das maßgebliche Zustandsmerkmal für Brücken stellt die Zustandskategorie dar, welche mit einer Gewichtung von ca. 80% in die Gesamtnote einer Anlage eingeht, gefolgt von der Restlebensdauer mit einer Gewichtung von ca. 10%. Das Störverhalten spielt bei Brücken eine untergeordnete Rolle, weshalb diese mit einer Gewichtung von ca. 5% in die Gesamtnote eingehen. Geschwindigkeits-, Lasteinschränkungen und auffällige Bauwerke stellen in der Regel singuläre, aber „fatale“ Ereignisse dar, weshalb diese sich bei Auftreten in der jeweiligen Qualitätsdimension mit einer schlechten Bewertung durchsetzen.

Inspektion	Verfügbarkeit	Lebenszyklus
Zustandskategorie	Störverhalten	Restnutzungsdauer
Befundmeldungen	Anlagenbedingte Infrastrukturmängel	
Lasteinschränkungen	Anlagenbedingte Langsamfahrstellen	
Auffällige Bauwerke		

Abbildung 4-1: Zustandsmerkmale von Brücken.

Um die Zustandsmerkmale in die Notenlogik zu übersetzen, wurden entsprechende Metriken definiert. Je nach Ausprägung des Zustandsmerkmals ergibt sich über die Metrik die Zustandsnote. Bei der Zustandskategorie werden über die sogenannten Tripel, bestehend aus aktuellem Zustand und erwartetem Zustand in sechs und achtzehn Jahren, die sich daraus ergebenden Noten definiert (siehe Abbildung 4-2).

Zustands-note	**1**	**1,2**	**1,4**	**1,6**	**1,8**	**2**	**2,5**	**3**	**4**	**5**
Zustands-kategorie	1-1-1	1-1-2	1-2-2	2-2-2	2-2-3	2-3-3	3-3-3	3-3-4	3-4-4	4-4-4

Abbildung 4-2: Notenmetrik für die Zustandskategorie.

Wie in Kapitel 3.1 dargestellt, kann die Entwicklung der Zustandskategorie mittels der UWZ-Modelle prognostiziert werden. Darüber kann die Restnutzungsdauer fortgeschrieben werden. Damit kann die Entwicklung der Zustandsmerkmale prognostiziert werden, die zusammen mit einem Gewicht von mehr als 90% in die Gesamtnote eingehen.

Somit kann bereits mit den vorliegenden Ansätzen eine aussagekräftige Prognose für die Zustandsentwicklung von Brücken unter Berücksichtigung von Maßnahmenoptionen für Erneuerung und Instandhaltung vorgenommen werden. Nachfolgende Abbildung 4-3 zeigt verschiedene Szenarien für die Zustandsentwicklung einer fiktiven Brücke.

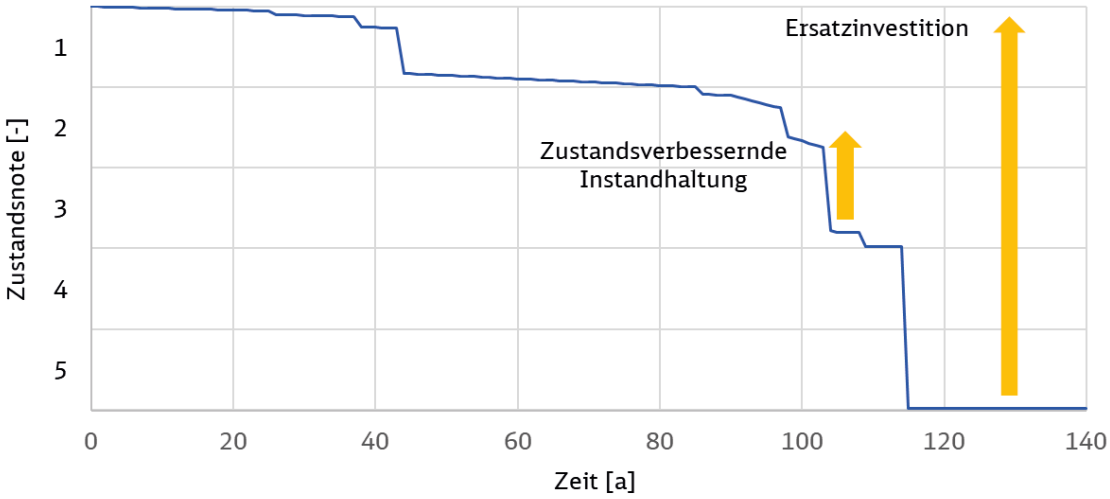


Abbildung 4-3: Zustandsentwicklung für eine Brücke.

5 Fazit

Mit der Netzzustandsnote steht eine transparente und intuitiv verständliche Bewertungsmethodik für einen Großteil der Eisenbahninfrastruktur zu Verfügung. Diese bildet auf Basis zahlreicher Merkmale ein umfassendes Bild des Anlagenzustandes ab. Die unterschiedlichen Gewerke werden durch die entwickelten Algorithmen zur Aggregation und Verrechnung untereinander vergleichbar, sodass auch eine Gesamtnote über die Qualität der Infrastruktur angegeben werden kann. Durch die gewählte Systematik können Auswertungen auf einer Vielzahl möglicher Filterkriterien durchgeführt werden, beispielsweise nach Regionen, Netzsegmenten oder Gewerken.

Die in den letzten Jahren entwickelten und validierten UWZ-Modelle der wichtigsten Zustandsmerkmale wurden zielführend mit der Netzzustandsnotenlogik verknüpft, sodass mit diesen als Kernelement auch eine realitätsnahe Prognose der zukünftigen Zustandsentwicklung möglich ist. Auf Basis hinterlegter Maßnahmen mit deren Wirkungen und Kosten ist das Modell in der Lage, eine Auswahl und Priorisierung vorzunehmen, die einen effizienten Mitteleinsatz gewährleistet.

Damit ist es nun möglich, die Auswirkungen unterschiedlicher Finanzierungsszenarien auf die Qualität der Eisenbahninfrastruktur und damit die Entwicklung der Netzzustandsnote für die kommenden Jahre zu berechnen und darzustellen.

Literatur

[1] T. Jacke, B. Dickenbrok, N. Friesen, A. Grub und N. Nießen, „Ursache-Wirkung-Zusammenhang:Zusammenhang zwischen Mitteleinsatz und Infrastrukturqualität abbilden," *Eisenbahntechnische Rundschau (ETR),* pp. 37-41, 9 2019.

[2] S. Bluhm, C. Wink, B. Dickenbrok, A. Helfenstein und N. Nießen, „Qualität der Eisenbahninfrastruktur - Eine methodische Herangehensweise zur umfassenden Bestimmung des Infrastrukturzustands," in *IRSA 2021 : Tagungsband, Proceedings : 3rd International Railway Symposium Aachen, 21.11.2021-23.11.2021*, Aachen, Deutschland.

[3] C. Wink, S. Bluhm, T. Emunds, B. Dickenbrok und N. Nießen, „Modellierung der Gleislage am Beispiel der Längshöhe für den Ursache-Wirkung-Zusammenhang," *Eisenbahntechnische Rundschau (ETR),* pp. 43-47, 12 2021.

[4] T. Emunds, C. Wink, M. Lempp, K. Monem, B. Dickenbrok und N. Nießen, „Predicting interlocking malfunctions for the railway network in Germany," in *Transport Research Arena Conference, TRA 2022, 14.11.-17.11.2022*, Lissabon, Portugal.

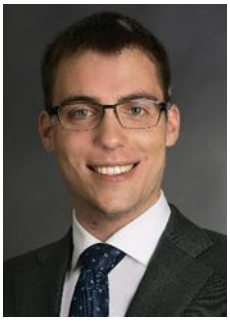
[5] DB Netz AG, *Richtlinie 804.8001: Inspektion von Ingenieurbauwerke. Allgemeine Grundsätze,* 2020.

[6] T. Jacke, B. Dickenbrok, N. Friesen, A. Liebhold und N. Nießen, „Ursache-Wirkung-Zusammenhang zwischen Mitteleinsatz und erzielter Infrastrukturqualität am Beispiel von Brücken," in *IRSA 2019: Tagungsband, Proceedings: 2nd International Railway Symposium Aachen, 26.11.2019-28.11.2019*, Aachen, Deutschland.

Session 15

Christopher Wink, Björn Dickenbrok, Felix Lampe, Martin Lempp, Leonie Meinerzhagen, Tobias Hausberg, Nils Nießen

Autoren



Wink, Christopher

Christopher Wink studierte bis 2019 Mobilität und Verkehr an der RWTH Aachen und arbeitet seitdem als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Verkehrswissenschaftlichen Institut der RWTH Aachen im Bereich Eisenbahnbetriebswissenschaft, welchen er seit 2021 als Gruppenleiter vertritt.

Dickenbrok, Björn

Dr.-Ing. Björn Dickenbrok studierte bis 2004 Bauingenieurwesen an der RWTH Aachen und promovierte anschließend am Verkehrswissenschaftlichen Institut der RWTH Aachen. Seit 2010 arbeitet er bei der DB Netz AG und ist aktuell in der Planung und Segmentsteuerung als Leiter des Projekts „Weiterentwicklung des Ursache-Wirkung-Zusammenhangs für die LuFV III“ tätig.

Lampe, Felix

Felix Lampe studierte bis 2018 Bauingenieurwesen an der RWTH Aachen und arbeitet seitdem als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Verkehrswissenschaftliches Institut der RWTH Aachen im Bereich der Eisenbahnbetriebswissenschaft.

Lempp, Martin

Dr. Martin Lempp studierte bis 2016 Biotechnologie an der Universität des Saarlandes und promovierte anschließend am Max-Planck-Institut für terrestrische Mikrobiologie in Marburg. Von 2020 bis 2023 war er als Data Scientist bei der DB Netz AG im Projekt „Weiterentwicklung des Ursache-Wirkung-Zusammenhangs für die LuFV III“ tätig.

Meinerzhagen, Leonie

Leonie Meinerzhagen studierte bis 2013 Wirtschaftsingenieurwesen mit dem Schwerpunkt Fahrzeugtechnik und Transport an der RWTH Aachen. Nach mehreren Berufsjahren als Vertriebsingenieurin bei der Knorr Bremse AG und Projektleiterin bei der Scheidt und Bachmann GmbH arbeitet sie seit 2023 als Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Verkehrswissenschaftlichen Institut der RWTH Aachen im Bereich der Eisenbahnbetriebswissenschaft.

Session 15

Christopher Wink, Björn Dickenbrok, Felix Lampe, Martin Lempp, Leonie Meinerzhagen, Tobias Hausberg, Nils Nießen

Hausberg, Tobias

Tobias Hausberg studierte bis 2016 Mathematik an der RWTH Aachen und arbeitete darauf als Unternehmensberater an der Digitalisierung von Geschäftsprozessen. Seit 2022 arbeitet er als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Verkehrswissenschaftlichen Institut der RWTH Aachen im Bereich der Eisenbahnbetriebswissenschaft.

Nießen, Nils

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Nils Nießen leitet seit 2013 das Verkehrswissenschaftliche Institut der RWTH Aachen. Nach dem Studium des Bauingenieurwesens und der Wirtschaftsgeographie an der RWTH Aachen promovierte er dort 2008. Anschließend war er Projektingenieur bei HaCon in Hannover und Geschäftsführer der VIA Consulting & Development GmbH.

Session 15
Lea Elfert, Kunibert Lennerts

Wirkungsmodell und Vorgehensweise zur Erarbeitung qualitätsorientierter Instandhaltungsstrategien in der Eisenbahninfrastruktur

Elfert, Lea[1], Lennerts, Kunibert[1]

[1]Institut für Technologie und Management im Baubetrieb, Karlsruher Institut für Technologie

Zusammenfassung

Betreiber von Eisenbahninfrastruktur stehen vor der Herausforderung, die Schienenwege in einem guten Zustand zu erhalten. Dazu ist die Wahl einer geeigneten Instandhaltungsstrategie maßgeblich. Es wird eine Vorgehensweise vorgestellt, mit der auf ein angestrebtes Qualitätsniveau ausgerichtete Instandhaltungsstrategien erarbeitet werden können. Dazu wird zuvor ein Wirkungsmodell vorgeschlagen. Dieser Beitrag stützt sich auf eine systematische Literaturanalyse sowie vorhergehende Forschungsarbeiten zum Ursache-Wirkungs-Zusammenhang zwischen Mitteleinsatz und Infrastrukturqualität.

Keywords: Eisenbahninfrastruktur; Instandhaltungsstrategie; Zustand; Qualität

1 Einleitung

Die Eisenbahninfrastrukturunternehmen in Deutschland sind aufgefordert, die Infrastruktur „in einem qualitativ hochwertigen Zustand zu erhalten bzw. zu verbessern“ [1]. Um dieses Ziel dauerhaft zu erreichen, werden Instandhaltungsstrategien eingesetzt [2]. Auf Basis von vorhergehenden Forschungsarbeiten zum Ursache-Wirkungs-Zusammenhang zwischen Mitteleinsatz und Qualität (siehe [3], [4]) wird nachfolgend ein Vorgehensmodell für die Entwicklung von Instandhaltungsstrategien aufgezeigt, welche

auf das Erreichen eines angestrebten Qualitätsniveaus ausgerichtet sind. Dazu wird zunächst das Begriffsverständnis qualitätsorientierter Instandhaltungsstrategien basierend auf einer systematischen Literaturanalyse geschärft. Darauf aufbauend werden die Abhängigkeiten der Einflussfaktoren in Form eines Wirkungsmodells erläutert. Abschließend wird ein Verfahren vorgestellt, mit dem qualitätsorientierte Instandhaltungsstrategien in der Eisenbahninfrastruktur entwickelt werden können.

2 Forschungsdesign

Ziel des Beitrags ist es, ein Vorgehen vorzustellen, wie qualitätsorientierte Instandhaltungsstrategien entwickelt werden können. Dafür soll die folgende Forschungsfrage beantwortet werden: Welche Konzepte zur qualitätsorientierten Instandhaltungsstrategie finden sich in der Literatur und welche Implikationen ergeben sich daraus für die Erarbeitung einer Vorgehensweise für die Eisenbahninfrastruktur?

Zur Klärung der Forschungsfrage wurde in einem ersten Schritt eine systematische Literaturanalyse durchgeführt. Es wurde nach relevanter Literatur in den Literaturdatenbanken *Scopus* und *Web of Science* gesucht. Dazu wurden die Suchbegriffe „Maintenance“ und „Replacement“ verwendet. Es sollte dabei sichergestellt werden, dass bei den Ergebnissen sowohl Instandhaltung als auch Erneuerung untersucht wurden. Um ausschließlich Untersuchungen zu strategischen Modellen zu finden, wurde der Suchbegriff „Strategy“ verwendet. Mithilfe der Suchbegriffe „Railway“ und „Infrastructure“ wurde auf den Anwendungsbereich eingegrenzt, wobei einer der beiden Suchbegriffe enthalten sein musste, wie in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: In der Literaturanalyse verwendete Suchbegriffe

Aspekt	Suchbegriff
Instandhaltung	Maintenance
Erneuerung	Replace*
Strategie	Strategy
Anwendungsgebiet	Infrastructure OR Railway
Veröffentlichungszeitraum	Since 2017

Um sicherzustellen, dass nur aktuelle Literatur in die Analyse einbezogen wird, wurde nach dem Veröffentlichungszeitpunkt eingegrenzt. Für den Zeitraum 2017 bis Mitte 2023 wurden bei *Scopus* 111 Dokumente und bei *Web of Science* 37 Dokumente gefunden. Nach dem Ausschluss von Duplikaten wurden 113 Quellen untersucht. Die meisten

Dokumente stammen aus den USA (n=28), gefolgt von China (n=12) und Großbritannien (n=9). Auffällig ist, dass nur neun Quellen aus dem deutschsprachigen Raum stammen, davon drei aus Deutschland. Daher wurde neben der strukturierten Suche eine explorative Suche durchgeführt, bei der insbesondere Literatur aus dem Bereich Bahnwesen im deutschsprachigen Raum (DACH) untersucht wurde.

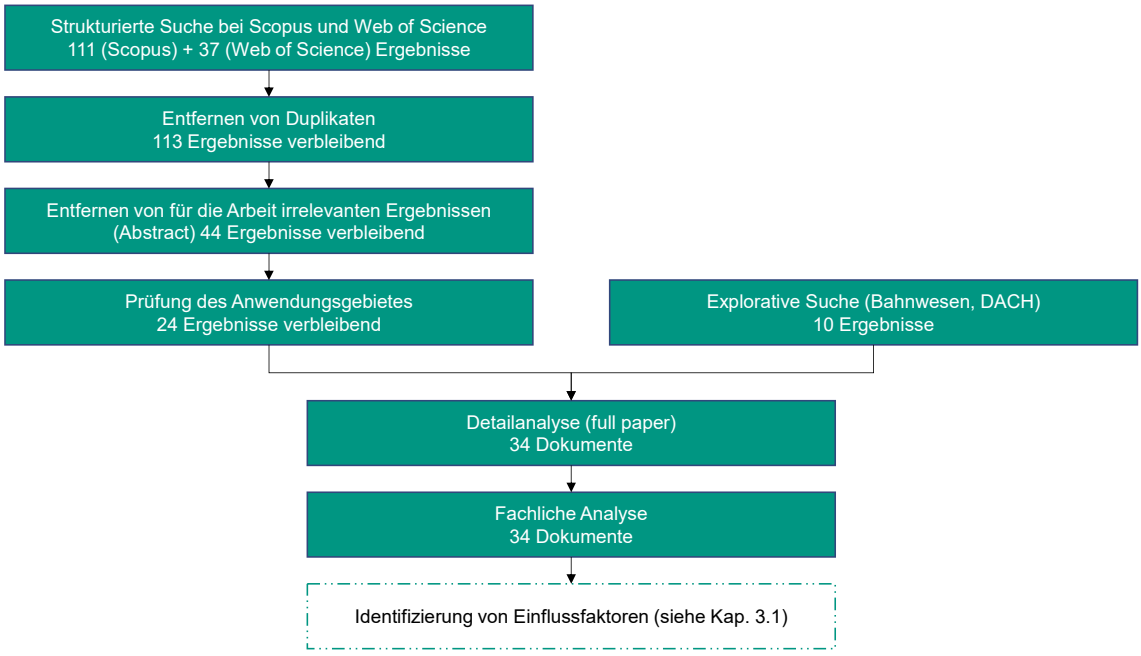


Abbildung 1: Vorgehensweise der Literaturanalyse[1]

Nach der Sichtung und Filterung der Ergebnisse der strukturierten Suche wurden 24 als relevant eingestuft, wie in Abbildung 1 gezeigt wird. Zunächst wurden auf Basis des Abstracts 44 als inhaltlich passend bewertet. Zusätzlich zur Einschränkung des Anwendungsgebietes auf „Railway“ und „Infrastructure“ wurde jedes Paper für die weitere Analyse im Detail bezüglich der Vergleichbarkeit mit Bahnhofsinfrastruktur geprüft. Als vergleichbar mit Bahnhofsinfrastrukturanlagen werden die Bereiche Brücken und Tunnel, Wassersysteme, Straßensysteme und Schieneninfrastruktur angesehen, da diese wie die Bahnhofsinfrastruktur im Wesentlichen bauliche Komponenten der Verkehrsinfrastruktur beinhalten. Viele Autoren aus den genannten Bereichen weisen zudem darauf hin, dass die Modelle für andere Infrastruktursysteme nutzbar sind [5, 6]. Die genannten baulichen Anlagen können zusammengefasst als Infrastrukturanlagen bezeichnet werden. Die meisten Dokumente davon beziehen sich auf Brücken und Tunnel, wie in Abbildung 2 dargestellt.

[1] Eigene Darstellung.

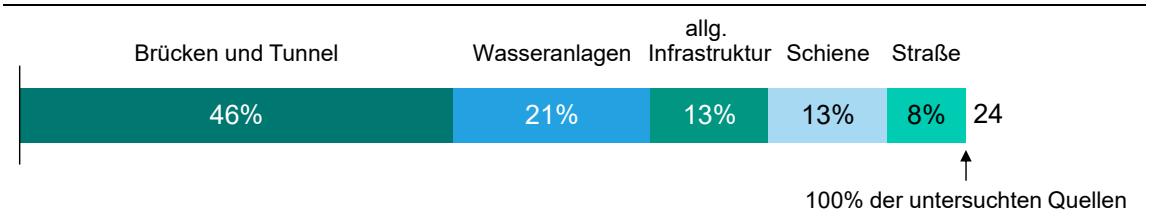


Abbildung 2: Anwendungsbereiche der untersuchten Quellen[2]

Außer den 24 Quellen aus der strukturierten Suche konnten weitere zehn über die explorative Suche identifiziert werden. Bei der anschließenden Detailanalyse wurden somit insgesamt 34 Paper hinsichtlich Methoden, Ergebnissen sowie Problemen untersucht. Abschließend wurde eine fachliche Analyse durchgeführt. Diese beinhaltet eine Kategorisierung nach Instandhaltungsstrategien und Instandhaltungszielen zur Identifizierung von Einflussfaktoren, auf die im folgenden Kapitel eingegangen wird.

3 Ergebnisse und Diskussion

Der erste Teil der Forschungsfrage „Welche Konzepte zur qualitätsorientierten Instandhaltungsstrategie finden sich in der Literatur?“ wird beantwortet, indem die Literatur hinsichtlich der vorgeschlagenen Konzepte und Strategien analysiert wird. Im Ergebnis werden Einflussfaktoren auf die qualitätsorientierten Instandhaltungsstrategien identifiziert.

Gemäß DIN EN 13306 wird unter Instandhaltungsstrategie die „Vorgehensweise des Managements zur Erreichung der Instandhaltungsziele“ [7] verstanden. Dazu werden im vorliegenden Beitrag auch Ersatzmaßnahmen gezählt. Bei der Literaturanalyse wird zunächst untersucht, welche Instandhaltungsziele von den Autoren der untersuchten Quellen genannt werden.

Unter Qualitätsorientierung wird in der vorliegenden Untersuchung die Ausrichtung auf Qualität verstanden. Neben der reinen Produktqualität als Qualitätsbegriff im engeren Sinne können auch die nach DIN 13306 relevanten Instandhaltungsziele Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit, Sicherheit und Umweltschutz als Qualitätsausprägungen im weiteren Sinne im Kontext dieser Arbeit verstanden werden. Damit ergeben sich die Reduzierung von Kosten und die Erhöhung von Qualität als die beiden wesentlichen Ziele von Instandhaltungsstrategien. Daher gilt es die Bedeutung und Zusammenhänge der beiden Begriffe näher zu untersuchen.

[2] Eigene Darstellung.

Zur Beantwortung des zweiten Teils der Forschungsfrage „Welche Implikationen ergeben sich daraus für die Erarbeitung einer Vorgehensweise für die Eisenbahninfrastruktur?“ werden die Einflussfaktoren analysiert und zueinander in Bezug gesetzt. Das Ergebnis dessen ist ein Wirkungsmodell, welches die Zusammenhänge der Einflussfaktoren von Instandhaltungsstrategien und ihre Wirkung auf die Qualität beschreibt. Auf dieser Basis wird ein Vorgehensmodell vorgeschlagen, das die Implikationen für die Erarbeitung von Instandhaltungsstrategien verdeutlicht.

3.1 Einflussfaktoren qualitätsorientierter Instandhaltungsstrategien

Die Norm DIN EN 13306 nennt mögliche Instandhaltungsziele, die mit Instandhaltungsstrategien verbunden sein können. Von den Autoren der untersuchten Literatur werden davon Kostenreduzierung (z. B. bei [8]), Produktqualität (z. B. bei [9]) und Verfügbarkeit (z. B. bei [5]) am häufigsten genannt, wie in Abbildung 3 dargestellt. Es wird auch darauf hingewiesen, dass das Hauptziel der Instandhaltungsstrategie ist, das Optimum zwischen Kosten und Nutzen zu erreichen [9, 10].

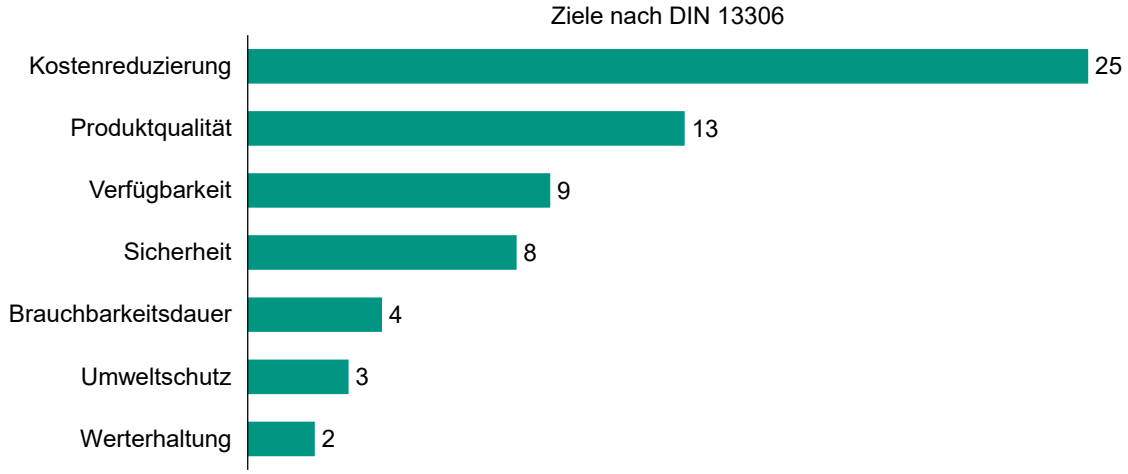


Abbildung 3: Häufigkeit der in der untersuchten Literatur genannten Ziele von Instandhaltungsstrategien[3]

Die Produktqualität der hier relevanten Infrastrukturanlagen wird von den Autoren der untersuchten Quellen als der Zustand der Anlagen definiert. Die Verschlechterung des Zustandes wird in der Literatur als Degradation bezeichnet [9]. Verschiedene Modelle werden verwendet, um den Verlauf der Verschlechterung bzw. die Leistungsvorhersage von Anlagen wie bei Santamaria et al. [11] zu beschreiben.

[3] Eigene Darstellung.

Dabei finden sowohl stochastische als auch deterministische Modelle Anwendung [12]. So gehen für die Zustandsverschlechterung von Brücken beispielsweise Alsharqawi et al. von einem stochastischen Verhalten aus [13]. Mithilfe der Degradationsmodelle können neben der reinen Zustandsentwicklung verschiedene Niveaus von Qualität beschrieben werden. Einige Autoren nutzen dieses Konzept, um sog. Schwellenwerte zu definieren (z. B. [9]). Die Schwellenwerte dienen als Anhaltspunkt, ab wann Instandhaltungsmaßnahmen durchgeführt werden [14] oder um Leistungs- bzw. Qualitätsniveaus im Sinne von Anforderungsniveaus zu definieren [13]. Damit kann ausgedrückt werden, ob Zustandsanforderungen erfüllt werden. Auch werden sog. Leistungsindikatoren verwendet, um den Zustand qualitativ oder quantitativ wiederzugeben [9, 11]. Damit kann eine konsistente Qualitätsdefinition sichergestellt werden. In Kombination mit anderen Variablen wie z. B. der strategischen Bedeutung können daraus Priorisierungen mithilfe von Priorisierungsindizes abgeleitet werden, die eine Rangfolge für Instandhaltungsmaßnahmen ermöglichen [15].

Der zweite relevante Aspekt sind die Kosten, die durch die Umsetzung von Instandhaltungsstrategien entstehen. Diese werden ermittelt, indem die Kosten der Instandhaltungsmaßnahmen, die zur Erreichung der Instandhaltungsstrategie erforderlich sind, berechnet werden [15]. Dazu zählen die Maßnahmen, die entgegen der Zustandsverschlechterung wirken und die Nutzung der Anlagen durchgängig ermöglichen [16].

Zur Findung der unter den Gesichtspunkten Kosten und Nutzen optimalen Strategie werden die Kosten für die Instandhaltungsmaßnahmen und die Kosten, die durch den Ausfall der Anlagen verursacht werden, abgewogen [5, 17]. Dazu ist es notwendig, die Folgekosten eines Ausfalls zu bestimmen. Wenn dies nicht möglich ist oder keine Folgekosten entstehen, bedarf es anderer Entscheidungskriterien. So stellen die Autoren in [18] die Gesamtkosten für Instandhaltung der Systemverfügbarkeit gegenüber. Die Autoren liefern hierbei einen Ansatz, um den Zielkonflikt zwischen Kosten und Qualität von Stromerzeugungsanlagen zu lösen.

Wenig beschrieben wird in der Literatur der direkte Zusammenhang zwischen Kosten und Qualität für Infrastrukturanlagen [3]. Für die Eisenbahninfrastruktur in Deutschland waren die Eisenbahninfrastrukturunternehmen aufgefordert, einen wissenschaftlich belastbaren Zusammenhang herzustellen [1]. Für die bestehenden Qualitätskennzahlen der Bahnhofsinfrastruktur „Bewertung AnlagenQualität“ und „Funktionalität Bahnsteige und weitreichende Barrierefreiheit“ ist der Zusammenhang hergestellt worden (siehe [3]). Mithilfe des in [3] vorgeschlagenen Modells ist es möglich, für die Bahnhofsinfrastruktur

bei gegebenem Qualitätsziel die erforderlichen Kosten zu ermitteln sowie bei gegebenen Kosten die erzielbare Qualität zu berechnen [3]. Besonders relevant für die Erreichung von Qualitätszielen hat in dieser Modellierung die Priorisierungslogik [19]. Jacke et al. haben zuvor ein ähnliches Modell u. a. für die Module Gleise und Brücken entwickelt [4, 20].

Zusammenfassend wird deutlich, dass auf die Bestimmung von Instandhaltungsstrategien die Faktoren Kosten und Qualität sowie die dazugehörigen Methoden zur Ermittlung einen wesentlichen Einfluss haben. Die Analyse der Literatur zeigt, dass sich die identifizierten Faktoren gegenseitig beeinflussen. Mithilfe der Instandhaltungsstrategien können unterschiedliche Qualitätsniveaus erreicht werden, die definierte Kosten nach sich ziehen. Dies deutet darauf hin, dass bei der Wahl der Instandhaltungsstrategie alle genannten Parameter zu untersuchen sind.

3.2 Wirkungsmodell qualitätsorientierter Instandhaltungsstrategien

Die Analyse der Einflussfaktoren zeigt, dass Instandhaltungsstrategien Rahmenbedingungen und Abhängigkeiten in Bezug auf ihre Ziele unterliegen. Das Wirkungsmodell in Abbildung 4 soll diese Zusammenhänge aufzeigen.

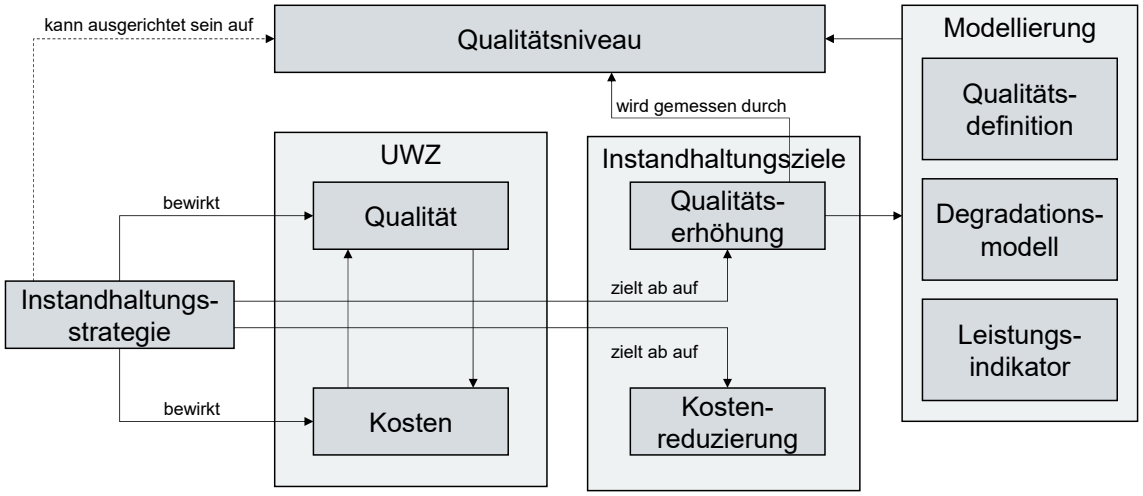


Abbildung 4: Wirkungsmodell qualitätsorientierter Instandhaltungsstrategien[4]

Die gewählte Instandhaltungsstrategie beeinflusst Kosten und Qualität, die bezogen auf die Bahnhofsinfrastruktur in einem Ursache-Wirkungs-Zusammenhang (UWZ) stehen.

[4] Eigene Darstellung.

Als wesentliche Ziele der Instandhaltung können dabei Qualitätserhöhungen und/oder Kostenreduzierungen angestrebt werden. Für das Verständnis von qualitätsorientierten Instandhaltungsstrategien wird nachfolgend die Qualitätsebene näher beschrieben.

Die Modellierung der Qualitätsperspektive erfolgt mithilfe einer konsistenten Qualitätsdefinition sowie über Degradationsmodelle und Leistungsindikatoren. Gemessen werden kann das Ziel der Qualitätserhöhung durch die Ausweisung von Qualitätsniveaus (siehe Kap. 3.1). Damit kann geschlussfolgert werden, dass qualitätsorientierte Instandhaltungsstrategien auf Qualitätsniveaus ausrichtbar sein müssen.

Für die Beantwortung der Forschungsfrage werden die herausgearbeiteten Implikationen auf die Erarbeitung von qualitätsorientierten Instandhaltungsstrategien in Anforderungen und Vorgehensweise unterteilt. Als Anforderungen für die Erarbeitung solcher Strategien ergeben sich:

- Konsistente Qualitätsdefinition,
- Messung der definierten Qualität mithilfe von Leistungsindikatoren,
- Modellierung des Qualitätsverlaufs mithilfe von Degradationsmodellen und
- Ausweisung von Qualitätsniveaus.

Es kann daraus abgeleitet werden, dass die Qualitätswirkung von Instandhaltungsstrategien unter diesen Voraussetzungen und bei Anwendung auf einen Datensatz simulierbar ist. Um die Instandhaltungsstrategien zu modellieren, müssen Priorisierungskriterien definiert werden. Dies ist erforderlich, wenn nicht unendliches Budget zur Verfügung steht.

Es gibt verschiedene Priorisierungsmöglichkeiten, die von den Kriterien abgeleitet werden können, die die Instandhaltungstätigkeiten determinieren. Instandhaltungstätigkeiten können an verschiedenen Anlagen, zu verschiedenen Zeitpunkten, verschiedener Art und unter Verfolgung verschiedener Ziele durchgeführt werden. In Anlehnung an semantische Funktionen können die Priorisierungskriterien in lokal, temporal, modal und kausal unterteilt werden, wie in Abbildung 5 dargestellt.

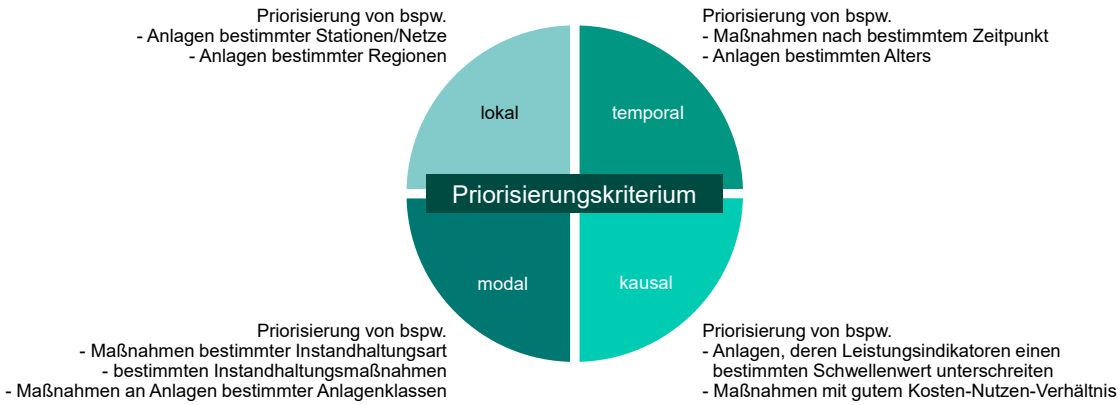


Abbildung 5: Priorisierungskriterien von qualitätsorientierten Instandhaltungsmaßnahmen[5]

Unter lokalen Kriterien können Anlagen bestimmter Stationen, Netze, Regionen oder anderer lokaler Cluster zusammengefasst werden. Zum Beispiel können Stationen eines Bundeslandes oder Anlagen des sog. Hochleistungsnetzes priorisiert werden. Unter dem temporalen Kriterium können zeitabhängige Maßnahmen verstanden werden, wenn beispielweise nach Ablauf der Nutzungsdauer Komponenten einer Anlage getauscht werden. Das modale Kriterium kann für die Art der Maßnahme herangezogen werden, wenn beispielweise präventive Instandhaltung priorisiert wird oder Maßnahmen zur Herstellung von Barrierefreiheit. Mithilfe des kausalen Kriteriums können Maßnahmen mit einer bestimmten Wirkung priorisiert werden. Dies können beispielsweise Maßnahmen sein, die die größte Verbesserung der Leistungsindikatoren bewirken oder die das geringste Budget für ein bestimmtes Qualitätsniveau erfordern. Die genannten Priorisierungskriterien können auch kombiniert werden.

Auch kann beispielsweise das Budget in Teilbudgets aufgeteilt werden, sodass in den jeweiligen Teilbudgets unterschiedliche Priorisierungskriterien angewendet werden können.

Die Priorisierung von Maßnahmen oder Anlagen zieht unter Umständen den Ausschluss anderer Anlagen und/oder Maßnahmen nach sich. Daher ist die Auswahl so zu treffen, dass die Betreiberverantwortung und die Durchführung von sicherheitsrelevanten Maßnahmen stets sichergestellt werden. Das kann modelliert werden, indem ein Qualitätsniveau als Mindestanforderung definiert wird.

[5] Eigene Darstellung.

3.3 Vorgehensweise zur Erarbeitung qualitätsorientierter Instandhaltungsstrategien

Auf Basis des Wirkungsmodells kann die Vorgehensweise zur Erarbeitung von auf ein Qualitätsziel ausgerichteten Instandhaltungsstrategien entwickelt werden, wie in Abbildung 6 dargestellt. Damit können verbesserte Instandhaltungsstrategien erarbeitet werden, um zuvor definierte Qualitätsziele zu erreichen. In der Umsetzung können, statt auf das Anlagenverhalten zu reagieren, proaktiv Instandhaltungsmaßnahmen identifiziert werden.

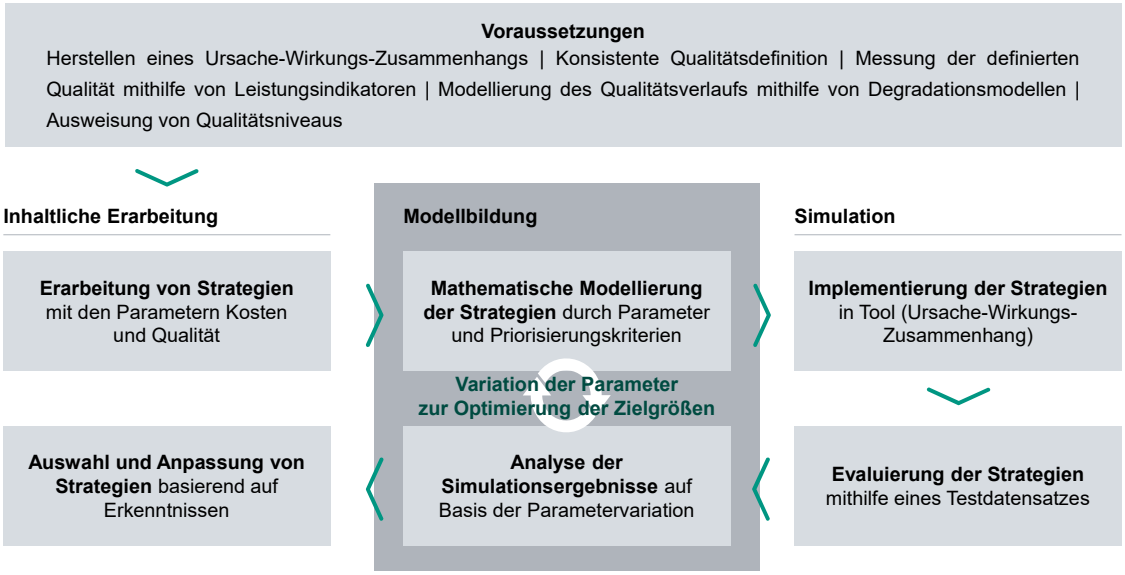


Abbildung 6: Vorgehensweise zur Erarbeitung qualitätsorientierter Instandhaltungsstrategien[6]

Die Grundlage zur Erarbeitung einer auf die Qualität ausgerichteten Strategie ist das Herstellen eines Ursache-Wirkungs-Zusammenhangs zwischen Mitteleinsatz und Infrastrukturqualität. Damit wird die Basis geschaffen, um instandhaltungsbasierte Verbesserungen simulieren zu können. Wie in Abschnitt 3.2 beschrieben, muss eine Vielzahl an Voraussetzungen erfüllt werden. Dazu ist zunächst eine konsistente Qualitätsdefinition zu erarbeiten, wobei die Qualität in Form von Leistungsindikatoren messbar gemacht werden muss. Die Degradation der Anlagen ist über ein zum Anlagenportfolio passendes Modell zu beschreiben. Außerdem sind Qualitätsniveaus der Leistungsindikatoren zu definieren, d. h. es ist zu bestimmen, wann ein Qualitätsziel in

[6] Eigene Darstellung.

Form des Leistungsindikators erreicht wird und wie sich dieses über die Zeit bzw. das Portfolio entwickelt.

Im nächsten Schritt sind mögliche Instandhaltungsstrategien zu parametrisieren, um deren Auswirkungen mithilfe des UWZ zu simulieren. Für die Parametrisierung sind insbesondere Kosten und Qualitätsauswirkungen der einzelnen Instandsetzungsmaßnahmen aber auch Eigenschaften der Anlagen wie z. B. das Alter heranzuziehen. Mithilfe von Priorisierungskriterien in Bezug auf diese Parameter können dann zuvor erarbeitete Instandhaltungsstrategien modelliert werden. Es können lokale, temporale, modale und kausale Priorisierungskriterien verwendet werden. Diese können auch kombiniert werden oder verschiedene Kriterien auf einzelne Teilbudgets bezogen werden. Daneben können Strategien auch anhand von Operations-Research-Ansätzen modelliert werden, z. B. als Rucksackproblem [21].

Mithilfe eines Testdatensatzes sind die Strategien zu evaluieren. Die Simulationsergebnisse können anschließend analysiert und die Parameter auf Basis dieser Ergebnisse variiert werden. Durch Iteration des Prozesses können geeignete Strategien herausgearbeitet und Handlungsempfehlungen abgeleitet werden.

4 Fazit und Ausblick

Der vorliegende Beitrag zeigt die für qualitätsorientierte Instandhaltungsstrategien der Eisenbahninfrastruktur relevanten Einflussfaktoren auf. Es wird ein Wirkungsmodell und eine daraus abgeleitete Vorgehensweise vorgestellt, unter deren Zuhilfenahme qualitätsorientierte Instandhaltungsstrategien für die Eisenbahninfrastruktur entwickelt werden können.

Auf Basis einer systematischen Literaturrecherche wird zunächst das Begriffsverständnis geschärft. Es wird für qualitätsorientierte Instandhaltungsstrategien aufgezeigt, welchen Einflussfaktoren und Rahmenbedingungen sie unterliegen. Die Analyse zeigt, dass die wesentlichen Einflussfaktoren aus den Bereichen Kosten und Qualität stammen. Die identifizierten Parameter werden in einem Wirkungsmodell in einen Zusammenhang gebracht. Das Wirkungsmodell zeigt, dass qualitätsorientierte Instandhaltungsstrategien durch die Ausrichtung auf ein angestrebtes Qualitätsniveau entwickelt werden können. So können definierte Werte vorab bestimmter Leistungsindikatoren erreicht werden. Aus dem Wirkungsmodell heraus wird eine Vorgehensweise zur Erarbeitung von qualitätsorientierten Instandhaltungsstrategien vorgeschlagen. Mithilfe eines Ursache-Wirkungs-Zusammenhangs zwischen Mitteleinsatz und Infrastrukturqualität sowie unter

Erarbeitung von Priorisierungskriterien können konsistente fachliche oder algorithmenbasierte Strategien entwickelt werden.

Das Vorgehensmodell selbst stellt einen ersten Schritt hin zur systematischen Entwicklung von Instandhaltungsstrategien dar.

Damit können verbesserte Strategien entwickelt werden, mit denen zuvor definierte Zielwerte des Anlagenzustands erreicht werden können. Es kann in der Umsetzung vermieden werden, dass auf die Veränderung des Anlagenzustands reagiert werden muss, um Zielwerte einzuhalten. Vielmehr kann proaktiv eine auf das Qualitätsziel ausgerichtete Strategie mit den entsprechenden Maßnahmen angewendet werden.

Im nächsten Schritt soll das Vorgehensmodell zur Anwendung gebracht werden und die Wirksamkeit anhand eines Fallbeispiels der Bahnhofsinfrastruktur untersucht werden.

Weiterer Forschungsbedarf besteht darin, die erarbeiteten Strategien vergleichbar und die geeignetste Strategie identifizierbar zu machen.

Literatur

[1] Eisenbahn-Bundesamt (Hrsg.): *Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung III (LuFV III)*. 2020

[2] Schubert, Christopher; Heckmann, Mark; Höhn, Steffen; von Pappritz, Julien; Elfert, Lea: *Investitions- und Instandhaltungsstrategie von Personenbahnhöfen*. In: *Der Eisenbahningenieur* 71 (2020), Nr. 10, S. 35–39

[3] Heckmann, Mark; Elfert, Lea; Höhn, Steffen; Schubert, Christopher; Aktas, Hakan; Dittberner, Friederike; Grob, Felix; Lampe, Felix; Nießen, Nils: *Ursache-Wirkungs-Zusammenhang zwischen Mitteleinsatz und erzielbarer Anlagenqualität am Beispiel von Verkehrsstationen*. In: de Doncker, Rik W.; Nießen, Nils; Friesen, Nadine; Schindler, Christian (Hrsg.): *IRSA 2021: Tagungsband, Proceedings: 3rd International Railway Symposium Aachen, 21-23 November 2021*. Aachen: RWTH Aachen University, 2022, S. 334–349

[4] Jacke, Tobias; Dickenbrok, Björn; Friesen, Nadine; Liebhold, Alexandra Angelika; Nießen, Nils: *Ursache-Wirkung-Zusammenhang zwischen Mitteleinsatz und erzielter Infrastrukturqualität am Beispiel von Brücken*. In: de Doncker, Rik W.; Nießen, Nils; Schindler, Christian Franz Wilfried (Hrsg.): *IRSA 2019: Tagungsband, Proceedings: 2nd International Railway Symposium Aachen, 26-28 November 2019*. Aachen: RWTH Aachen University, 2020, S. 28–42

[5] Shang, Yue; van den Boomen, Martine; Man, Amy de; Wolfert, ARM: *Reliability-based life cycle costing analysis for embedded rails in level crossings*. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 234 (2020), Nr. 8, S. 821–833

[6] Zhang, Yan; Chouinard, Luc E.; Power, Gabriel J.; Conciatori, David; Sasai, Kotaro; Bah, Abdoul S.: *Multi-objective optimization for the sustainability of infrastructure projects under the influence of climate change*. In: *Sustainable and Resilient Infrastructure* 8 (2023), Nr. 5, S. 492–513

[7] Deutsches Institut für Normung e. V.: *DIN EN 13306:2018-02, Instandhaltung - Begriffe der Instandhaltung; Dreisprachige Fassung EN 13306:2017*

[8] Nimmahnpatchrin, Wisalee; Gad, Ghada M.: *Bridge maintenance decision-making model*. In: *Proceedings of International Structural Engineering and Construction* 8 (2021), Nr. 1

[9] Santos, C.; Santamaria-Ariza, M.; Coelho, M.; Sousa, H.; Matos, J. C.: *Stochastic methodology to forecast concrete deterioration based on corrosion mechanisms*. In: *2021 fib Symposium of Concrete Structures* (2021), S. 1519–1528

[10] Veit, Peter: *Instandhaltung und Anlagenmanagement des Fahrwegs*. In: Fendrich, Lothar; Fengler, Wolfgang (Hrsg.): *Handbuch Eisenbahninfrastruktur*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019, S. 1003–1050

[11] Santamaria Ariza, Monica; Zambon, Ivan; Sousa, Hélder S.; Campos e Matos, José António; Strauss, Alfred: *Comparison of forecasting models to predict concrete bridge decks performance*. In: *Structural Concrete* 21 (2020), Nr. 4, S. 1240–1253

[12] Santamaria, Monica; Fernandes, João; Campos e Matos, José: *Overview on performance predictive models – Application to Bridge Management Systems*, Bd. 2019. In: *IABSE Symposium, Guimarães 2019: Towards a Resilient Built Environment Risk and Asset Management*: International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE) Zurich, Switzerland, 2019, S. 1222–1229

[13] Alsharqawi, M.; Abu Dabous, S.; Zayed, T.; Hamdan, S.: *Budget Optimization of Concrete Bridge Decks under Performance-Based Contract Settings*. In: *Journal of Construction Engineering and Management* 147 (2021), Nr. 6

[14] Redondin, Maxime; Bouillaut, Laurent; Daucher, Dimitri; Faul, Nadège: *A systematic replacement strategy in the context of a strongly censored lifetime. Application to road markings*. In: Beer, Michael; Zio, Enrico (Hrsg.): *Proceedings of the 29th European Safety and Reliability Conference (ESREL)*. Singapore: Research Publishing Services, 2019, S. 467–474

[15] Echaveguren, Tomás; Dechent, Peter: *Allocation of bridge maintenance costs based on prioritization indexes*. In: *Revista de la construcción. Journal of Construction* 18 (2019), Nr. 3, S. 568–578

[16] Dickenbrok, Björn: *Wirtschaftliche Bewertung von Infrastrukturmaßnahmen zur Anpassung der Streckenleistungsfähigkeit auf Grundlage einer integrierten Systembetrachtung*. Aachen, 2012

[17] Meegoda, J. N.; Juliano, T. M.; Potts, L.; Tang, C.; Marhaba, T.: *Implementation of a drainage information, analysis and management system*. In: *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)* 4 (2017), Nr. 2, S. 165–177

[18] Teodoro-Filho, A.M.; da Costa-Lima, G.A.; Costa, L.A.N.; Marinho, F.C.; Prestes, A.: *Asset replacement decisions: A Markowitz efficient frontier approach to*

evaluate the trade-off between total costs and system availability. In: Barros, Anne; van Gulijk et al. (Hrsg.): *Safety and Reliability - Safe Societies in a Changing World* : *Proceedings of ESREL 2018, June 17-21, 2018, Trondheim, Norway*. London: Taylor & Francis, 2018, S. 127–133

[19] Maus, Maren; Lampe, Felix; Friesen, Nadine; Heckmann, Mark; Elfert, Lea; Nießen, Nils: *Degradation functions for railway station equipment quality based on maintenance-influenced data*. In: *2021 IEEE 17th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)* : *23-27 Aug. 2021*: IEEE, 2021

[20] Jacke, Tobias; Dickenbrok, Björn; Friesen, Nadine; Grub, Alexandra; Nießen, Nils: *Ursache-Wirkung-Zusammenhang: Zusammenhang zwischen Mitteleinsatz und Infrastrukturqualität abbilden*. In: *Eisenbahntechnische Rundschau* (2019), Nr. 9, S. 37–41

[21] Fecarotti, C.; Andrews, J.: *Optimising strategy selection for the management of railway assets*. In: *Stephenson Conference: Research for Railways* (2017)

Autoren

Elfert, Lea

Lea Elfert ist Doktorandin am Karlsruher Institut für Technologie und verantwortet als Projektleiterin bei der DB Station&Service AG mit dem Projektteam die Themen Ursache-Wirkungs-Zusammenhang und Zustandsnote. Sie studierte Facility Management an der Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin und der Beuth Hochschule für Technik Berlin.

Lennerts, Kunibert

Prof. Dr.-Ing. Kunibert Lennerts ist seit dem Jahr 2000 Professor für Facility Management am Karlsruher Institut für Technologie. Er wurde für diese erste deutsche Universitätsprofessur für Facility Management berufen, nachdem er als Bereichsleiter Immobilienmanagement/Facility Management in der Zentrale der Deutsche Bahn Immobiliengesellschaft mbH tätig war.

IRSA 2023

SESSION 16

DEKARBONISIERUNG
DECARBONISATION

Session 16
Heleni Pantelidou, Elisa Christin, Jörg Obergfell, Max Hemmerle, Jessica Rempel

The role of rail for a decarbonised transport in a changing climate: Balancing capital carbon investment with carbon reduction from modal shift

Pantelidou, Heleni[1]; Christin, Elisa[2]; Obergfell, Jörg[2]; Hemmerle, Max[2]; Rempel, Jessica[2]

[1]Arup Group Limited
[2]Arup Deutschland GmbH

Summary

On behalf of Arup Group Limited and Arup Deutschland GmbH, Max Hemmerle has the pleasure to be presenting the present paper for contributing to the decarbonisation topic of the 4th International Railway Symposium Aachen (IRSA), discussing "the role of rail for a decarbonised transport in a changing climate: balancing capital carbon investment with carbon reduction from modal shift".

Keywords: Modal shift, Transport decarbonisation, Transport mode efficiency, Interchanges points

1 Introduction

1.1 The Intergovernmental Panel for Climate Change report

The Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC) 6th Assessment report [1] published in April 2022, acknowledges that there is a need for systemic change in the way we move, and that "interventions that support a modal shift away from private motor vehicles towards walking, cycling, and low emissions shared, or public transportation" constitute a fundamental step to achieving the climate goals set by the Paris Agreement. Drastic and sustained mitigation policies must be implemented to manage the high increase of transport emissions, projected by the IPCC (2014) to increase at a faster rate

than other energy end-use sectors and reach 12 Gt CO2eq/yr by 2050 [2]. This is partly due to rising income and increased development of infrastructure, highlighting the need for policies to adopt models that integrate infrastructural and behavioural changes, rather than conservative transport models [2].

To drive the transition towards a climate neutral transport system, the European Union (EU) plans to increase energy efficiency through all modes of transport and to enable better modal choices and promote a model shift by making sustainable choices widely available. Digitalisation and automation are crucial to underpin the creation of intelligent, connected, and multimodal mobility. To achieve this, incentives shall be set up in the right places, funding shall be provided and targeted investments shall implement the Union's strategy [3].

1.2 Transport-related climate targets in the European Union

To achieve the European Union 2030 & 2050 greenhouse gas (GHG) emission reduction targets, the EU transport network aims to grow transport and supporting mobility while reaching a 90% emission reduction target of GHGs by 2050 [3]. A major challenge is to break the transport system's dependence on fossil fuels and improve its efficiency without compromising mobility. New transport patterns must emerge, according to which larger volumes of freight and greater numbers of travellers are carried jointly to their destination by the most efficient (combination of) modes. These patterns must rely on several strands: improving energy efficiency, optimising performance of multimodal logistic chains and improving multi-modal use of transport and infrastructure through effective traffic management and intelligent information systems [4].

In 2011, the European Commission (EC) set out plans to set a target of revitalizing rail freight transport throughout the EU to reach a 30% modal share by 2030 — and to increase this to more than 50% by 2050 [5]. Indeed, the EC's mobility strategy projects a future with sustainable transport models if we achieve the projected plans to double traffic on high-speed rail 2030, and double rail freight traffic by 2050 [4].

On a national level, different governments are prioritising their transport pipeline to align with the net zero transition. For example, the United Kingdom (UK) put in place the following decarbonisation plan for transport (Figure 1), in which the carbon reduction strategic outcome result from the projected modal shift from cars and road freight to increasing rail networks (electric). We observe that this approach is generally similar

between different European countries, that aim to achieve their carbon savings through

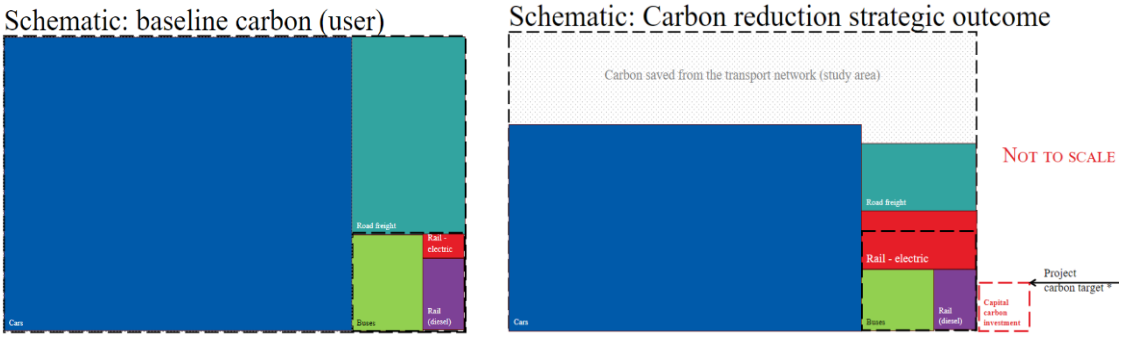


Figure 1: Schematic Baseline Carbon per user and strategic target (UK) [20]

the electric rail transport.

1.3 Transport-related climate targets in Germany

Germany has set ambitious environmental targets and developed a strategy to tackle the challenges of the transport sector's contribution to climate change. As a major emitter of greenhouse gases, the transport sector plays a crucial role in achieving Germany's commitment to international climate agreements, including the European Climate Law.

Germany targets are aligned with the EU decarbonisation strategy, even setting more ambitious goals, aiming to achieve climate neutrality by 2045 and a reduction of transport related GHG emissions by 88% compared to the level of 1990 [6]. However, the transport sector is struggling to achieve its goals – the level of transport-related GHG emissions has increased by 7 percent compared to the level of 1990, being the only sector unable to reduce emissions. [6].

In spite of the presence of numerous national and EU-wide legal regulations and policies aimed at curtailing GHG emissions, including the Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG), the Bundesverkehrswegeplan (BVWP) and the National Emissions Trading System (ETS), the Federal Environmental Agency “Umweltbundesamt” (UBA) has declared that “the approaches are far from sufficient to achieve the climate protection targets by 2030 and to transform transport into a climate-neutral sector” [7]. This trend is also reflected in the projections presented in the “Projektionsbericht 2021 für Deutschland” [7].

Figure 2 illustrates the emission limits set within the KSG and highlights the transport related GHG emission overspend between 2020 and 2030 according to the Projektionsbericht 2021, published by the UBA [3]. The emission limits required to achieve CO2 neutrality by 2045 are illustrated in green. Estimated actual transport-related emissions as per the Projektionsbericht 2021 are presented in pink, with an estimated annual overspend of transport-related emissions at 42 Gt CO2-euqivalent in 2030. It can be seen how drastic the drop in emissions must be in order not to exhaust the given carbon budget.

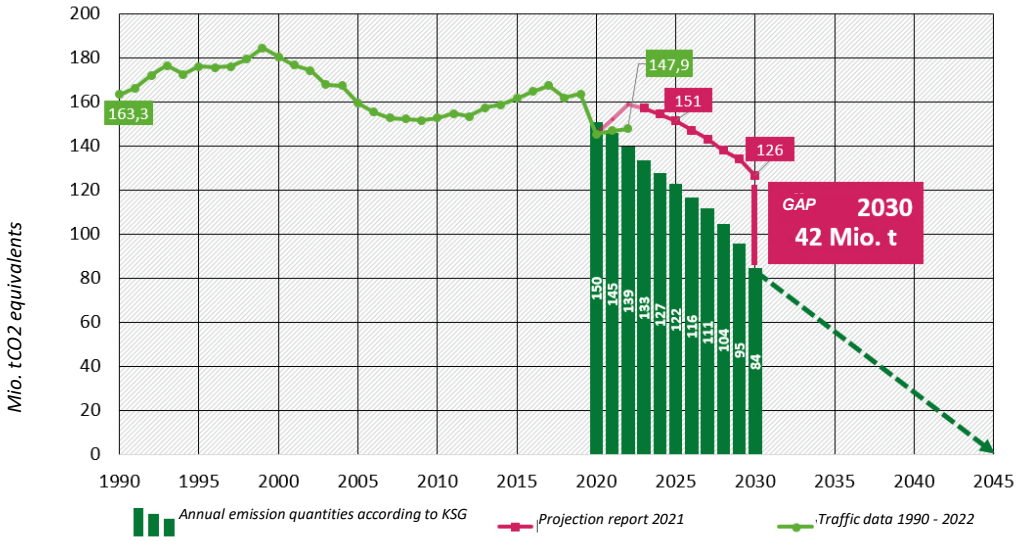


Figure 2: Development and target achievement of greenhouse gas emissions in Germany in the transport sector of the Climate Protection Act [6]

In summary, European countries all have ambitious goals to decarbonise the transport sector. Despite large investments, carbon reduction targets are yet far from being met. The following chapter challenges the current approach in measuring carbon reduction and proposes a consistent approach to successfully lead us to our decarbonisation targets.

2 Decarbonisation in the railway sector

2.1 The transport infrastructure Life Cycle Assessment

Measuring and monitoring our emissions is critical to reducing our carbon impacts and achieving those targets – otherwise we will not know whether our interventions are delivering the desired change and whether we are focusing efforts in the most effective way. Lifecycle carbon metrics are often at an asset level, with linked functional units and

captured at different work stages. In the infrastructure sector, direct and indirect GHG emissions can be assessed by point of occurrence.

The construction, operation, maintenance, and eventual disposal of transport infrastructure all result in GHG emissions. Whilst capital carbon refers to emissions associated with the creation of an asset, operational carbon describes emissions associated with the operation and maintenance of an asset. User carbon describes the emissions caused by the movement of people and goods within the transport network.

Therefore, full accounting of Life Cycle Assessment (LCA) emissions from a transport-perspective requires these infrastructure-related emissions (capital and operational) to be included along with those from vehicles and their fuel consumption (user carbon).

2.2 Whole life carbon split for different transport infrastructure and different scopes emission

It is essential to understand how decarbonisation can be achieved with a change in modal shift, where capital and operational carbon are very different for each transport mode. User carbon varies significantly between modes due to varying energy efficiencies between different transport modes.

Our experience in designing transport infrastructure has shown that capital carbon from the construction of a railway is considerable and a significant proportion of the whole life

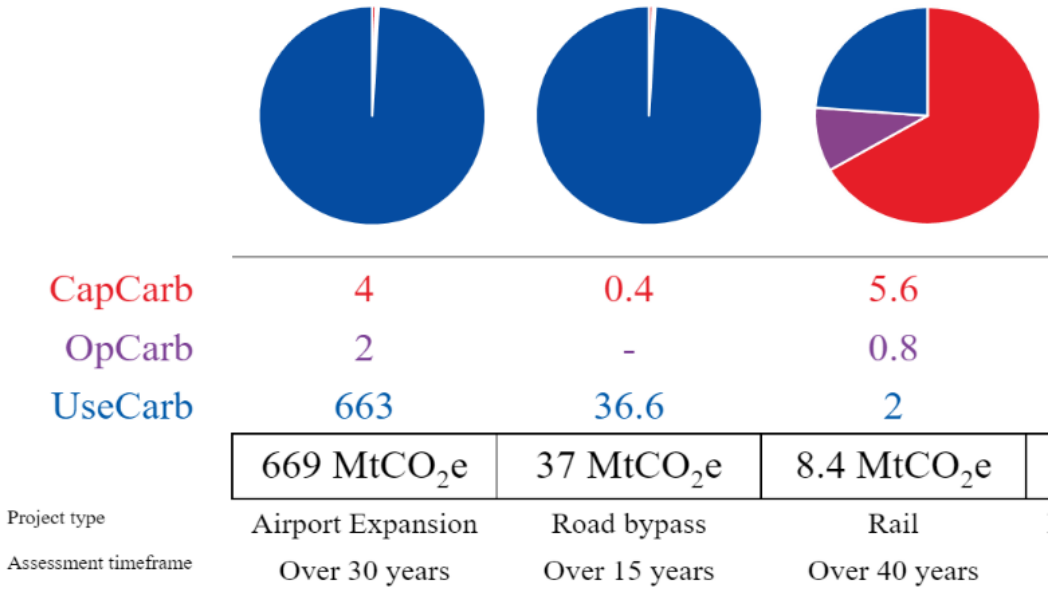


Figure 3: Whole life carbon split for different transport infrastructure [2]
(All values have been taken from confidential projects and cannot be disclosed in further detail.)

carbon (capital + operational + user carbon). In contrast, the capital carbon emissions for a road or airport scheme takes a much smaller proportion of the whole life carbon compared to the same categories for rail schemes. Once in operation, the proportion of the user and operational carbon emissions to capital emissions for rail infrastructure is significantly lower than the same relation for road or airport infrastructure, as illustrated in Figure 3. Whilst the three modes shown in the graph cannot be compared by use or size, the graph highlights that once the upfront carbon investment (capital carbon) is completed, the relative proportion of user and operational carbon is significantly lower in rail projects compared to the same proportion for air and road infrastructure.

The difference in user carbon between modes is evident when considering energy efficiency by mode. As described in "Re-thinking UK transport emissions – getting to the 2050 targets" [8] passenger trains consume significantly less energy per passenger-km compared to the energy consumption per passenger-km travelled on road or by air. Further, moving goods on the road or by air, the dominant form of freight transport, is ten times less efficient per ton-km travelled compared to goods moved by rail or ship. This is due to a significantly higher energy consumption despite similar speed and charge.

Ultimately, alignment of growth with emissions reduction targets must be realised across all infrastructure sectors for both passenger and freight transport, supported by a holistic approach going beyond regulatory boundaries to deliver meaningful decarbonisation.

2.3 Modal shift concept and system thinking

A modal shift, defined as the "growth in the demand of a transport mode at the expense of another" [9], requires a fundamental shift of the carbon management philosophy towards systems-thinking. This means that every asset should be treated as part of the system to which it belongs. It cannot be decarbonised in isolation.

Applying the carbon management principles to the transport system provides a different perspective. Carbon emissions associated with the construction of new or upgraded transport infrastructure assets are balanced with a change in the transport user behaviour resulting in more efficient mode choices. It is therefore important to understand the contributing factors to carbon emission by mode and associated infrastructure. [7]. Transport models are often not multimodal and do not reflected changes in user behaviour in detail. Associated carbon reduction is often likely to be forecast conservatively as a result. For instance, "when rail systems achieve modal shift from road vehicles, emissions from the rail infrastructure may be partially offset by reduced emissions from road

infrastructures. To be policy-relevant, LCA calculations that include infrastructure need to be contextualized with systemic effects such as modal shifts“ [2].

Consequently, transporting more people and goods whilst emitting less carbon would require a substantial shift from road to rail, a shift that is already reflected in various EU policies, for instance the EU's Shift2Rail [10], and infrastructure funding mechanisms, such as the Connecting Europe Facility (CEF) [11]. However, a shift to more sustainable modes such as rail requires considerable investment and restructuring of the transport network as well as changing the public's travel behaviours. The delivery of a sustainable transport system must follow stringent whole life systems decarbonisation principles that are unusual for the traditionally conservative construction and infrastructure industry.

3 Balancing capital carbon investment with decarbonisation from modal shift – implementation frameworks

3.1 Prioritise investment portfolios on modal shift for a successful decarbonised transport system.

Currently there are a lot of public investments and subsidies made in the direction of a decarbonised transport system. For instance, the European Green Deal, includes an estimated €87.5 billion in rail infrastructure investment. However, considering the time remaining to align with a net zero future, the current carbon budget can be considered as limited.

The question remains on whether we are directing our investments in the right direction. The industry - often driven by political ambitions - is still very much focused on the short-term horizon, penalising certain transport solutions because there is a strong focus in the construction aspects and the capital carbon emissions. Instead, we should be looking at the whole life considerations where the impact of other solutions is drastically more significant given the limited carbon budget, space and time remaining to achieve the net zero target.

Therefore, these investments must both consider efficiency of different transport modes but also vitally prioritise projects that consider whole life emission. Additionally, investment portfolios must prioritise projects that maximise mode shift particularly moving freight off the roads and revolutionise multi-modal interchanges. However, with the substantial capital carbon of rail infrastructure, investments must urgently prioritise and incentivise low carbon innovation during the planning, design and construction

phases of railway infrastructure and interchanges, and accelerate the bold delivery standards and processes that dominate the industry.

3.2 PAS 2080: 2023 Carbon management in infrastructure and decision making

PAS 2080 [12] is a British standard and specification for managing infrastructure carbon with the aim to help decision makers decarbonise infrastructure and be compatible with current investment processes. Now, a key bottleneck thwarting full decarbonisation of transport is that all targets are at asset and some at network level, rather than system level targets. The PAS 2080 adopts a drastically different approach to the traditional planning, design, and delivery of transport infrastructure – one that is centred around decarbonisation of travel.

The revised PAS 2080, updated in April 2023 by several UK industry stakeholders including Arup, describes the decarbonisation progress to date but also the fast-changing policy landscape – taking new legal obligations to achieve a net zero transition by 2050 into account. It provides a framework for the management and reduction of whole life carbon in the built environment, with emphasis on considering a system-level approach and aligning with the transition to net zero by 2050 [1].

PAS 2080 borrows its concept from the Construction Hub Value toolkit [13] and has used a nesting hierarchy to highlight the important linkages between assets, networks, and system – and the scale of decarbonisation opportunities between them. Key to this approach is that different parts of the Value Chain can control at different levels, but the all-important engagement and collaboration in all directions is necessary to make it happen.

Applying the carbon management principles to the transport system provides this different perspective of balancing construction of new or upgraded transport infrastructure assets with a change in the transport user behaviour towards more efficient mode choices.

4 Climate proofing rail infrastructure

Climate proofing on infrastructure projects refers to the incorporation of climate change mitigation measures and adaptation strategies into the planning, design, construction, and maintenance of various infrastructure developments.

In 2021, the European Commission issued a Commission Notice named "Technical guidance on the climate proofing of infrastructure in the period 2021-2027" [14], coining the term of climate proofing as "a process that integrates climate change mitigation and adaptation measures into the development of infrastructure projects." The guidance helps mainstream climate considerations in future investment and development of infrastructure projects from buildings, network infrastructure to a range of built systems and assets. It is aiming to support institutional and private European investors to make informed funding decisions depending on whether projects are deemed compatible with the Paris Agreement and the EU climate objectives [14].

The guidance suggests following the European Investment Bank's (EIB) "EIB Project Carbon Footprint Methodologies" [15] to assess the potential of the mitigation work stream, through GHG Balancing, and enhancing resilience to withstand climate change impacts, being the two pillars of climate protection.

Relative emissions are based on a project boundary that adequately covers the "with" and "without" project scenarios. It includes all significant scope 1, scope 2 and scope 3 emissions (as applicable), but it may also require a boundary outside of the physical limits of the project to adequately represent the modal shift expected as a result of successful project implementation. The relative emissions calculation will use a boundary that covers the entire region affected by the project. In principle, the absolute and relative emissions footprints are not always directly comparable and should not be added to or subtracted from one another [15].

While at this stage it is not mandatory by law to prepare a GHG balance for every infrastructure project, the German Federal Ministry for Digital Affairs and Transport precedes in using the approach to substantiate the Federal Transport Infrastructure Plan for 2030 [16] [17].The overall strategy for the development of federal transport infrastructure names and prioritized over 1.000 projects by their social, economic and environmental benefits. In this way, the allocation of funds *should* be in line with the targets of the transport transition and should have access to the associated EU funds (InvestEU, Connecting Europe Facility (CEF), European Regional Development Fund (ERDF), Cohesion Fund (CF) and the Just Transition Fund (JTF)).

The requirement for assessing the carbon implications of the individual projects across Scopes 1, 2 and (partly) 3 is a significant step forward in understanding and being able to mitigate the climate change impacts of such projects, including the all-important modal shift that acts as a catalyst for the decarbonisation of the transport sector. With user carbon constituting most road-infrastructure-related carbon emissions, decarbonisation should be

part of a much bigger coordination across surface transport mode (road/rail/water), which identifies the most effective transport interventions for integrated decarbonisation of the transport network as a whole and not individual projects in isolation. This systematic approach is often not yet in place, with transport decarbonisation being siloed by modes.

A coordinated transport system decarbonisation that is targeted at addressing the high carbon hotspots of the transport network, could result in an efficient capital carbon and cost investment on the right transport infrastructure for the right type of travel. It will also help all transport infrastructure providers accelerate progress towards the EU decarbonisation targets.

5 The carbon reduction hierarchy in the modal shift model

There is a widespread perception that technological improvement will solve the decarbonisation challenge and a lot of attention is focused on the role of technology as a driver for decarbonisation in the transport sector. For instance, the International Energy Agency (IEA) emphasizes the need for the electrification of railway:

"To get on track with the Net Zero Emissions by 2050 (NZE) Scenario, emissions will need to decline by about 5% annually to 2030, a goal which requires the electrification of diesel operations wherever viable, as well as the use of biodiesel blends and implementation of a wide range of other efficiency measures." [18]

While technological change is an essential part of decarbonisation, it will not be successful on its own. The emitted carbon is mainly associated with user behaviour. By recognising the fact that most of the assets we need and the ones that will still be around in 2050 are the ones already built, we can understand how our society is locked in high carbon behaviour. The transport sector has a direct role to influence how these behaviours will change or not in the short-, medium- and long-term.

Therefore, the carbon reduction hierarchy must be prioritised in all transport decarbonisation options. The biggest carbon reduction can be achieved by avoiding building new infrastructure in the first place, considering alternatives for demand management and avoiding the need for motorised travel. For instance, planners should plan for the shortest distance travel to minimise land take and avoid new routes placemaking and routes for local active travel.

Secondly, this should be followed by switching to low carbon alternative solutions or more efficient modes, such as public transport, rail, walking and cycling alternatives. This

can be enhanced by having better public transports in place, both for local and long-distance travels.

Only when all other options have been exhausted, then improving the energy efficiency of traditional construction materials and technologies can yield smaller carbon benefits, for instance reducing the carbon intensity of concrete and steel. And vehicle electrification or hydrogen power will further reduce the residual emissions after strategic mode shift has appropriately optimised the efficiency of the different types of journeys.

6 Conclusion - Combining design, planning and smart interfacing for an effective modal shift approach

Rebalancing of the modal mix can only result from smart interfacing between modes that is flexible to optimise ridership and avoid congestion [15]. Breaking the silos between road and rail transport and maximising collaboration for optimal user carbon reduction is one of the top priorities of an effective carbon management framework. Carbonisation must be facilitated by **seamless interchange modes/points**, which require a re-thinking of planning and technical designs of stations and depots, ports, airports, communication between transport and infrastructure providers as well as distribution and consolidation strategies at scale.

Interchanges designed to make public transport a default choice for passengers as well as effortless and economic transfer of rail freight for first mile and last mile trips are essential to optimise the efficiency of our transport system, improving national and international connectivity at lowest operational and user carbon.

To achieve this, the priority and focus must always be placed on the most efficient transport solutions, not only on efficiency and numbers of passengers, but also thinking from a transport planning perspective how these different modes of transport have a direct effect on passenger behaviours and freight logistics/ business models.

Importantly, different decision-makers control different parts of the transport system, with designers, contractors and manufacturers in control of parts of the asset, and asset owners' control of the carbon at asset and network level, and local and regional government or regulators controlling the system. All members of the value chain are able to influence the carbon decisions, which is why collaborating is so important for decarbonisation.

Literature

[1] Working Group I - III, "Sixth Assessment Report (AR6)," IPCC, 2022.

[2] R. Sims and R. Schaeffer, "AR5 Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change - Chapter 8," IPCC, 2014.

[3] European Commission, "Sustainable and Smart Mobility Strategy – putting European transport on track for the future," 2021.

[4] European Commission, "Factsheet - The Transport and Mobility Sector," EU Commission, Brussels, 2020.

[5] European Commision, "Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resource efficient transport system," EU Commission, Brussels, 2011.

[6] Umwelt Bundesamt, "Klimaschutz im Verkehr," 15 03 2023. [Online]. Available: https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr/klimaschutz-im-verkehr#undefined. [Accessed 14 08 2023].

[7] Julia Repenning et al., "Projektionsbericht 2021 für Deutschland," Umwelt Bundesamt, 2022.

[8] H. Pantelidou et al., "Re-thinking UK transport emissions – getting to the 2050 targets," ICE, 2016.

[9] J.-P. Rodrigue, The Geography of Transport Systems, Chapter 5,1 Transportation Modes, Modal Competition and Modal Shift, Fifth edition ed., New York: Routledge, 2020.

[10] "Europe's Rail," 2023. [Online]. Available: https://rail-research.europa.eu/about-shift2rail/. [Accessed 08 11 2023].

[11] "European Commission," European Climate, Infrastructure and Environment Executive Agency, 2023. [Online]. Available: https://cinea.ec.europa.eu/programmes/connecting-europe-facility_en. [Accessed 08 11 2023].

[12] "PAS 2080:2023 - Carbon management in buildings," BSI Standards Limited 2023, 2023.

[13] "Value Toolkit," Construction Innovation Hub, 2022. [Online]. Available: https://constructioninnovationhub.org.uk/our-projects-and-impact/value-toolkit/. [Accessed 08 11 2023].

[14] Directorate-General for Climate Action (European Commission) , European Commission, "Commission Notice — Technical guidance on the climate proofing of infrastructure in the period 2021-2027," 2021.

[15] "EIB Project Carbon Footprint Methodologies," European Investment Bank, 2023.

[16] PTV Group, TCI Roehling, Hans-Ulrich Mann, "Methodenhandbuch zum Bundesverkehrswegeplan," Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Karlsruhe, Berlin, Waldkirch, München, 2016.

[17] "Bundesverkehrswegeplan 2030," Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Berlin, 2016.

[18] IEA, "Tracking Clean Energy Progress 2023," International Energy Agency, Paris, 2023.

[19] J. Pachl, Systemtechnik des Schienenverkehrs - Bahnbetrieb planen, steuern und sichern, 8. Auflage ed., Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2016.

[20] Arup, "Confidental - Arup Internal Report".

Authors

Pantelidou, Heleni

Associate Director & Senior Consultant | Infrastructure

Heleni combines her deep engineering knowledge with the belief that the construction industry is key in decarbonising the built environment and contributing

towards environmental regeneration, responding to the climate and biodiversity crises.

An enthusiastic promoter of Low Carbon in Infrastructure, Heleni advances and coordinates sustainable design and whole life carbon strategies on infrastructure projects and the built environment. She has worked with major infrastructure projects and clients to realise whole life value through design.

A member of the Green Construction Board and the Institution of Civil Engineers Net Zero Taskforce, she is involved in accelerating decarbonisation in Infrastructure and the built environment. She is a Technical Author of the revision of PAS2080:2023 Carbon Management in buildings and infrastructure, published by BSI on the 5th April 2023.

Contact Information

t+44 20 7755 2634
e heleni.pantelidou@arup.com
Arup Group Limited, London, W1T 4BJ

Obergfell, Jörg

Jörg is an experienced Consultant and Project Manager and leads Arup's Transport & Energy Businesses in Germany. He has a background in Civil Engineering and Industrial Engineering and has 20 years of experience principally in construction and transport management.

Over the years, Jörg has gained considerable expertise in multidisciplinary projects, strategic and innovative consulting services, contracts and claims management, transaction advice, PPP as well as BIM. Jörg also worked as consultant and project manager with the consulting

engineering firms BGS and Grontmij (today Sweco) in Germany and Sweden.

Contact Information

t+49 692 097 780
e Joerg.Obergfell@arup.com

Arup Deutschland GmbH, 60314 Frankfurt

Christin, Elisa

Elisa Christin is a Renewable Energy Consultant in Arup's infrastructure segment, with a background in International Sustainability Management and LCA assessment.

Elisa has advised clients from both the public and private sector, mainly on the topics of renewable energy integration in public policies and planning; ESG assessment and reporting; Integration of sustainability in business development along with developing climate change mitigation and adaptation trainings and strategies.

Contact Information

t+49 308 859 10879
e Elisa.Christin@arup.com
Arup Deutschland GmbH, 10623 Berlin

Hemmerle, Max

Max Hemmerle is a rail consultant with international experience and has worked on numerous transport planning and advisory projects.

Max wants to help maintain and improve a sustainable, equitable and high-quality transport environment for all. Sustainability is always at the forefront of his projects - be it by achieving modal shift to sustainable transport

modes, improving the air quality, the use of sustainable building materials, efficiency-optimised transport operations or the mitigation of traffic-related noise emissions.

Contact Information

t+49 692 097 7813
e Max.Hemmerle @arup.com
Arup Deutschland GmbH, 60314 Frankfurt

Rempel, Jessica

Jessica Rempel is a Transport Consultant in Arup's infrastructure segment, with a background in Civil and Environmental Engineering.

Contact Information

t+49 211 172 9008
e Jessica.rempel@arup.com
Arup Deutschland GmbH, 40221 Düsseldorf

Session 16
Nicolas Kaiser, Sebastian Klick, Hendrik Laufen, Katharina Lillith Quade, Dirk Uwe Sauer

Potential of Sodium-ion Batteries in the context of rail-bound Mobility

Kaiser, Nicolas[1,2,3], Klick, Sebastian[1,2,3], Laufen, Hendrik[1,2,3], Quade, Katharina Lillith[1,2,3] und Sauer, Dirk Uwe[1,2,3,4]

[1]Chair for Electrochemical Energy Conversion and Storage Systems, Institute for Power Electronics and Electrical Drives (ISEA), RWTH Aachen University, Campus-Boulevard 89, 52074 Aachen, Germany
[2]Juelich Aachen Research Alliance, JARA-Energy, Germany
[3]Center for Ageing, Reliability and Lifetime Prediction of Electrochemical and Power Electronic Systems (CARL), RWTH Aachen University
[4]Helmholtz Institute Münster (HIMS), IEK-12, Forschungszentrum Jülich

Abstract

In this paper, we discuss the potential of Sodium-ion batteries for the electrification of rail-bound mobility. First available Sodium-ion batteries are compared with the lithium-titanate cell, which has been discussed as a viable option for catenary-free electric trains. Cycle life and power-to-energy ratio is analysed and potential reductions in investment costs are identified.

Keywords: Sodium-ion batteries; Cost reduction; Batteries; Electrification; Catenary-free operation

1 Introduction

In order to accelerate decarbonization in the mobility sector worldwide, further electrification of existing as well as future rail-based means of transport is required. Rail-based

mobility emits 1% of global CO_{2eq} emissions [6]. Within the European Union, 60% of the rail network and thus 80% of all rail traffic is electrified via conductor rails or overhead lines [39]. However, electrification rates outside Europe are significantly lower [39]. This is mainly due to the high fixed costs of several million € per kilometre for the construction of overhead lines [39]. Therefore, the operation of shorter railway lines, especially in rural areas, can currently be done more cost-effectively using diesel multiple units [41]. More than half of the private and public-owned rail network in Germany is electrified (54%). By contrast, around 40 % of public-owned railway lines are non-electrified. This means that around 36% of all rail travel in the country is done through diesel-powered trains [35]. If non-profitable routes will continue to be left without conductor rail or overhead line electrification, the use of battery-electric or hybrid trains, equipped with fuel cells and batteries, must be increased to achieve emission targets. Most drive systems rely on secondary batteries, even those powered by fuel cells, to manage peak loads. Therefore, batteries play a critical role in making rail transportation more environmentally friendly.
When deploying battery systems for traction of trains, it is imperative to adhere to high safety standards outlined in IEC 62620 [10]. Additionally, the system should comply with limited installation space and weight constraints. It is also essential that the battery system has a long service life, requiring minimal battery changes from both a financial and environmental perspective [39]. Furthermore, acceleration and regenerative braking of trains require high peak powers in both charge- and discharge-direction [21]. Lithium-ion batteries (LiB) with a Lithium Titanate Oxide anode, also known as LTO, have emerged as a suitable option [16]. These batteries combine a high power density with a long service life. However, due to the use of more expensive raw materials in the anode and the lower operating potential, LTO cells are also significantly more expensive than other Lithium-ion batteries (LiBs). Their energy density is lower than other LiBs, typically less than 100 Wh/kg, partly due to the high potential of the anode. Sodium-ion cells (SiB) are a viable and less costly alternative to LTO cells. Although, SiB technology currently has lower energy densities than most LiBs, the cheaper raw materials used for the cathodes of SiB could provide a competitive price advantage [1]. Furthermore, the energy density of SiB can match or even exceed that of LTO cells with up to 160 Wh/kg [26].
This paper explores the state of the art regarding SiB with respect to their potential use in railway applications. It is structured as follows: Chapter 2 describes the properties of SiB, chapter 3 gives an overview of possible battery applications in the railway sector, chapter 4 discusses the cyclic stability of SiB, chapter 5 elaborates the suitability of SiB for the

electrification of a commuter train and chapter 6 summarizes this paper and points out the key findings.

2 Properties of sodium-ion cells

In many aspects sodium-ion batteries are similar to state-of-the-art Lithium-ion batteries. An alkali metal ion (Lithium, or Sodium, respectively) shuttles between a cathode and an anode during charge and discharge. In the discharged cell the cathode, in case of sodium-ion batteries consisting of layered metal oxides, prussian blue analogs, or polyanionic compounds is fully sodiated. During charging, sodium-ions are transferred to the anode via an electrolyte [42]. Due to these similarities sodium-ion batteries are sometimes labelled a drop-in replacement for Lithium-ion batteries. Indeed, production and characterisation of Sodium-ion batteries is very similar to LiBs [37, 12]. However, the larger weight of Sodium together with a higher anode-potential means that the energy density of sodium-ion batteries are lower than for LiBs [17]. Despite this, energy densities of 160 Wh/kg can be achieved [26]. This means that some variants can be above the energy densities of high-power lithium iron phosphate (LFP) cells and significantly above those of LTO [40, 1]. In addition, SiB can achieve power densities of up to 1200 W/kg [43]. This is lower than the SCiB LTO cells marketed by Toshiba but still higher than for most other LiB. In addition to the cost advantage, SiB also dominates most LiB in life cycle analysis [23]. However, the voltage window used in sodium-ion batteries with hard carbon anodes and transition metal oxide cathodes is larger compared to Lithium-based batteries (e.g. voltage range of > 3 V reported in [26]). This increases the current at low states of charge, and/or the voltage at high states of charge compared to Lithium-ion battery systems, requiring more robust power electronics in terms of their current and voltage capability.

The possible combination of lower costs, acceptable lifetime, good energy density, good safety and better availability of raw materials makes future SiB particularly interesting in the context of rail-bound applications but also for stationary applications for the stabilisation of traction power grids. SiBs have the potential to meet the special requirements in rail transport, such as high power charge and discharge due to recuperation and acceleration of the train, high cycle stability more cost-effectively than commercial LiBs. In particular, the potential of substituting LTO cells as high-power battery cells will be

analysed in order to enable a more environmentally friendly and cost-effective overall system. Further research and development is needed before SiBs can reach their full potential, but the start of series production and use of SiBs in electric vehicles has already been announced for this year and shows that this cell type is ready for series production [28].

3 Load profile and battery application in the rail sector

In the following the different possible applications of batteries in the rail sector based on a short literature research is presented in chapter 3.1. Chapter 3.2 shows and describes an exemplary load profile of a commuter train. The profile will be also used in chapter 5 to analyze the suitability of SiB for the electrification of a commuter train via batteries.

3.1 Battery application in the rail sector based in the literature

Batteries serve a wide range of purposes in rail transportation. These purposes can be divided into three categories: regenerative braking energy recovery, grid support and stabilization, and catenary-free operation. The first two applications can also be categorized into stationary and on-board deployment of batteries. The following text will provide an overview of the various applications of batteries in rail transportation. An additional overview can be found in [15] and [13].

3.1.1 Regenerative breaking

In order to recover as much of the braking energy of trains, subway trains, and trams with a catenary as possible, certain conditions must be met. The grid has to be able to handle the peak loads during braking without compromising stability. Typically, rolling stock vehicles have a high peak power demand when accelerating and can feed in high power when braking, but their average power consumption is low [21]. Typically, the braking energy of a train in a grid section can only be utilized if another train can simultaneously use it to accelerate, otherwise, the energy is wasted as heat on the vehicle braking resistor [11]. To utilize the braking energy efficiently, it's possible to store it in stationary batteries

connected to substations or on-board batteries. This allows for more efficient and time-independent use of the energy through intermediate storage in the battery and reduces both the heat dissipated into the environment via the braking resistor as well as the use of mechanical brakes.
[8] explores the impact of incorporating a LiB system at the HAIJMA substation in Japan in 2013. The system can hold a capacity of 76.12 kWh and a maximum current of 3000 A, although the specific type of LiB is not mentioned in the published article. The installation of this system led to an energy-saving effect of 4% of the total traction energy at the substation. Also, a higher effect on a weekend compared to during the week could be observed [8]. In [20] discuss a project implemented in the New York City metro system. The project involved the installation of a nickel-metal hydride (Ni-MH) battery system with a 400 kWh capacity in a substation. This system helped to significantly reduce the voltage drop of the L3 line when a train accelerated. Moreover, the battery system enabled the use of over twice the amount of regenerative braking energy by charging the battery [20]. According to a study reported in [21], the Myodani substation on the Seishin-Yamate line in Japan was able to decrease its energy consumption by 310 MWh annually. The solution involved installing a 37.4 kWh LiB-System with a rated power of 1 MW. The installation was particularly effective due to the 2.9% slope over a distance of about 4 km. The battery system proved to be a suitable technology for reducing energy consumption in [21].

3.1.2 Supporting grid stability

As previously stated, batteries are able to stabilize and support the voltage of connected grids and lines. In a study reported in [11], the voltage stability of a battery system containing LiB in a 3 kV railway system located near Rome, Italy was evaluated. To do this, a simulation framework was used to simulate a LiB system with a capacity of 500 kWh and 2000 kW for grid support. Additionally, the impact of a high-speed train utilizing this line section with a maximum traction power of 9800 kW was examined. Using an auxiliary battery system resulted in a 43.2% decrease in peak currents, a 5.26% decrease in voltage drops below the stability limit, and a 22.4% reduction in losses [11]. A study by [36] explored the practicality of using a stationary battery system to support substations under certain conditions. The authors noted that using battery systems to maintain voltage stability would be most beneficial for train lines with low frequency in areas outside

metropolitan regions [36]. In Japan, the West Japan Railway company has identified a time between two trains of more than 7.5 minutes as effective for the use of energy storage systems [9]. Moreover, besides maintaining voltage stability, battery systems can also guarantee that trains reach the next station in case of a power outage. This safety feature is particularly important for underground trains, as it allows passengers to evacuate the metro system as soon as possible [30].
When it comes to stabilizing voltage at substations or decreasing energy consumption by storing regenerative breaking energy from trains, LiB have advantages over flywheel storages and supercapacitors. These include high energy density, low investment costs per energy, low maintenance requirements, and the potential of using second-life batteries. However, LiB's short life expectancy and low power density are considered disadvantages [15]. In [4], a comparison was made between supercapacitors and LiBs, as well as on-board and stationary systems for tramways. It was found that, in terms of cost and benefits, stationary systems were the better choice. In all investigated scenarios, both on-board and stationary, the supercapacitor had a double payback time compared to LiB. This is because a system using supercapacitors requires a higher initial investment [4].

3.1.3 Electrifying trains with batteries

In some cases, it may not be feasible to use overhead lines for trams due to challenging building conditions, high costs, or lack of community support. One alternative is to use batteries for a catenary-free operation (CFO) of trams. A tram with a capacity of 300 passengers and a maximum speed of 70 km/h in Nanjing, China, was equipped with a 49 kWh LiB-system, as described in [3]. The tram can only charge and use an overhead line at one of its 13 stops. The total track distance is 7.65 km, and 90% of the line operates without a catenary. A long-distance test in Mannheim, Germany, also demonstrated that the tram can operate in CFO mode for 41 km [3]. Siemens has equipped their Sitras tram with a hybrid energy storage system that uses both supercapacitors and Ni-MH batteries. The purpose of this system is to achieve CFO. The tram runs between two cities near Lisbon, Portugal, covering a distance of 2.5 km without a catenary. Similarly, Alstom's Citadis tram in Nice, France has a Ni-MH storage system that helps it cover a distance of 1 km without a catenary [27]. Recently, Hitachi has announced the testing of its first battery-powered tram for the city of Florence, Italy [25]. [5] describes the powering of a tram with Lithium-Titanat-Oxide (LTO) cells.

A study was conducted to convert a diesel commuter train into an electric one with the use of batteries for a journey of approximately 12 km in Dar es Salaam, Tanzania. The researchers highlighted the suitability of LTO batteries for powering high-demand vehicles [16].
Stadler Rail AG and Siemens Mobility currently offer various battery-electric trains that are already in operation [29, 33]. A notable train model is the Flirt Akku, an electric battery-powered variant of the Flirt commuter train produced by Stadler. It has a top speed of 160 km/h and is capable of traveling up to 150 km without requiring a catenary. In a recent test drive in 2021, it achieved a range of 224 km while on battery mode. The Flirt Akku is currently in operation on various routes and is expected to be implemented on additional lines throughout Germany in the future [34, 31, 32].

Siemens has developed a battery-powered commuter train called Mireo Plus B based on the Mireo model, utilizing LTO batteries. It can reach a maximum speed of 160 km/h and travel up to 120 km [29]. This train is currently in use or will be in the future on multiple routes throughout Germany [7, 38, 24]. In Germany, almost 40% of rail lines are not electrified. However, around 80% of these routes are shorter than 80 km. As of now most trains operating on catenary-free sections also run on diesel under existing overhead lines [33]. In such cases, battery-electric trains could charge in sections where overhead lines are available.

3.1.4 Cost comparison of the electrification methods of trains

It is important to note that battery electric trains are not the only alternative to diesel-driven trains. Therefore, it is necessary to consider the cost of different drive train topologies. A more detailed comparison is presented in [41], where costs per kilometer for regional commuter trains were calculated based on different scenarios over a 10-year period. The costs are dependent on assumptions of the reduction in expenses for new technologies used in the rolling stock vehicles. The study found that installing overhead lines is cost-effective for up to six trains per hour. Additionally, battery electric regional trains with a range of 100 km and 200 km are already competitive with diesel-driven and diesel-hybrid trains, even with a conservative cost reduction outlook. Hydrogen trains can also be competitive with battery electric trains under an optimistic cost reduction scenario,

assuming they cover longer distances [41].

The most attractive use-case for battery electric trains is the operation of lines where electrification via catenary is not feasible and distances are below 200 km. A key factor for the economic feasibility is the cycle stability of the battery and the cost per kWh. LTO cells fit the high-power requirements of acceleration and breaking of trains and also provides a good cycle stability. However the investment costs per kWh are one of the highest among LiB (high-power LTO: > 500 $\$/kWh$, own cost information > 1,000 $\$/kWh$) [18, 14]. Thus our study focuses on the use of SiBs for commuter trains operating both under overhead wires, and non-electrified sections of the railway network.

3.2 Exemplary load profile of a commuter train

In the following section, an example load profile of a commuter train is presented and the requirements are elaborated. During the journey the train passes multiple passages with overhead lines, where the batteries can be charged via catenary. 360 km of the total 580 km of the train are not covered with overhead lines. The maximum power of the rectifier is 2 MW. With regard to the rectifier losses, a maximum of 2 MW can be fed into the grid and a maximum of 1.75 MW can be drawn from the grid. The trip takes 16 h and the train reaches a maximum speed of 160 km/h during this time. The peak power for accelerating the train is 1.9 MW. During regenerative braking up to 2.83 MW have to be stored, fed to the grid or dissipated in braking resistors. The total energy consumption of the train is 5.11 MWh. Theoretically, 1.54 MWh of regenerative braking energy could be used to charge the batteries during the trip. Figure 1 shows the power profile as well as the energy balance of the train. Assuming a battery that is not limited in terms of performance, considering only the energy requirements and not adjusting the rectifier power, the minimal battery system size is calculated to be 621.6 kWh.

4 Cyclic stability of sodium-ion batteries

Sodium-ion batteries promise high rate capabilities and long cycle life [26]. Some early cells are entering the market providing energy-densities similar to high-power LTO cells. We acquired a set of one of the first commercial 18650 Sodium-ion cells providing high current rates of up to 8C discharge and 5C charge. This means a cell can be charged

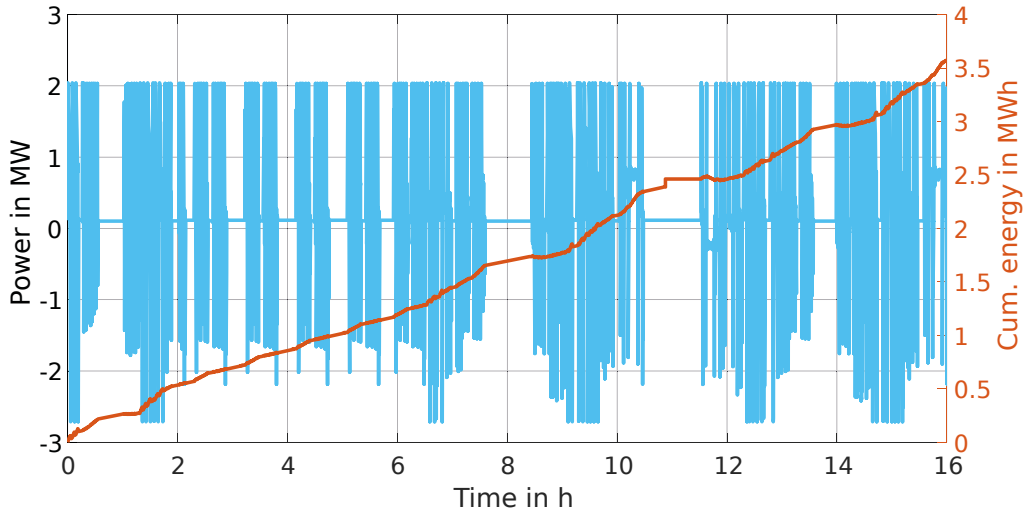


Figure 1: Exemplary load profile of a commuter train

within 12 min and discharged even faster. These cells provide a lower nominal voltage compared to their Lithium-ion counterparts and the capacity is just 1.2 Ah compared to 3.6 Ah for LiB in the same format. The gravimetric energy density is similar to LTO-cells with 97 Wh/kg. In order to test the available capacity under high discharge currents, cells performed characterisation tests at various C-rates. The ageing is assessed based on high current cyclic ageing tests.

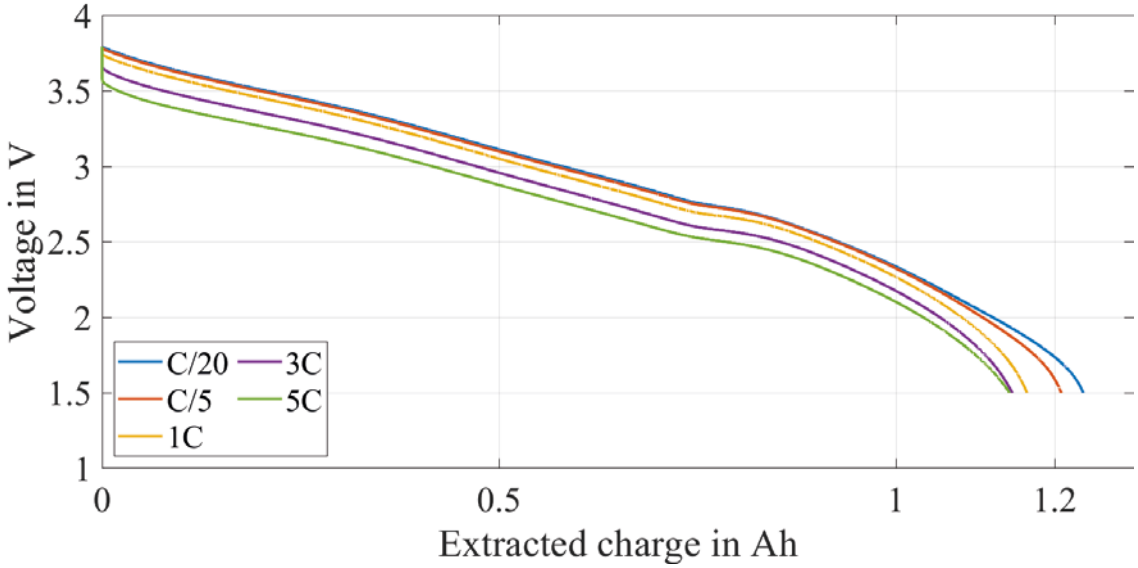


Figure 2: Comparison of dischargeable capacities for different current rates.

Characterisation tests demonstrate the outstanding performance of these cells: At 25 °C

ambient temperature and a discharge rate of 5C (6 A) over 98 % of the 1C capacity could be extracted. This is in the same order than LMO/LTO cells [**https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101656**] and higher than NMC/LTO cells investigated in [**https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102383**] Additionally the shape of the voltage-curve does not change considerably under these high current rates, as presented in Figure 2, facilitating state of charge estimation.

Furthermore, cyclic ageing tests at room temperature show little capacity decay even at high current rates and 100% DOD. Cells cycled with 5C charging rate and 8C discharge lost about 5 % of initial capacity after 1200 cycles of continuous operation. The capacities are depicted in Figure 3. Additionally, cells cycling with lower charging rates of 3C exhibit a very similar capacity fade over cycles, indicating that the high charging current, which can be relevant in railway applications, is no bottleneck for lifetime of these cells. Cells operated at lower currents exhibit lower capacity fade. Other publications also indicate good cycle life for SiBs of up to 3000 cycles at 1 C [26]. However, cells failed

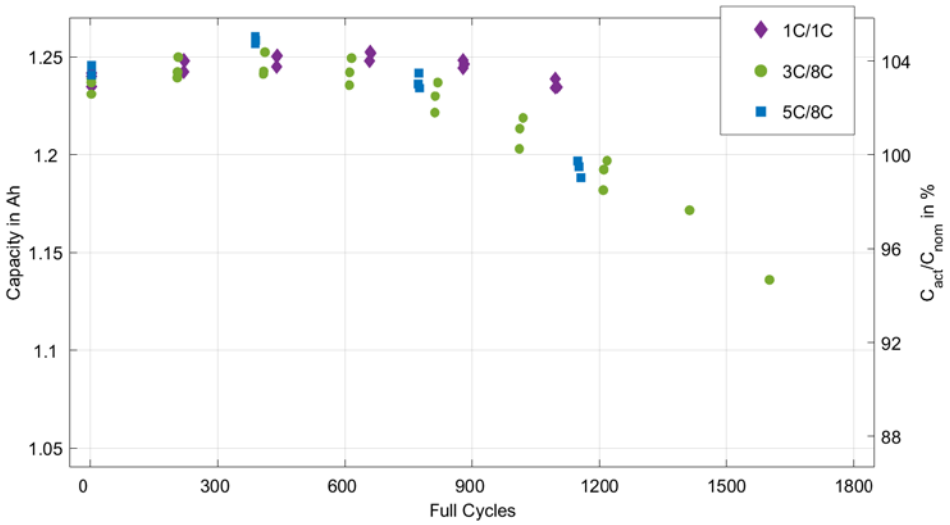


Figure 3: Capacity fade for cyclic ageing under different C-rates. Capacity is measured with a C/20 discharge

abruptly after about 1200-1400 cycles. Further investigations by our group [12] show that this failure is likely due to heat-related side reactions causing substantial gassing. The cells exhibited substantial heating due to the high currents: surface temperature measured with a thermal camera was found to exceed 50°C. These high temperatures increase the rate of side reactions thus increasing the internal pressure. This ultimately triggered the current interrupt device, which is supposed to interrupt current e.g. in case of a short

circuit [12]. This premature failure of the cell hinders a useful estimate of lifetime and longer term capacity fade.

To avoid the effect of high discharge currents on the cell ageing, another set of tests was conducted. Three cells each were charged with 1 C, 3 C and 5 C respectively. All nine cells were discharged with 1 C. This cycling protocol was chosen to resemble applications with frequent high power charging and lower average discharge currents. The capacities normalised to the initial cell capacity for each cycle are displayed in Figure 4. Over the initial 300 cycles capacity of all cells increases regardless of the charging rate. After approximately 350 cycles capacity starts to decrease slowly. Deviations between the three groups are small. Thus, despite a tendency for cells with lower charge rates performing slightly better in terms of capacity retention, the influence of the high charging rate is very small. Cells charged with 5 C loose less than 5 % of capacity over 1000 full cycles. This test is on-going and further results will be published once all cells have reached the end of life.

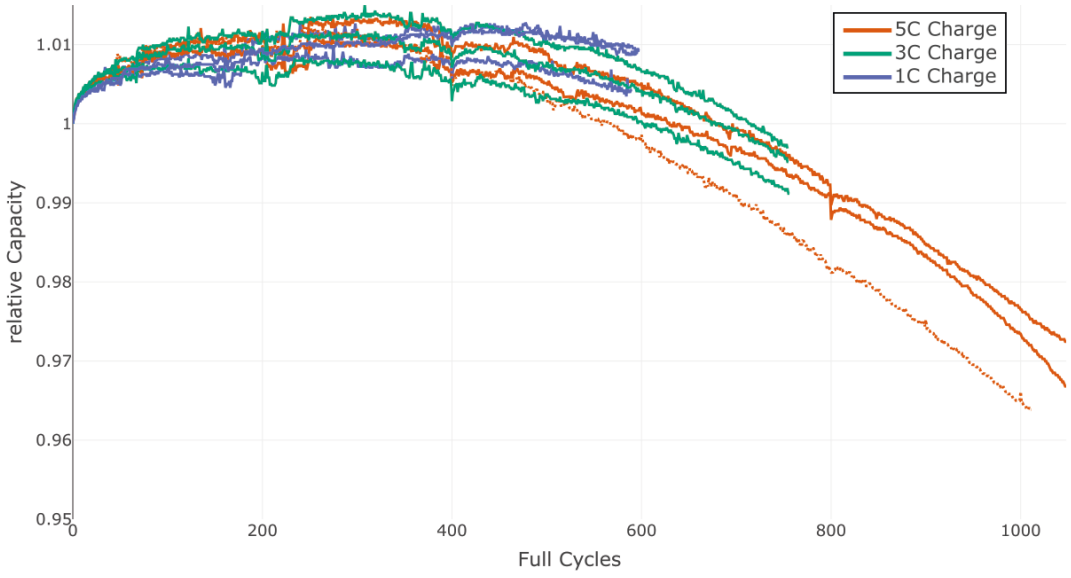


Figure 4: Capacity charged with different C-Rates. Discharge current is 1 C. Capacities are normalised to the first discharge cycle.

In summary, our tests show that sodium-ion cells are a promising alternative to high-power LIBs, providing similar power capabilities and energy densities at lower costs. However, the cells tested in our lab show high sensitivity to high temperatures, leading to

a premature failure of the cells under high current cycling without active cooling.

5 Challenges and opportunities for sodium-ion batteries in railway applications

To investigate the suitability and compatibility of Sodium-Ion Batteries (SiB) in the scope of this exemplary load profile a rudimental linear program is used. The linear optimization accounts for power- as well as energy requirements and calculates the minimum amount of battery cells required to meet them. The constraints force the energy balance and the power balance to zero. Also, the continuous power limits of the battery cells are taken into account via constraint modeling. As the battery looses capacity over its operation the SOC limits are 10 % and 90 % which leads to a maximum DOD of 80 % for new cells. For a comparison of SiB with LTO batteries a widely used 20 Ah LTO cell is used. The properties of the used cells for this comparison are listed in table 1 and are taken from the respective datasheets where possible. Some values are estimations because no proper values could be found online or in data sheets. The corresponding values are marked. Also, the SiB considered here was measured and further tested in our group, so a few values are adjusted. The SiB is one of the first commercially available SiB, and further improvements, especially concerning the price per kWh and the cycle stability can be expected. The price is based on a rather small 18650 cell which was not bought in quantities anywhere close to industrial levels. Hence, the price is considered a very conservative estimation.

Based on the energy requirements, the optimal battery system capacity is around 603 kWh. The linear program has flexibility to adjust the grid connection's rectifier power to minimize battery usage. Regenerative breaking energy can be stored in the battery system or fed into the grid, but cannot be wasted in a breaking resistance. SiB have a higher energy density than LTO, enabling a lighter battery for the same energy. The power requirements for the train are dominated by regenerative breaking power, making the charging power of the battery crucial. LTO cells have a better power density than SiB cells. After considering the power and energy requirements as well as parameters of the two cell types, the linear program determined that SiB cells with a total weight of 5.942 kg are required. This battery meets the power requirements with a maximum charge power of 3.01 MW and a maximum discharge power of 4.82 MW. The energy is the limiting factor as 603 kWh are

Parameter	LTO 20 Ah	SiB 1.25 Ah
Form factor	Prismatic	Cylindrical 18650
Capacity Ah	20	1.2
Energy Wh	46	3.6
Energy density Wh/kg	90.20	97.3
Power density W/kg	1,804	800
Cut-of-voltage V		1.5
Nominal voltage V	2.3	3.0
Max. charge voltage V		3.8
Max. cont. discharge rate	20 (estimated)	8
Max. cont. charge rate	20 (estimated)	5
Cycle stability	20,000	4,000
Price $\$/kWh$	500-1,200	306

Table 1: Overview of the LTO and SiB battery cell used for the optimisation of the battery pack

needed. As LTO cells can provide more power relative to their energy compare to the considered SiB, the energy density is the limiting factor for an LTO-based system. LTO cells with a total weight of 6.675 kg are necessary to meet the energy requirements of 603 kWh. The LTO system has a maximum charge power of 12.04 MW, maximum discharge power of 12.04 MW. LTO batteries are more expensive, costing between $301,045 - $722,058, while SiB batteries cost $183,969. However, LiB has higher cycle stability than the considered SiB, and further investigations are needed to determine the optimal battery system considering cell aging and 30 years of operation for a typical commuter train. The early stage of SiB technology must also be taken into account, and improvements in energy density, price, cycle stability, and power density can be expected in the future.

6 Conclusion

Sodium-ion batteries offer sufficiently high power for rail applications and lower costs compared to high-power LiBs. This makes them a promising candidate for battery multiple units. However, currently available sodium-ion cells pose new challenges for system design: sensitivity to high temperatures and an increased voltage window compared to LiBs, require careful design of thermal management and power electronic components. Furthermore, lifetime of established LTO cells is still higher compared to SiB based on

manufacturer information. While thermal stability may be increased by improved electrolyte composition, the higher voltage window is an inherent property of the used active material. Alternative active materials such as Prussian Blue Analogs in combination with aqueous offer a lower voltage window and better safety at the cost of substantially lower energy density [22]. Prussian Blue Analog Cathodes with organic electrolytes suffer from substantial gassing due to water within the crystal structure [22]. Thus, systems ready to use sodium-ion batteries will require either higher maximum voltage capabilities (increased insulation) or increased current capabilities (larger conductors) compared to current LIB-based systems. Another alternative would be to limit the available power at lower SOCs. A positive aspect of the increased voltage window is the easier SOC estimation especially if the voltage-charge relationship is close to linear. We demonstrated that sodium-ion batteries show great potential for railway applications. Further research is necessary to increase cycle life and alleviate the temperature sensitivity of sodium-ion batteries.

Acknowledgement

We would like to thank Siemens Mobility for providing an exemplary load profile for a commuter train.

Literatur

[1] K. M. Abraham. „How Comparable Are Sodium-Ion Batteries to Lithium-Ion Counterparts?“ In: *ACS Energy Letters* 5.11 (2020), S. 3544–3547. ISSN: 2380-8195. DOI: 10.1021/acsenergylett.0c02181.

[2] Thomas Bank u. a. „Performance Benchmark of State-of-the-Art High-Power Lithium-Ion Cells and Implications for Their Usability in Low-Voltage Applications“. In: *Journal of Energy Storage* 36 (Apr. 2021), S. 102383. ISSN: 2352-152X. DOI: 10.1016/j.est.2021.102383. (Besucht am 01. 08. 2023).

[3] Frank Becker und Andre Dammig. „Catenary free operation of light rail vehicles — Topology and operational concept“. In: (), S. 1–10. DOI: 10.1109/EPE.2016.7695286.

[4] M. Ceraolo und G. Lutzemberger. „Stationary and on-board storage systems to enhance energy and cost efficiency of tramways“. In: *Journal of Power Sources* 264 (2014), S. 128–139. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2014.04.070.

[5] H. M. Al-Ezee u. a. „An On-Board Battery System for Catenary Free Operation of a Tram“. In: 2018 (2018). DOI: 10.1049/cp.2018.0062.

[6] Petronilla Fragiacomo u. a. „Sizing and Performance Analysis of Hydrogen- and Battery-Based Powertrains, Integrated into a Passenger Train for a Regional Track, Located in Calabria (Italy)“. In: *Energies* 15.16 (2022), S. 6004. DOI: 10.3390/en15166004.

[7] Andrea Haspel. *Mireo Plus B Ortenau*. 2021. URL: https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:1cdbf355-fa91-4fca-8917-5e04e9419e17/mors-b10022-00dbmireoplusortenau-72.pdf (besucht am 25. 07. 2023).

[8] Hitoshi Hayashiya u. a. „Lithium-ion battery installation in traction power supply system for regenerative energy utilization: Initial report of effect evaluation after half a year operation“. In: (2017), S. 119–124. DOI: 10.1109/EPEPEMC.2014.6980621.

[9] Yuuki Iino u. a. „Evaluation of installation effect of the energy storage system in D.C. traction power supply system“. In: (), S. 280–285. DOI: 10.1109/EPEPEMC.2016.7752011.

[10] International Electrotechnical commission. *Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes – Secondary lithium cells and batteries for use in industrial applications*. 2014.

[11] Regina Lamedica u. a. „Application of battery auxiliary substations in 3kV railway systems“. In: (2015), S. 1–6. DOI: 10.1109/AEIT.2015.7415249.

[12] Hendrik Laufen u. a. „Extensive Multi-Method Characterisation of a Commercial 1.2 Ah 18650 Sodium-Ion Battery Cell“. Manuscript in Preparation. Aachen.

[13] Xuan Liu und Kang Li. „Energy storage devices in electrified railway systems: A review“. In: *Transportation Safety and Environment* 2.3 (2020), S. 183–201. DOI: 10.1093/tse/tdaa016.

[14] Lukas Mauler u. a. „Battery cost forecasting: a review of methods and results with an outlook to 2050“. In: *Energy & Environmental Science* 14.9 (2021), S. 4712–4739. ISSN: 1754-5692. DOI: 10.1039/D1EE01530C.

[15] Fabian Meishner und Dirk Uwe Sauer. „Wayside energy recovery systems in DC urban railway grids“. In: *eTransportation* 1 (2019), S. 100001. ISSN: 25901168. DOI: 10.1016/j.etran.2019.04.001.

[16] Joachim J. Mwambeleko und Thanatchai Kulworawanichpong. „Battery electric multiple units to replace diesel commuter trains serving short and idle routes“. In: *Journal of Energy Storage* 11 (2017), S. 7–15. DOI: 10.1016/j.est.2017.01.004.

[17] Prasant Kumar Nayak u. a. „Von Lithium- zu Natriumionenbatterien: Vorteile, Herausforderungen und Überraschendes“. In: *Angewandte Chemie* 130.1 (2018), S. 106–126. ISSN: 00448249. DOI: 10.1002/ange.201703772.

[18] Thomas Nemeth u. a. „Lithium titanate oxide battery cells for high-power automotive applications – Electro-thermal properties, aging behavior and cost considerations“. In: *Journal of Energy Storage* 31 (2020), S. 101656. DOI: 10.1016/j.est.2020.101656.

[19] Thomas Nemeth u. a. „Lithium Titanate Oxide Battery Cells for High-Power Automotive Applications – Electro-thermal Properties, Aging Behavior and Cost Considerations“. In: *Journal of Energy Storage* 31 (Okt. 2020), S. 101656. ISSN: 2352-152X. DOI: 10.1016/j.est.2020.101656. (Besucht am 01. 08. 2023).

[20] Koki Ogura u. a. „Test Results of a High Capacity Wayside Energy Storage System Using Ni-MH Batteries for DC Electric Railway at New York City Transit“. In: (), S. 1–6. DOI: 10.1109/GREEN.2011.5754859.

[21] A. Okui u. a. „Application of energy storage system for railway transportation in Japan“. In: (2010), S. 3117–3123. DOI: 10.1109/IPEC.2010.5542321.

[22] Jian Peng u. a. „Prussian Blue Analogues for Sodium-Ion Batteries: Past, Present, and Future“. In: *Advanced Materials* 34.15 (2022), S. 2108384. ISSN: 1521-4095. DOI: 10.1002/adma.202108384. (Besucht am 31. 07. 2023).

[23] Jens Peters u. a. „Life cycle assessment of sodium-ion batteries“. In: *Energy & Environmental Science* 9.5 (2016), S. 1744–1751. ISSN: 1754-5692. DOI: 10.1039/C6EE00640J.

[24] Joachim Radünz. *East Brandenburg rail network gets 31 battery-electric trains*. Berlin, 2021. URL: https://press.siemens.com/global/de/pressemitteilung/netz-ostbrandenburg-bekommt-31-batterieelektrische-zuege (besucht am 25. 07. 2023).

[25] Railway technology. *Hitachi Rail tests first battery-powered tram in Italy*. 2021. URL: https://www.railway-technology.com/news/hitachi-rail-battery-powered-tram/.

[26] Ashish Rudola u. a. „Commercialisation of High Energy Density Sodium-Ion Batteries: Faradion's Journey and Outlook". In: *Journal of Materials Chemistry A* 9.13 (2021), S. 8279–8302. DOI: 10.1039/D1TA00376C. (Besucht am 18. 07. 2023).

[27] Alfred Rufer. „Energy storage for railway systems, energy recovery and vehicle autonomy in Europe". In: (), S. 3124–3127. DOI: 10.1109/IPEC.2010.5542334.

[28] Sebastian Schaal. *Natrium-Ionen-Zellen von CATL und BYD kommen wohl noch 2023 in E-Autos*. Hrsg. von electrive.net. 2023. URL: https://www.electrive.net/2023/04/21/natrium-ionen-zellen-von-catl-und-byd-kommen-wohl-noch-2023-in-e-autos/ (besucht am 21. 04. 2023).

[29] Siemens Mobility Ag. *Mireo Plus B – wegweisend in Richtung Zukunft*. 2023. URL: https://www.mobility.siemens.com/global/de/portfolio/schiene/fahrzeuge/commuter-und-regionalzuege/mireo/mireo-plus-b.html (besucht am 25. 07. 2023).

[30] Satoru Sone. „Improvement of traction power feeding/regeneration system by means of energy storage devices". In: (2010), S. 1–6. DOI: 10.1109/ESARS.2010.5665214.

[31] Stadler. *Flirt Akku 2-Teiler: Deutsche Bahn AG, Deutschland*. 2021. URL: https://www.stadlerrail.com/static/img/flirt-akku/Stadler_Datenblatt_Pfalznetz_FLIRT_Akku_Lay02-1.pdf.

[32] Stadler Rail Ag. *Batterieelektrischer Triebzug Typ Flirt Akku, 2-Teiler*. 2022. URL: https://www.stadlerrail.com/static/img/flirt-akku/Stadler_Datenblatt_Flirt_Akku_DB_DE_sRGB.pdf.

[33] Stadler Rail Ag. *Flirt Akku*. 2023. URL: https://www.stadlerrail.com/en/flirt-akku/details/ (besucht am 25. 07. 2023).

[34] Stadler Rail Ag. *Flirt Akku 2-Teiler: Nahverkehrsverbund Schleswig-Holstein GmbH (NAH.SH GmbH), Deutschland*. 2021. URL: https://www.stadlerrail.com/static/img/flirt-akku/Stadler_Datenblatt_Flirt_Akku_Nah_DE.pdf.

[35] Christoph Streuling u. a. „Techno-Economic Assessment of Battery Electric Trains and Recharging Infrastructure Alternatives Integrating Adjacent Renewable Energy Sources". In: *Sustainability* 13.15 (2021), S. 8234. DOI: 10.3390/su13158234.

[36] Takashi Suzuki u. a. „Introduction and Practical Use of Energy Storage System with Lithium-ion Battery for DC Traction Power Supply System". In: *IEEJ Journal of Industry Applications* 5.1 (2016), S. 20–25. ISSN: 2187-1094. DOI: 10.1541/ieejjia.5.20.

[37] Nuria Tapia-Ruiz u. a. „2021 Roadmap for Sodium-Ion Batteries“. In: *Journal of Physics: Energy* 3.3 (Juli 2021), S. 031503. ISSN: 2515-7655. DOI: 10.1088/2515-7655/ac01ef. (Besucht am 01. 08. 2023).

[38] Silke Thomson-Pottebohm. *Pressemitteilung: Batteriezüge von Siemens Mobility für den Westerwald*. 2023. URL: https://press.siemens.com/global/de/pressemitteilung/batteriezuege-von-siemens-mobility-fuer-den-westerwald (besucht am 25. 07. 2023).

[39] Rebecca Thorne, H. Amundsen Astrid und Sundvor Ingrid. „Battery electric and fuel cell trains: Maturity of technology and market status: Maturity of technology and market status“. In: (2019).

[40] Toshiba. „Toshiba Rechargeable Battery SCiB“. In: (2021). URL: https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/ww/products-solutions/battery/scib/pdf/ToshibaRechargeableBattery-en.pdf.

[41] Mechthild Wörsdörfer u. a. *The Future of Rail: Opportunities for energy and the environment*. Hrsg. von IEA - International energy agency. 2019.

[42] Man Xie, Feng Wu und Yongxin Huang. *Sodium-Ion Batteries: Advanced Technology and Applications*. De Gruyter, Aug. 2022. ISBN: 978-3-11-074906-9. DOI: 10.1515/9783110749069. (Besucht am 11. 12. 2022).

[43] Man Xie, Feng Wu und Yongxin Huang, Hrsg. *Sodium-ion batteries: Advanced technology and applications*. 1st. Boston: De Gruyter, 2022. ISBN: 9783110749038.

Authors

Kaiser, Nicolas
As a research associate and PhD student at ISEA since November 2022. The focus of the work is on the modelling and optimisation of battery systems. Completed studies in industrial engineering with a specialisation in electrical power engineering in August 2022. Worked as a research assistant for about three years with short interruptions for several institutes at RWTH. The focus of the work was on the simulation and optimisation of electrical grids and lithium-ion batteries.

Klick, Sebastian
Research associate at ISEA since March 2021, working on the ageing of various battery technologies. Studied electrical engineering at RWTH Aachen in the Bachelor's and Master's degree. In between, he successfully completed a Master's degree in Science, Technology, and Innovation Studies at the University of Edinburgh. He already dealt with battery technologies in his bachelor's thesis and worked on the design of energy storage systems for rail vehicles as part of his master's thesis at ISEA and IFS.

Session 16
Ansgar Brockmeyer, Johannes Wilhelmer

Low carbon Passenger Railways

Decarbonisation potential of passenger rolling stock

Dr. Brockmeyer, Ansgar[1], Wilhelmer, Johannes[1]

[1]Stadler Rail AG, Bussnang, Switzerland

1 Introduction

This article analyses the decarbonization potential of different low carbon railway vehicles (i.e. electrical multiple units, battery multiple units, hydrogen-powered multiple units) for passenger transport compared to conventional diesel multiple units. It shows various examples of existing vehicles from Stadler´s product portfolio and analyses them on a structural level in terms of traction technology, efficiency, energy consumption and decarbonization potential.

Keywords: Rail Passenger Transport, Multiple Units, Zero Emission Vehicles, Decarbonisation, Low Carbon Transport, Past-Carbon Railways,

2 Relevance of Decarbonizing Rail Passenger Transport

The ability to transport hundreds of people at the same time, combined with very low driving resistance has made trains the most energy efficient mode of transportation. In Europe the railway industry could constantly improve energy efficiency since the 1990s and is responsible for only 0.5% of all transport related greenhouse gas (GHG) emissions[1]. Some of these emissions are related to the GHG intensity of the electricity production. The rest stems mainly from Diesel powered propulsion. An interesting example in Europe is Germany: roughly two thirds of train services (by distance covered) run on electrified lines. This enables the most efficient use of electric energy, by minimizing electric losses. Although over 40% of the train network are not electrified, only one third of the annual mileage and only 10% of the transported passengers are covered by Diesel-trains[2]. Another example from Switzerland shows the huge decarbonization potential by electrifying the railway system. SBB operates its passenger

trains purely electric. However, the use of 11 Mio l Diesel, mainly in the maintenance fleets, contributes to 30% of CO_2 emissions[3].

Moving from Diesel to electric propulsion is possible in several ways. Direct electrification of the network has the greatest decarbonization potential. The use of traction batteries, also called energy storage systems (ESS) is another possibility. Further, hydrogen fuel cells or hydrogen engines can increase the independent range of a train with traction batteries. Each technical solution has it's distinct advantages and drawbacks, as well as very different decarbonization potentials.

3 Development stages of Low Carbon Traction Systems

In the past Stadler Rail has shown the decarbonization potential of its train designs for non-electrified services for public transport several times. Mainly by using energy efficient drives. Diesel Multiple Units (DMU) have been realized with Diesel-Electric drives that operate the Diesel-Engine in highly efficient areas of its operational diagram. Together with state-of the art emission classes of the Diesel-engines this enabled energy savings and was thus reducing the CO_2 output of the trainset.

By enabling recuperation of the kinetic energy into the ESS while braking electrically, the energy consumption was further reduced. An important reference is the FLIRT DMU for ELRON in Estonia, contracted in 2010. However, at this time the ESS technology suitable for high power applications in trains was Super-Capacitors. The Super-Capacitors allowed to recuperate the kinetic energy of the trainset and to use it again while accelerating the train, thus lowering the overall energy consumption and increasing the acceleration performance of the train.

Of course ESS were not new in the railway business in 2010. One of the first vehicles of Stadler´s founder of Ernst Stadler was a battery locomotive that was fully battery electric. This was as early as 1943, and of course the battery system was lead acid at that time. But over 80 years of history the battery technology developed much further. Lithium Ion Battery technology evolved from the use in mobile application such as laptops and mobile phones to the automotive industry. The strong growth of the battery market delivered new solutions such as high power cells. Therefore another important reference of the early stage of a much wider use of ESS is the retrofit of a Stadler GTW DMU, run in the

Netherlands. By implementing high power Lithium Titanate (LTO) batteries, the energy consumption of the DMU was reduced between 6.2% and 12.6%, depending on the routes and the amount of batteries installed on the vehicle. This resulted in a decarbonization potential between 0.14 and 0.34 kg CO_2 / km. [4]

Moving away from fossil fuel based propulsion systems, Stadler Rail presented the FLIRT Akku as early as 2017. The FLIRT Akku is a fully electric battery train. This means that other than previous battery train like DB´s class 51x trainsets, the FLIRT Akku is an EMU as well as a BMU. It is able to operate fully electric under the wire and at the same time to charge it´s batteries while running. In non-electrified sections it is able to run solely on batteries and also to feed the auxiliary power supply such as HVAC from battery. As a regional train, capable of transporting between 100 and 300 passengers, depending on the configuration, it is suited for rural areas, to connect passengers to major railway hubs. Such lines are often rarely frequented and thus not electrified. In 2021 the FLIRT Akku demonstrator train traveled 224 km and set a Guinness world record, powered only from the onboard ESS. In regular service between 80 and 120 km are standard and up to 150 km is possible with today's railway battery technology. In Germany 90% of non-electrified lines are shorter than 120 km, making it very suitable for a battery powered train. Since the introduction of the demonstrator FLIRT Akku, Stadler rail sold 223 battery electric trains to Germany and Austria. The decarbonization potential of battery powered trains depends on the CO_2 intensity of the electricity used to operate and charge the trains. The values are discussed together with the reduction potential of all alternative drives.

For longer routes without catenary, or schedules that do not allow for frequent recharging of a battery train Stadler Rail developed hydrogen powered trains. The FLIRT H2 was developed for the US, where less than 1% of the railway network is electrified. The first customer will operate the train in California for a whole day under any weather conditions electrically, powered from hydrogen fuel cells. Also in Italy, narrow gauge trains running in rural areas in Calabria and Sardinia will be powered by hydrogen.

The decarbonization potential of H2 trains depends on the source of the hydrogen. Green, pink and with limitations blue and orange hydrogen have the ability to reduce CO_2 emissions. Concrete values are discussed together with the reduction potential of all alternative drives later on.

4 Traction Chain Topologies of alternative drives

Diesel-electric propulsion with ESS for recuperation uses a hybrid traction chain where power is fed from a Diesel-Generator and an the ESS is connected in parallel into the DC Link of the traction converter, which powers the electric motor in the bogie. While braking the motor acts as an generator and feeds back the current via the traction converter into the ESS. This means that no braking resistors are necessary, which have been used in the past to convert the electric energy into heat. Several kilowatt-hours per braking event can be stored and used again for auxiliary consumers and the next acceleration, thus reducing the energy consumption of such a traction chain.

Battery electric trains have a fully electric traction chain, as typical in electric multiple units (EMU), but with the addition of an traction battery and are thus called battery electric multiple unit (BEMU). The train can be fed from the catenary, or from the ESS on non-electrified sections. Hydrogen multiple units (HMU) have also a battery electric traction chain. They can also incorporate the high voltage traction chain of an EMU, comprising of a pantograph, speed circuit breaker, transformer (AC catenary system) or choke (DC catenary system), making it an hydrogen electric multiple unit (HEMU). The design of the ESS is focused on power to brake the train fully electrically and to have enough capacity for energy optimization of the fuel cell or hydrogen combustion engine. While driving both systems (ESS and fuel cell or hydrogen engine) feed current in parallel into the DC Link of the traction converter. While braking only the ESS acts as an energy sink, storing the kinetic energy that can later be used for auxiliary consumers or accelerating the train.

The advantage of a pure electric traction chain lies in its maximum efficiency, as no electric energy needs to be converted into chemical energy and back. Electric energy is the only energy that can be converted into any other form of energy with almost no losses. However, the cost of electrifying non-electrified railway lines is typically between 1 and 2 million € in Europe and more than 10 Mio US$ in the US. This means that for less frequented lines electrification might not be economical[6]. In this case a battery electric train is suitable as it delivers enough power to accelerate and brake trains, as well as very efficient, as batteries have typical conversion losses below 10% per direction. Thus it can be stated that a BEMU usually needs 20% more electric energy compared to an EMU.

If it comes to hydrogen powered trains the advantage lies in its increased catenary independent range. Generally speaking, there are two types of technology to convert energy of hydrogen into electric energy: Firstly there are fuel cells that use a special membrane to join O2 and H2 into H2O while generating electricity. Secondly there are H2 combustion engines that use a classic Otto thermodynamic cycle to generate mechanical energy from H2. Both technologies have their advantages and disadvantages. Using fuel cells the maximum possible efficiency is higher than using hydrogen combustion engines, although the latter have no efficiency decay over its lifetime and have a longer service life as well as cheaper maintenance and a dense service network. Efficiency wise, converting renewable electricity into hydrogen 70% is assumed, compressing, transporting and storing it comes along with approximately 90% efficiency, the onboard fuel cell, and auxiliary consumers with average values 50%. This results in roughly one third of the efficiency of an BEMU. In other words the same renewably electricity powers one hydrogen train or three BEMUs over the same distance. This has an significant impact on the decarbonization potential of HMU's[5].

5 Decarbonization Potential

Since a big part of rail passenger transport's carbon emissions stem from Diesel powered propulsion, the decarbonisation potential of the described alternative traction topologies is presented in terms of kg CO_2 / kWh. If the energy equivalent of one kWh of electricity is available and used to operate an EMU, BEMU or HMU the amount of CO_2 reduction is given, compared to a reference DMU. The analysis shows a decarbonisation potential of 0.96 kg CO_2 / kWh for a full electrical multiple unit (EMU), 0.77 kg CO_2 / kWh for a battery multiple unit (BEMU) and 0.22 kg CO_2 / kWh for a hydrogen multiple unit (HMU). This unit describes the reduction potential for purely renewable electric energy. It makes clear that wherever and whenever this condition is given the use of electrification shows by far the biggest potential in reducing CO_2 emissions in rail passenger transport. In the same scenario BEMU are the second best choice and hydrogen shows the lowest potential as the conversion losses are three times bigger as with state of the art batteries [5].

These values can be set into the context of decarbonisation measures for other industries. The replacement of lignite based power plants by renewable electricity yields a potential of 1.16 kg CO_2 / kWh and 0.819 kg CO_2 / kWh for natural gas power plants. Replacing oil heating systems with heat pumps results in 1.12 kg CO_2 / kWh, whereas hydrogen powered heating lies factor 7 lower at 0.15 kg CO_2 / kWh. Road transport has lower potentials, again with big differences between battery and hydrogen propulsion. Battery electric cars result in 0.67 kg CO2 / kWh and hydrogen for fuel cell cars in 0.26 kg CO_2 / kWh, e-Fuels end up with only 0.16 kg CO2 / kWh.

We can put these CO_2 reduction values in kg CO_2 / kWh of renewable electricity deployed into a ranking, to visualise the most and least effective options:

Reduction potential	Application	Industry
kg CO_2 / kWh	replace:	
1.16	lignite power plants by renewables	power generation
1.12	oil heating by heat pumps	building technology
0.96	DMU's by EMU's	railway
0.82	natural gas power plants by renewables	power generation
0.77	DMU's by BEMU's	railway
0.67	combustion cars by battery electric cars	automotive
0.26	combustion cars by hydrogen cars	automotive
0.22	DMU's by HMU's	railway
0.16	Diesel / Gasoline by e-Fuels in cars	automotive
0.15	natural gas heating by hydrogen	building technology

When considering the actual energy mix of different countries the unit kg CO_2 / km can be used for a meaningful comparison. It presents the CO_2 emissions per travelled distance and can easily adapted the changing CO_2 intensity in the electric mix of a regions or countries, or companies electricity mix. Austria with its hydropower intensive electricity production emits on average 0.248 kg CO_2 / kWh over the past 6 years. For such an environment a BEMU emits 0.99 kg CO_2 / km, and HMU 3.41 kg CO_2 / km and the reference DMU 3.08 kg CO_2 / km from burning Diesel. It can be seen, that today a hydrogen train running on hydrogen from electrolysers powered by the national average electricity emits more CO_2 than a pure Diesel train. Whereas a BMU saves two thirds of the emissions compared to the DMU. With the values for Germany of 0.474 kg CO_2 / kWh an HMU even emits roughly twice as much CO_2 at 6.52 kg CO_2 / km and an BMU saves one third at 1.89 kg CO2 / km. It can be shown that a carbon intensity of greater 0.75 kg CO_2 / kWh in the electricity generation puts an BMU at the same level as an DMU. For hydrogen to be at the same level a value lower than 0.22 kg CO_2 / kWh is necessary. Some European countries already have values below 0.1 kg CO_2 / kWh, and

could thus make use of the big decarbonisation potential BEMU's give, without investments in additional infrastructure for hydrogen. In areas without electrification of the railway network and surplus of renewable energy it would make sense to apply hydrogen electrolysers as a power to gas technology and use the hydrogen in HMU's. [5]

6 Summary

The railway industry has shown a constant improvement in energy consumption. Stadler Rail has over 24 contracts, where traction batteries are used to either reduce direct CO_2 emissions on the vehicle, or remove them completely. As shown in this article, replacing Diesel powered trains by EMU's through electrification, or the use of BEMU's has the biggest decarbonization potential. Carbon intensity in electricity generation is the second take away message, as this remains the limiting factor in using the decarbonization potential of EMU's and BEMU's.

Literatur

[1] UNIFE World Rail Market Study (2022)

[2] Dr. W. Klebsch, P. Heininger, J. Martin, VDE, Alternativen zu Dieseltriebzügen im SPNV, Einschätzung der systemischen Potenziale, Selbstverlag (2019)

[3] S. Wienands, SBB, BIENE – BatterIEschwarm im BahnstromNEtz Integration und Bewirtschaftung von Batterien auf Schienenfahrzeugen, Schlussbericht, Schweizer Bundesamt für Verkehr (BAV) (2022)

[4] J. Wilhelmer, Stadler Rail, Potentialanalyse mittels verschiedener Simulationsmethoden für Energiespeichersysteme auf Diesel-Triebzügen (2019)

[5] M. Priessnitz, ÖBB Hybrid Rail Systems, Oberbremsrätekonferenz 2021

[6] T. Bähr, Entwicklung des Mobilitäts-- und Verkehrssystems in schrumpfenden Stadtregionen , Dissertation, TU Dresden (2011)

[7] Prof. D. U. Sauer, RWTH Aachen, Concept for Co2 Neutral Energy Supply Systems, workshop proceedings (14.02.2023)

IRSA 2023

SESSION 17

AUTOMATISIERUNG DES GÜTERVERKEHRS

FREIGHT TRAFFIC AUTOMATION

Session 17
Lucas Greiner-Fuchs, Steffen Schäfer, Tobias Hofmeier, Martin Cichon

7-Layer Shunting Model: Generische Szenariobeschreibung automatisierter Rangierfunktionen

Greiner-Fuchs, Lucas[1], Schäfer, Steffen[1], Hofmeier, Tobias[1], Cichon, Martin[2]

[1]Institut für Fahrzeugtechnik Nürnberg, Technische Hochschule Nürnberg
[2]Institut für Fahrzeugsystemtechnik, Karlsruher Institut für Technologie

Zusammenfassung

Das System Bahn ist einerseits geprägt durch hohe Energie- und Ressourceneffizienz, bezogen auf die eigentliche Transportleistung, und andererseits durch eine hohe Korrelation aller Subsysteme und erheblicher Ressourcenaufwände für vorbereitende, begleitende und nachgelagerte Prozesse. Aus der Energieeffizienz ergibt sich gesellschaftliches Interesse am Bahnverkehr, aus der Komplexität des Gesamtsystems das Erfordernis der Automatisierung, um im Wettbewerb logistischer Ketten bestehen und wachsen zu können. Für eine stärkere Auslastung des Personen- und Güterverkehrs auf der Schiene wird neben einer verbesserten Disposition auch ein Fokus auf den hochautomatisierten Betrieb von Schienenfahrzeugen gesetzt.

Als wichtiger Bestandteil für die Sicherstellung des fehlerfreien Betriebs automatisierter Lokomotiven muss ein Schwerpunkt auf die Systemerprobung gelegt werden. Dazu ist es notwendig, geeignete Testmethoden zu entwickeln und anzuwenden. Bereits erfolgreich erprobte Methodiken und Umsetzungen aus der Automotive Branche können hierbei als Ansatz dienen, müssen jedoch auf den bahnspezifischen Anwendungsfall angepasst und erweitert werden.

Für die Erprobung einer vollautomatischen Rangierlokomotive wird eine szenariobasierte Testmethodik entworfen. Hierbei werden definierte Szenarien einerseits in der Simulation und andererseits im Feld überprüft. Wichtig ist, bei der Generierung der hohen Anzahl an möglichen Situationen einen Ansatz auf Vollständigkeit zu verfolgen. Zur Definition der Testszenarien wird die Methode des *6-Layer Model* auf das Einsatzfeld Rangierbahnhof angepasst. Aufgrund der vorliegenden strikten Regulierungen und Abläufe im Rangierbetrieb wird das Modell um den zusätzlichen Layer Rangierauftrag erweitert und so die Szenariogenerierung effizienter und zielführender umgesetzt. Im Anschluss zur

Beschreibung des neu gebildeten *7-Layer Shunting Model* erfolgt ein Anwendungsbeispiel zur Szenariodefinition und -ableitung in Bezug auf den automatisierten Rangierbetrieb.

Keywords: Szenariobasiertes Testen; Layer Model; ATO; automatisierte Schienenfahrzeuge; Szenariobeschreibung

1 Einleitung

Der Stellenwert der Eisenbahn in politischer wie auch gesellschaftlicher Ausrichtung hat in den letzten Jahren deutlich an Bedeutung gewonnen. Klimafreundlichkeit durch geringe Treibhausgasemissionen, Energieeffizienz und Elektromobilität, Einsatz erneuerbarer Energien, hohe Verkehrssicherheit, sowie geringer Flächenbedarf im Personen- und Güterverkehr sind nur die wichtigsten Gründe für einen Ausbau des Schienenverkehrs. [1] Die Entwicklung und anteilhafte Nutzung des Schienenverkehrs ist in den letzten Jahrzenten jedoch größtenteils stagniert und im Vergleich zur Automobilindustrie stark vernachlässigt worden. In den Jahren 1991 bis 2019 ist die anteilhafte Personenverkehrsleistung lediglich um 2 % gestiegen und die Güterverkehrsleistung um 1,5 % gesunken bei insgesamt zunehmender Verkehrsleistung. Gründe hierfür sind vor allem in der geringen Wirtschaftlichkeit verortet. [2], [3]

Um diesem Verlauf entgegenzuwirken, hat die Politik eine erhöhte Priorität auf den Schienenverkehr gelegt und setzt sich das Ziel, die Verkehrsleistung, Elektrifizierung und Innovation im Bahnbereich zu steigern. [4], [5] Neben attraktiven Förderangeboten für Unternehmen, wie beispielsweise der Reaktivierung von Anschlussbahnen [6], wird ein starker Fokus auf die Digitalisierung sowie Automatisierung der Eisenbahn gelegt.

Als potentielles Anwendungsfeld des automatisierten Bahnbetriebs eignen sich die Aufgaben einer Rangierlokomotive. Begründet durch die Vorgabe des „Fahrens auf Sicht“ und den verhältnismäßig geringen Geschwindigkeiten von maximal 40 km/h auf Rangierbahnhöfen bietet sich der Rangierbetrieb für eine sensorgestützte Automatisierung an. Hierbei soll der Lokrangierführer durch geeignete Sensoren zur Umfeldüberwachung, eine Entscheidungslogik und entsprechend angesteuerte Aktoren abgelöst werden.

Ein wichtiger Bestandteil für den Einsatz automatisierter Fahrsysteme ist die Nachweiserbringung des sicheren Betriebs. Als Schwellenwert wird vorausgesetzt, dass automatisierte Bahnsysteme mindestens genauso sicher agieren wie menschliche Triebfahrzeugführer. Bei der Entwicklung einer dazu notwendigen und geeigneten Testmethodik ist es zielführend, bereits erfolgreiche Erprobungsansätze aus der Automobilindustrie heranzuziehen und auf die bahnspezifischen Herausforderungen hin

zu adaptieren sowie zu erweitern. Bestehende Methoden müssen dabei nicht vollständig neu entwickelt werden und dienen als solide Vorlage für die Testentwicklung im Bahnbereich.

2 Stand der Technik

Ausgehend vom automatisierten Straßenverkehr wird ein kurzer Überblick zum automatisierten Zugbetrieb gegeben. Es folgt eine Beschreibung des szenariobasierten Testens und der Entwicklungsstand des *6-Layer Model* (6LM). Abschließend werden Herausforderungen für die Automatisierung von Schienenfahrzeugen aufgeführt.

2.1 Automatisiertes Fahren

Die Umsetzung und Absicherung automatisierter Fahrfunktionen hat einen hohen Stellenwert in der Industrie. Zur Verbesserung und Zuverlässigkeit der Systeme wird sowohl am automatisierten Straßenverkehr als auch am automatisierten Zugbetrieb geforscht.

2.1.1 Automatisierter Straßenverkehr

Die Automatisierung im Straßenverkehr sorgt für eine fortlaufende Übertragung von Fahrfunktionen der Längs- und Querdynamik, der Überwachung des Fahrumfelds sowie der Verantwortung für den sicheren Betrieb weg vom Fahrer auf das automatisierte Fahrsystem (ADS, engl. Automated Driving System). Aufgrund der kontinuierlichen Weiterentwicklung sowie Verbesserung der Systemaufgaben und der daraus hervorgehenden Komplexität in Bezug auf Regularien und Verantwortung im Straßenverkehr wurde 2014 die Norm SAE J3016 [7] durch den Verband der Automobilingenieure (SAE, engl. „Society of Automotive Engineers“) definiert. Die Norm unterteilt das automatisierte Fahren in sechs unterschiedliche Level und legt dabei jeweils fest, ob der Fahrer oder das ADS die Quer- und Längsführung, Umfeldüberwachung und Verantwortung übernehmen.
Das erste Level „Stufe 0“ beschreibt keine Automation. Hierbei liegen alle Aufgaben beim Fahrer und es sind lediglich unterstützende Systeme vorhanden. In der „Stufe 1“ sind Assistenzsysteme zu finden. Diese übernehmen einen Teil der Fahrzeugführung, lösen den Fahrer jedoch nicht vollständig davon ab. Die Umfeldüberwachung sowie Verantwortung über den sicheren Betrieb bleiben beim Fahrer. Bei der Teilautomatisierung („Stufe 2“) übernimmt das System abhängig vom Fahrmodus die

vollständige Quer- und Längsführung. Äquivalent zu Stufe 1 bleiben die Beobachtung der Umgebung und die Fahrzeugverantwortung beim Fahrer. Eine Änderung hinsichtlich der Überwachung des Fahrbereichs erfolgt in „Stufe 3“, der bedingten Automatisierung. Das System kann hier abhängig vom Einsatzbereich die vollständige Fahrzeugführung inklusiver Umgebungsbeobachtung übernehmen. Der Fahrer verbleibt lediglich als Rückfallebene der dynamischen Fahraufgabe. Ab „Stufe 4“ beginnt der Bereich des hochautomatisierten Fahrens. In definierten Fahrmodi ist das System für alle Aufgaben verantwortlich und der Fahrer trägt keine Verantwortung mehr. „Stufe 5“ entspricht der Vollautomatisierung, bei welcher das System in allen Fahrmodi und Einsatzbereichen das Fahrzeug vollständig ohne menschlichen Eingriff beherrscht. [7], [8]
Als große Herausforderung der ADS gilt die Gewährleistung des fehlerfreien Betriebs. Es ist anzustreben, dass ein ADS mindestens genauso zuverlässig wie ein menschlicher Fahrer agiert. Systeme der Stufe 3, wie zum Beispiel der Autobahnchauffeur, sind bereits in Serienfahrzeugen verfügbar. Anhand dieses Systems wurde im Forschungsprojekt Pegasus eine Testmethodik zur Erprobung von ADS erarbeitet. [9] Darauf aufbauend wird im Nachfolgeprojekt Verification Validation Methods weiter an Testverfahren und Methoden zur Absicherung von ADS geforscht, mit dem Ziel, Level 4 und 5 Systeme zuverlässig zu erproben. [10]

2.1.2 Automatisierter Zugbetrieb

Zugbeeinflussungssysteme dienen der Beeinflussung und Sicherung von Zugfahrten. Sie können im Fehlerfall der Lokomotive oder des Zugführers automatisiert in die Steuerung des Zugs eingreifen und diesen beispielsweise abbremsen. Zur Umsetzung ist eine drahtlose Kommunikationsschnittstelle zwischen Fahrzeug- und Landseite notwendig. Dies ermöglicht einen leistungseffizienten Zugbetrieb und dient als Grundlage der automatisierten Betriebsführung. Weltweit existieren eine Vielzahl an unterschiedlichen Zugbeeinflussungssystemen. Bekannte und weit verbreitete Systeme sind unter anderem „Communication-Based Train Control“ (CBTC) oder „European Train Control System“ (ETCS). [11],[12]
Das technische System zur Umsetzung des automatisierten Zugbetriebs wird übergeordnet als Automatic Train Control (ATC) bezeichnet und ist in Abbildung 1 als CBTC-System schematisch dargestellt. Es besteht immer aus dem Untersystem Automatic Train Protection (ATP) und kann zusätzlich entsprechend der Automatisierungsstufe die Teilsysteme Automatic Train Operation (ATO) und Automatic Train Supervision (ATS) beinhalten. ATP dient dem signaltechnisch sicheren Zugbetrieb und vermeidet Unfälle wie Kollisionen oder Entgleisungen. Als

Grundfunktionen umfasst das Teilsystem die Fahrwegsicherung, Fahrzeugortung und Abstandsregelung. Das System wird einerseits auf dem Fahrzeug und andererseits in der Infrastruktur installiert. Die Steuerung des Fahrzeugs übernimmt das Teilsystem ATO. Es umfasst alle Tätigkeiten, die üblicherweise vom Fahrzeugführer ausgeführt werden, wie zum Beispiel die Geschwindigkeitsregelung und Betriebsbremsungen. Im Idealfall ist das System mit der ATS verbunden und erhält so streckenseitige Informationen. ATS überwacht den gesamten Zugbetrieb und sorgt für die Einhaltung des Fahrplans. Im Störungsfall ermittelt das System eine optimale Lösungsstrategie und gibt diese an die ATO-Komponente der Züge weiter. [11]

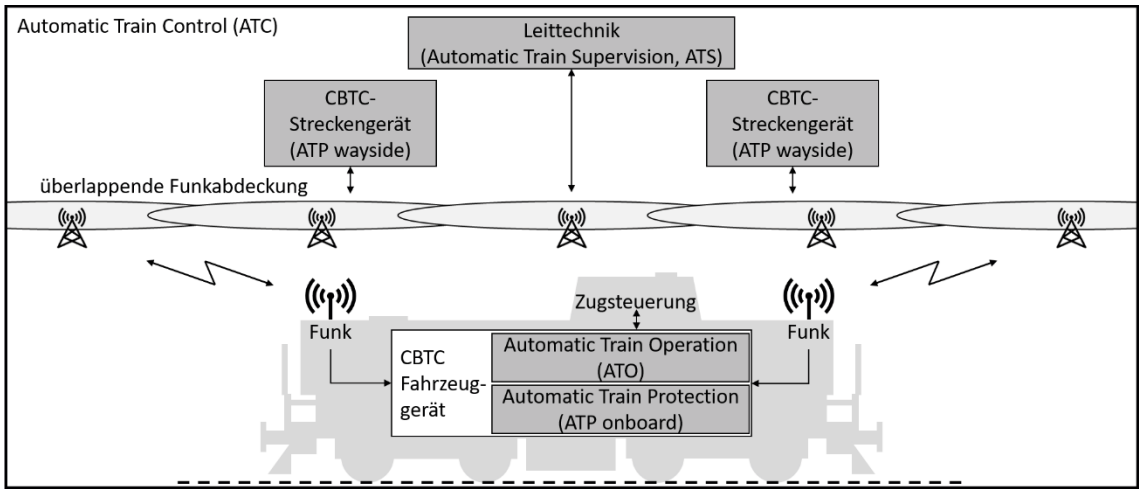


Abbildung 1:Aufbau ATC-System nach [11]

Je nach Funktionsumfang und Ausarbeitung des ATC sowie seiner Teilsysteme wird die automatisierte Zugbeeinflussung nach der IEC 62290-1:2014 [13] und IEC 62267 [14] in verschiedene Automatisierungsstufen (Grade of Automation, GoA) unterteilt. Vergleichbar mit den Automatisierungsgraden des automatisierten Fahrens im Automobilbereich (siehe Kapitel 2.1.1) wird bei den GoA-Leveln anhand der Verantwortlichkeit einzelner Fahr- und Überwachungsfunktionen unterschieden. Grundlegend sind hierbei das Sichern der Zugbewegung, die Fahrzeugführung, die Überwachung des Fahrgastwechsels, die Überwachung der Profilfreiheit, der automatische Zugbetrieb sowie die Störfallerkennung und das Störfallmanagement. Die Funktionen werden dabei entweder vom Bediener oder dem Sicherungssystem umgesetzt. GoA0 bezeichnet den „Zugbetrieb auf Sicht“. Als geringste Automatisierungsstufe werden alle Aufgaben und Funktionen sowie die Verantwortung des sicheren Betriebs vom Bediener übernommen. Im „Nicht automatisierten Zugbetrieb“ (GoA1) verkehrt das Fahrzeug auf einem technisch gesicherten Fahrweg. Die Sicherung der Zugbewegung wird somit, mit Ausnahme der Geschwindigkeitsüberwachung, vom Sicherungssystem

übernommen. GoA2 entspricht dem „Halbautomatischen Zugbetrieb“. Neben der vollständigen Übernahme der Sicherung der Zugbewegung ist das Sicherungssystem in diesem Fall ebenso für das Fahren des Fahrzeugs zuständig. Der Fahrer überwacht die beiden Tätigkeiten und ist weiterhin für alle anderen Aufgaben verantwortlich. Die erste hochautomatisierte Fahrstufe umfasst den „Begleitete fahrerlose Zugbetrieb“ in GoA3. Hierbei werden alle Aufgaben sowie Funktion vom Sicherungssystem übernommen und der Fahrer hat keine überwachende Tätigkeit mehr. Betriebliche Aufgaben sowie die Rückfallebene im Fehlerfall werden weiterhin vom Fahrer umgesetzt. Im „Vollautomatischen fahrerlosen Zugbetrieb“ (GoA4) ist kein Fahrer mehr auf dem Fahrzeug notwendig. Das Sicherungssystem übernimmt dabei jegliche Funktionen und Aufgaben. Zur Umsetzung ist eine hohe Anforderung an die Sensorik und Systemsteuerung zwingend notwendig. [11], [13], [14]
Abbildung 2 zeigt zuletzt eine gegenüberstellende Darstellung der Automatisierungslevel im Straßen- und Schienenverkehr und wie diese zu vergleichen sind.

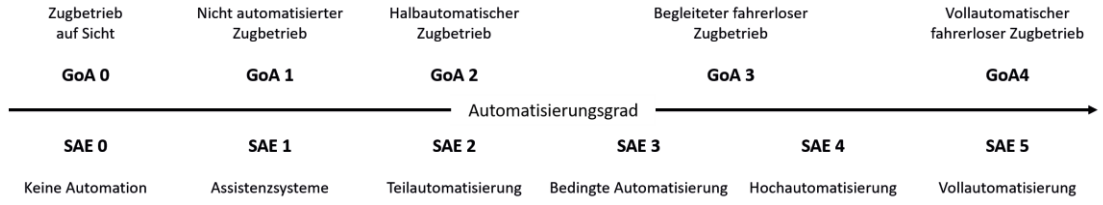


Abbildung 2: Gegenüberstellung Automatisierungsgrade nach SAE und GoA

2.2 Szenariobasiertes Testen

Zur Erprobung hochautomatisierter Fahrfunktionen sind herkömmliche Testansätze, wie beispielsweise reale Feldtests mit Prototypen, aus Gründen der Wirtschaftlichkeit, Übersichtlichkeit, Zeiteffizienz und des Organisationsaufwandes allein nicht praktikabel. Aus diesem Grund wird eine szenariobasierte Testmethode verfolgt, bei der potentielle Eventualitäten im Anwendungsbereich der hochautomatisierten Fahrfunktion durch einzelne Szenarien möglichst vollständig beschrieben und in einem parallelen Prozess in der Simulation sowie im Feld getestet werden. [15]
Um den Aufbau eines Szenarios zu verstehen, wird ein Verständnis der Begriffe Szene, Szenerie und Situation benötigt. Die Szene beschreibt eine Momentaufnahme der Umgebung. Sie umfasst die Szenerie, dynamische Elemente sowie Akteure und Beobachter. Die Szenerie umfasst alle stationären Elemente und bildet die Grundstruktur für die Gestaltung einer Szene. Die Situation beschreibt funktionale Informationen innerhalb der Szene. Dazu gehören z.B. relevante Interaktionen und Zustände

verschiedener Elemente sowie Fahraufgaben und Missionen dynamischer Objekte. Ausgehend von einer Startszene und den definierten Funktionsbeschreibungen durch die gegebene Situation beschreibt ein Szenario eine zeitliche Entwicklung von Szenenelementen. Innerhalb einer definierten Zeitspanne werden mehrere Szenen durch Aktionen und Ereignisse miteinander verknüpft. [16]
Basierend auf dem Aufbau eines Szenarios kann dieses in unterschiedlichen Abstraktionsgraden beschrieben werden. Die Detailtiefe variiert hierbei nach dem spezifischen Anwendungsfall. Im Rahmen des Projekts Pegasus wurden in Anlehnung an die Arbeiten von [17] drei Detailebenen definiert. Im ersten Schritt erfolgt eine oberflächliche Beschreibung einer Situation als funktionales Szenario. Diese ist die am stärksten abstrahierte Ausführung und wird oft in semantischer Form implementiert. Die Konkretisierung des funktionalen Szenarios ist das logische Szenario, bei dem ausgewählte semantische Variablen durch Parameterräume beschrieben werden. Eine Variation dieser Parameter bildet die Grundlage für die Bildung des konkreten Szenarios, das eine einzelne Instanz des logischen Szenarios darstellt. Alle Variablen haben fest definierte Parameter und das Szenario ist vollständig beschrieben. [9], [17]

2.3 6-Layer Model in Automotive Anwendungen

Ein gängiger methodischer Ansatz der Automobilbranche für die generische Erstellung von Szenarien zum Testen automatisierter Fahrfunktionen ist das 6LM. Im Folgenden wird die Entwicklung des Modells aufgeführt und der aktuelle Stand beschrieben.

2.3.1 Entwicklung des 6-Layer Model

Für die Anwendung der szenariobasierten Testmethodik ist ein strukturierter methodischer Ansatz zur Definition der Szenarien erforderlich. Dabei ist es einerseits notwendig, die Vollständigkeit der Testszenarien nachzuvollziehen und andererseits für die simulative Erprobung der hohen Szenarienanzahl einen iterativen Generierungsprozess zu verfolgen. Zu diesem Zweck ist ein sequentieller Aufbau und eine Definition der Szenarien in mehreren Ebenen sinnvoll. Im Projekt Pegasus wird zur Beschreibung der Szenarien das 6LM verwendet. [9] Dieses basiert auf dem bei [18] beschriebenen *4-Layer Model*. Das Modell wurde zur effizienten systematischen Testgenerierung für automatisierte Fahrfunktionen in der Automobilindustrie erstellt. Es besteht aus den vier Ebenen Grundroute, situationsabhängige Anpassung der Route, Verkehrssituation und Umgebung. Innerhalb des Entwicklungsprozesses im Pegasus Projekt wurde das *4-Layer Model*, basierend auf [15] und [18], bei [19] in das *5-Layer*

Model überführt. Die fünf Layer sind als Straßenebene, Verkehrsinfrastruktur, temporäre Änderungen von Layer 1 und 2, Objekte sowie Umwelt definiert. Zusätzlich wurde dem Modell die sechste Ebene digitale Informationen hinzugefügt, um das 6LM zu bilden. [9]

2.3.2 Aktueller Stand des 6-Layer Model

Im Rahmen des Nachfolgeprojekts von Pegasus Verification Validation Methods findet eine detaillierte und überarbeitete Beschreibung des 6LM statt. Jeder Layer wird durch einen ausgewählten Namen benannt und umfasst verschiedene Objektkategorien. Die Objekte werden als Entitäten deklariert und zusätzliche Objektinformationen wie Position, Geschwindigkeit, Farbe und Material als Eigenschaften definiert. Weitere Informationen sind als Annotationen angegeben. Abbildung 3 veranschaulicht die sechs Ebenen mit ausgewählten Beispielen an Entitäten. [20]
Layer 1 wird als "Straßennetz und Verkehrsleitobjekte" bezeichnet. In dieser Ebene wird das Straßennetz beschrieben, einschließlich aller dazu gehörenden permanenten Objekte, die während des Szenarios stets unverändert bleiben. Zusammenfassend beschreibt die erste Ebene das Gebiet, auf dem sich die Verkehrsteilnehmer bewegen können und welche Regeln dabei zu beachten sind. [20]
Die zweite Ebene heißt "Straßenrandbebauung". Hier sind alle statischen Objekte aufgelistet, die zur Straßenumgebung gehören. Diese Objekte befinden sich in der Regel nicht auf der Straße, sondern neben dieser. Elemente der Ebene 2 sind fest an ihrem Platz installiert und führen keine Bewegungsaktion innerhalb des Szenarios aus. Zur Vereinfachung können Bewegungen wie das Schwingen von Blättern im Wind als Teil der Layer 2 Objekte definiert werden. [20]
Innerhalb der Ebene 3 finden "Vorübergehende Änderungen von Ebene 1 und Ebene 2" statt. In diesem Layer wird keine neue Elementgruppe hinzugefügt, sondern es werden Anpassungen der Elemente aus den Ebenen 1 und 2 beschrieben. Dieser zusätzliche Layer wurde eingeführt, um z.B. Zustandsänderungen von stationären Objekten durch äußere Einwirkungen darstellen zu können. Der Zustand des Objekts verbleibt jedoch während des Szenarios unverändert. Zudem ist die zeitliche Verweildauer in diesem Stadium nicht genau definierbar und hängt vor allem von den auftretenden Ereignissen ab. [20]
Layer 4 enthält "Dynamische Objekte" und berücksichtigt als erste Ebene die zeitliche Abfolge. Demnach gibt es in dieser Ebene bewegliche Objekte, die entweder einem Manöver oder einer Trajektorie folgen, oder keine Bewegung ausführen, aber physisch bewegt werden können. Darüber hinaus ist anzumerken, dass zwar Manöver und Trajektorien der Layer 4 Objekte dargestellt werden, jedoch keine Interpretation der Bewegung oder explizite Missionen und Ziele aufgeführt sind. [20]

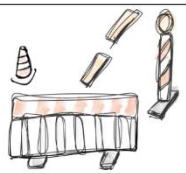
Layer 1 – Straßennetz und Verkehrsleitobjekte		Layer 4 – Dynamische Objekte	
	• Straßen inkl. Seitenstreifen, Bürgersteige, Parkplätze usw. • Fahrbahnmarkierungen • Verkehrszeichen und -ampeln		• Fahrzeuge (bewegt und stehend) • Fußgänger (bewegt und stehend) • Anhänger • Tiere • Umfallende Bäume (zum aktuellen Zeitpunkt) • Diverse Gegenstände wie Bälle, Coladosen usw.
Layer 2 – Straßenrandbebauung		**Layer 5 – Umweltbedingungen**	
	• Gebäude • Vegetation • Leitplanken • Straßenlaternen • Werbetafeln und -säulen		• (Künstliche) Beleuchtung • Niederschlag • Zustand Straßenoberfläche (trocken, nass, vereist usw.) • Wind
Layer 3 – Vorübergehende Änderungen von Ebene 1 und Ebene 2		**Layer 6 – Digitale Information**	
	• Baustellenschilder • Temporäre Markierungen • Verdeckte Markierungen • Auf die Straße gestürzte Bäume		• Status von Verkehrsampel und umschaltbaren Verkehrszeichen • V2X Nachrichten • Mobilfunknetzabdeckung

Abbildung 3: 6-Layer Model mit Beispielen, übersetzt aus [20]

Die fünfte Ebene heißt "Umweltbedingungen" und enthält Informationen über Wetter-, Witterungs- und Lichtverhältnisse. Daraus abgeleitet finden sich in Layer 5, resultierend aus unterschiedlichem Niederschlag und Witterung, auch Bodenbedingungen (nasse, schneebedeckte, vereiste Straße) wieder. Lichtquellen beziehen sich nicht nur auf natürliches Licht durch den Stand der Sonne und des Mondes, sondern auch auf künstliches Licht, das z.B. von Straßenlampen wirkt. Die Lampen als Objekt selbst sind jedoch in Layer 2 enthalten. Darüber hinaus haben die Umgebungsbedingungen auch eine zeitliche Beschreibung, die im Rahmen von Möglichkeit und Logik zu Zustandsänderungen von Objekten führen kann, wie beispielsweise sich im Wind biegende Pflanzen. [20]

Als "Digitale Information" bildet Layer 6 die letzte Ebene. In dieser findet der digitale Informationsaustausch und die Kommunikation statt. Es werden alle Schnittstellen zwischen Fahrzeugen und Infrastrukturelementen aufgeführt. Der Schwerpunkt liegt hier jedoch nicht auf dem physischen Element, sondern auf der digitalen Nachricht, die übertragen wird. [20]

2.4 Herausforderungen des automatisierten Fahrens auf der Schiene

Bei der Entwicklung und Erprobung automatisierter Fahrsysteme für Schienenfahrzeuge kann von den Forschungsansätzen und Methoden aus der Automobilindustrie profitiert werden. Dennoch ist aufgrund unterschiedlicher Anforderungen des Schienen- und

Straßenverkehrs eine Eins-zu-Eins Anwendung der Methoden nicht zielführend und umsetzbar.

Mit der Etablierung der Norm SAE J3016 [7] im Jahr 2014 und der Norm IEC 62290-1 [21] aus dem Jahr 2006 haben sowohl die Automobil- als auch Bahnindustrie eine detaillierte Beschreibung und Unterteilung von Fahrsystemen hinsichtlich ihres Automatisierungsgrades geschaffen. (siehe Kapitel 2.1) Trotz der frühen Definition entwickelte sich die Automatisierung auf der Schiene langsamer als auf der Straße. Durch den hohen Stellenwert der Automobilindustrie und den direkten Nutzen für den Kunden als Selbstfahrer wurde die Entwicklung neuer Fahrerassistenzsysteme vorangetrieben und die Automatisierung des Automobils zunehmend verbessert. Die Systeme unterstützen den Fahrer in puncto Sicherheit und Fahrkomfort und können dank moderner Sensorik zur Umfeldüberwachung in vielen Situationen im Straßenverkehr eingesetzt werden.

Dennoch wurde auch im Schienenverkehr bereits frühzeitig Automatisierung in die Praxis umgesetzt. Das erste GoA4-System wurde 1981 auf der Port Island Line in Kobe, Japan als spurgeführtes Reifen-Fahrbahn-System vorgestellt. 1985 folgte mit dem SkyTrain in Vancouver das erste System im klassischen Rad-Schiene-Kontakt. [22] Als bekanntes Beispiel in Deutschland verkehrt seit 2008 ein Teil des U-Bahn-Netzes in Nürnberg ohne Fahrer. Bei den aufgeführten Beispielen ist jedoch anzumerken, dass sich die Fahrzeuge auf einem abgegrenzten Streckennetz bewegen und nur im Bahnhof mit Personen und Hindernissen in Kontakt kommen. Als weiteres Beispiel hat das australische Unternehmen RioTinto seit 2017 seine Erzzüge automatisiert und kann mit diesen Strecken von 1500 km zurücklegen. Auf der Bahnstrecke fährt der Zug jedoch kilometerlang durch kaum besiedelte Gebiete und Kreuzungspunkte mit anderen Verkehrsteilnehmern sind gesondert gesichert. [23]

Beim regulären Streckenbetrieb ist die Automatisierung schwieriger zu realisieren. Im Gegensatz zum Auto fahren Züge in einem definierten Abstand zueinander. Das bedeutet, dass der Triebfahrzeugführer die Bestätigung erhält, dass ein bestimmter Streckenabschnitt frei ist und kein anderes Schienenfahrzeug dort verkehrt. Dies ist notwendig, da aufgrund der hohen Massen und der daraus resultierenden langen Bremswege sowie des gleisgebundenen Zustands ein schnelles Anhalten oder Ausweichen nicht möglich ist. Das Einblicken des gesamten vorliegenden Streckenverlaufs ist sowohl für Fahrer als auch Sensorik nicht möglich. [24]

Eine Anwendung, bei der die Zugsicherung durch Fahren auf Sicht realisiert wird, ist beispielsweise das Rangieren in einem Rangierbahnhof. Äquivalent zum Automobil ist der Lokrangierführer für den sicheren Betrieb und die Überwachung der Umgebung verantwortlich. Allerdings bleiben die Anforderungen der hohen Massen, der langen

Bremswege und der Gleisgebundenheit bestehen. Darüber hinaus ist der Abstand zu Objekten außerhalb des Lichtraumprofils häufig sehr gering. Aus diesem Grund ist auch hier eine Eins-zu-eins-Übertragung von Funktionen, Lösungen und Systemen aus dem Automobilbereich auf den Bahnbereich nicht möglich. Allerdings müssen Lösungen, die in der Automobilindustrie bereits erfolgreich eingesetzt werden, nicht neu erfunden werden. Vielmehr liegt das angestrebte Ziel darin, von den Entwicklungsfortschritten der Automobilbranche zu lernen und diese in angepasster Weise auf die Entwicklung hochautomatisierter Schienenfahrzeuge zu übertragen.

3 Generische Beschreibung des Rangierbahnhofs

Bei der Erprobung einer vollautomatischen Rangierlokomotive (VAL) ist der Einsatz einer szenariobasierten Testmethodik aufgrund des hohen Automatisierungsgrads des Systems sinnvoll und zielführend. Hierbei ist ein grundlegendes Element, möglichst vollständig alle auftretenden denkbaren und risikobehafteten Situationen im Anwendungsfeld des automatisierten Systems darzustellen. Dazu müssen das Einsatzgebiet der VAL, hier ein Rangierbahnhof, und alle darin vorkommenden Objekte sowie Begebenheiten durch eine geeignete Methodik festgelegt werden.

3.1 Adaption des 6-Layer Model auf den Bahnbereich

Für die Definition und methodische Ableitung der Szenarien wird das 6LM als Referenz herangezogen und auf den bahnspezifischen Anwendungsbereich angepasst, hier mit Fokus auf dem automatisierten Rangierbetrieb. Zur Festlegung des zulässigen Betriebsbereichs einer VAL und der damit zusammenhängenden Limitierungen des automatisierten Systems wird basierend auf der PAS 1883:2020 [25] eine Operational Design Domain (ODD) spezifiziert. Dabei werden die Taxonomie der Norm auf den Bahnbereich angepasst sowie die Attribute zur Szenerie, Umgebungsbedingungen und dynamischen Akteuren definiert. Neben der Festlegung der zu befahrenden Infrastruktur und darin vorkommender statischer und dynamischer Elemente werden auch grundlegende Wetter- und Lichtbedingungen aufgeführt. Auf Basis der ODD erfolgt die Definition und Zuordnung der Bestandteile des 6LM als Grundlage zur generischen Beschreibung eines Rangierbahnhofs. Abbildung 4 veranschaulicht die Benennung und Entitäten im abgeleiteten 6LM für Anwendungen im Rangierbetrieb.
Der erste Layer umfasst hierbei das „Schienennetz und Signale“. Neben der Definition des Gleisverlaufs samt Ober- und Unterbau werden elektrische als auch mechanische Signale sowie Beschilderung und verbaute Sensorik aufgeführt. Weitere zum

Schienennetz gehörige Objekte wie Masten für Oberleitung und Beleuchtung sowie zusätzliche integrierte Schieneninfrastruktur, wie beispielsweise Gleisbremsen, sind ebenfalls im ersten Layer zu finden.

Abbildung 4: 6LM für Rangieranwendungen

In der zweiten Ebene „Stationäre Objekte“ werden Gebäude, Vegetation und weitere ortsfeste Objekte innerhalb der Bahnanlage beschrieben. Dies umfasst typischerweise Elemente wie Zäune oder auch abgestellte Container.

Ähnlich zum originalen 6LM werden im dritten Layer „Temporäre Änderungen von Layer 1, 2 (& 4)“ aufgeführt. Darunter fallen unter anderem Notfälle (Entgleisungen als Layer 4 Objekt), temporär geschlossene Gleise sowie zeitweise auf dem Gleis liegende Objekte.

Der vierte Layer beschreibt „Dynamische Objekte“. In erster Linie sind hier Eisenbahnfahrzeuge vermerkt. Zusätzlich können auch Straßenfahrzeuge sowie andere Akteure wie beispielsweise Personen und Tiere auftreten. Des Weiteren werden Interaktionen und Manöver der dynamischen Elemente beschrieben.

Im Bereich der „Umweltbedingungen“ in Layer 5 werden ähnlich zur Automobilbranche Wetter-, Licht- und Bodenbedingungen aufgeführt. Dabei sind unter anderem unterschiedliche Formen und Intensität von Niederschlag sowie die daraus resultierende Bodenbeschaffenheit beschrieben. Die Illumination bezieht sich sowohl auf natürliches Licht in Form des Sonnen- oder Mondstandes, als auch künstliche Lichtquellen bei mangelnder Umgebungsbeleuchtung.

Layer 6 beschreibt zuletzt die „Digitalen Informationen“. Ferner fallen darunter ein digitaler Bahnhofs- oder Streckenatlas, Lokalisierungssignale, Zugfunk zwischen Lok und Landseite sowie der Status der Lichtsignalanlagen.
Durch die Anpassung der Elemente und Beschreibungen der einzelnen Layer ist das 6LM für Rangieranwendungen bereits ein geeignetes Werkzeug zur Ableitung und Definition von Szenarien für die Erprobung automatisierter Fahrsysteme einer VAL. Zudem ist eine Übertragung auf andere Anwendungsbereiche des automatisierten Zugbetriebs einfach möglich.

3.2 Erweiterung zum 7-Layer Shunting Model

Aufgrund der umfangreichen und detaillierten betrieblichen Regelungen am Rangierbahnhof und der damit verbundenen funktionalen Anforderungen an den Rangierbetrieb wird das 6LM für die szenariobasierte Erprobung der VAL zum *7-Layer Shunting Model* (7LSM, engl. für 7-Ebenen Rangier Modell) erweitert. Der neu hinzugefügte siebte Layer umfasst hierbei als übergeordnete Informations- und Zustandsebene den Rangierauftrag und ist in Abbildung 5 als Ergänzung zu Abbildung 4 dargestellt.

Abbildung 5: Layer 7: Rangierauftrag im 7-Layer Shunting Model

Im Rangierbetrieb werden zur Durchführung von Rangieraufgaben vorab verschiedene Informationen als Rangierauftrag an den Lokrangierführer übermittelt. Neben der eigentlichen Tätigkeit, wie beispielsweise einer Umsetzfahrt (Gleiswechsel der Lokomotive in ein Gleis derselben Gleisgruppe [26]), umfasst dieser unter anderem Daten zur Fahrroute, zur Fahrgeschwindigkeit in verschiedenen Gleisbereichen und zu Gleisfreimeldungen. Zusätzlich können aus der Rangieraufgabe indirekt sicher auftretende Objekte, wie z.B. Wagen oder Rangierbegleiter, abgeleitet werden. [27] Somit erfolgt mit dem Rangierauftrag eine direkte Beeinflussung von Umfang und Vorkommen verschiedener Objekte in den bestehenden Layern. Die zusätzlichen Informationen erleichtern, aufgrund vorgeschriebener Gegebenheiten und Regularien, die Definition und Ableitung der Szenarien und führen zu einer Reduzierung der entstehenden Testfälle. Anzumerken ist, dass die reine Übertragung des Rangierauftrags über die Kommunikationsschnittstelle zwischen Infrastruktur und Lokomotive dem

Layer 6 zuzuordnen ist. Der Inhalt des Auftrags geht jedoch weit über die digitalen Informationen hinaus und wirkt sich auf unterschiedliche Zustände im Szenario aus, weshalb der Rangierauftrag als eigener Layer implementiert ist.

4 Anwendung des 7LSM zur Szenariodefinition

Zur Überprüfung der Systemzuverlässigkeit einer automatisierten Rangierlokomotive wird eine methodische Werkzeugkette aufgebaut. [28] Hierbei findet zunächst eine Festlegung der umzusetzenden Rangieraufgaben und eine Ableitung der daraus resultierenden Use Cases statt. [29] Durch den Einsatz der szenariobasierten Testmethodik erfolgt die Systemerprobung sowohl in der Simulation als auch im Feld. Szenarien können dadurch primär, zeit- und kosteneffizient in der virtuellen Umgebung dargestellt, durchgeführt und ausgewertet werden. Auf Basis dieser Evaluation werden im Feld neben essentiellen funktionalen Systemanforderungen vor allem kritische Szenarien überprüft und mit den Simulationsergebnissen abgeglichen. Die virtuelle Testumgebung ermöglicht somit eine Vielzahl an Szenarien zu überprüfen, die im Feld wirtschaftlich und organisatorisch nicht realisierbar sind. [30]

Durch die parallele Testfallerprobung müssen Szenarien sowohl der Simulation als auch dem Feldversuch zur Verfügung gestellt werden. In der Anwendung des szenariobasierten Testansatzes werden zunächst semantische Beschreibungen der Szenarien aufgestellt und mit einer Parametrisierung vorkommender Variablen zunehmend konkretisiert. Ziel hierbei ist, möglichst allumfänglich auftretende Situationen im Anwendungsfeld der VAL durch Testszenarien zu überprüfen. Als Methode der Szenariobeschreibung findet dazu das 7LSM Anwendung. Zur Definition und Generierung unterschiedlicher Szenarien erfolgt eine schrittweise Kombination der einzelnen Layerinformationen und -elemente.

Dafür ist es zu Beginn ausschlaggebend, möglichst alle im Anwendungsfeld des automatisierten Systems auftretende sinnvolle Objekte und Zustandsinformationen den sieben Ebenen des 7LSM zuzuordnen. Bei dieser Definition ist einerseits darauf zu achten, einen holotischen Ansatz zu verfolgen, jedoch andererseits zu berücksichtigen, durch eine zu hohe Differenzierung keine unüberschaubare Objektemenge zu erzeugen. Somit muss ein zielführender Kompromiss zwischen der Testeffizienz und -performance geschaffen werden.

Ausgehend vom zu testenden Use Case werden die Elemente des Rangierauftrags aus Layer 7 festgelegt. Die dadurch auftretende Vordefinition von Objekten anderer Layer führt direkt zu einer Limitierung in der Kombinatorik und verringert a priori die Anzahl potentieller Testszenarien. In den nachfolgenden Schritten werden die Layer eins bis

sechs sukzessiv der Generierung hinzugefügt und dadurch unterschiedliche Situationen der statischen Umgebung, dynamischer Elemente und Wetterbedingungen geschaffen. Am Ende besteht für jeden zu überprüfenden Use Case eine Datenbank aus Testszenarien, basierend auf den Elementen des 7LSM. Die stufenweise Beschreibung des Testumfangs, ausgehend von den abgeleiteten Use Cases, über die aufgestellte ODD hin zu den zugeordneten Objekten im 7LSM, ermöglicht im überschaubaren Bereich die Gesamtheit der Testszenarien zu überprüfen. Demnach ist es ausschlaggebend, bei der Festlegung der in den Layern vorkommenden Objekte einen höchstmöglichen Anspruch auf Vollständigkeit, unter Berücksichtigung der sinnvollen Umsetzbarkeit, in Bezug auf das Testsystem anzustreben. Durch dieses Vorgehen und der genauen Definition der Kombinatorik sowie der dabei auftretenden Regeln kann die Annahme getroffen werden, dass die entstehende Szenariodatenbank das Einsatzgebiet und die Aufgaben der automatisierten Rangierlokomotive in einem adäquaten Rahmen abdeckt.

Zur Ableitung beispielhafter Szenarien wurden in einem ersten Anwendungsansatz über 250 sinnvolle Objekte für die generische Beschreibung des Rangierbahnhofs dem 7LSM zugeordnet. Abbildung 6 zeigt eine exemplarische Darstellung eines Szenarios am Rangierbahnhof, aufgebaut in der institutseigenen Simulationsumgebung. Die Lokomotive soll sich automatisiert einem Containertragwagen annähern und im definierten Abstand davor stehen bleiben. Zu Beginn liegen der Use Case „Annähern“, die Information zur maximalen Fahrgeschwindigkeit, das belegte Gleis, auf dem sich der Zielwagon befindet, sowie das aktuelle Gleis der Lokomotive als Rangierauftrag (Layer 7) vor. Neben dem Fahrgleis ist als Layer 1 Objekt ein Nebengleis vorhanden. Beide Gleise haben dabei ein Gleisbett aus Schotter und Betonschwellen. Zwischen den Gleisen verläuft die Oberleitung mitsamt in regelmäßigem Abstand aufgestellten Masten. Signale und weitere Gleisinfrastruktur sind im Szenario nicht vorhanden. Der zweite Layer umfasst eine Vielzahl an Objekten. Neben verschiedener Arten an Vegetation sind rechts neben dem Gleis ein abgestellter Container sowie ein Bauzaun zu sehen. In Bezug auf das automatisierte System ist hierbei anzumerken, dass beispielsweise Objekte wie die Gräser vorne rechts vor der Lok bereits im freizuhaltenden Lichtraumprofil wachsen, jedoch als nicht schützenswertes Objekt keine Bremsreaktion verursachen dürfen. Das Gebäude rechts im Hintergrund ist für dieses Szenario nicht mehr ausschlaggebend, da es zu weit vom Überwachungsbereich der Sensorik entfernt ist. Ein Teil des Bauzauns ist durch äußere Kräfte umgefallen und liegt auf dem Gleis. Diese temporäre Änderung entspricht einem Layer 3 Element. Als Layer 4 Objekt ist neben dem Zielwagon auf dem Fahrgleis der Lokomotive eine Wagengruppe auf dem Nebengleis zu finden. Im Beispielszenario sind die Wagen alle im Stillstand, jedoch an sich bewegbar, weshalb sie

als dynamische Objekte gelten. Layer 5 beschreibt die Umweltbedingungen. Das Wetter zeigt einen leicht bewölkten Himmel und keinen Niederschlag. Die Bodenverhältnisse sind trocken. Bei den Lichtbedingungen besteht die Besonderheit in einer tiefstehenden frontalen Sonne, die einerseits zu Gegenlicht und andererseits zu langem Schattenwurf führt. Im Hintergrund der Simulation wird als Layer 6 Objekt die aktuelle Lokposition mit dem Lokalisierungssystem verglichen. Die Kombination der sieben Layer ergibt das dargestellte Szenario, dass die automatisierte Rangierlokomotive erfolgreich absolvieren muss.

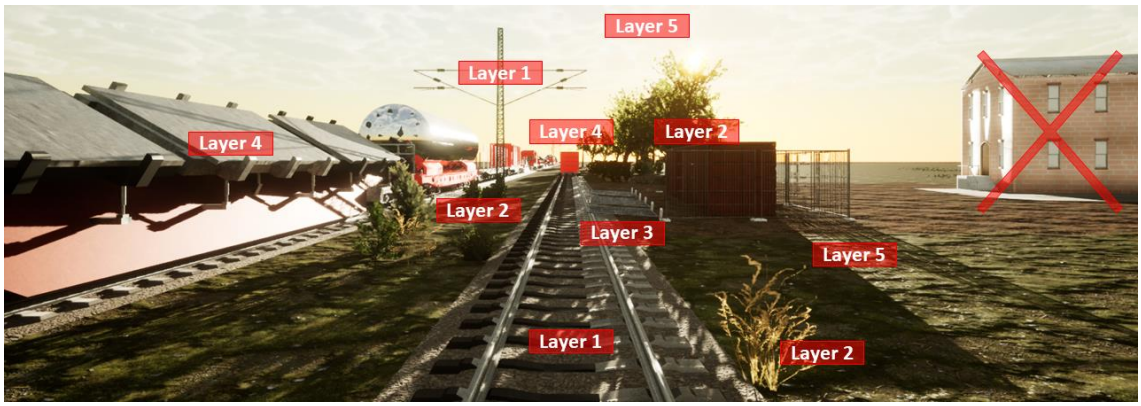


Abbildung 6: Beispielszenario

5 Ausblick

Die methodische Herangehensweise zur Erstellung von Szenarien mit dem 7LSM ist ein wichtiges Werkzeug für die Erprobung der hochautomatisierten Rangierlokomotive. Durch die generische Beschreibung und den sukzessiven Aufbau wird ermöglicht, die Vielzahl an notwendigen Testszenarien mit einem potentiellen Ansatz auf Vollständigkeit zu definieren und der Systemerprobung zur Verfügung zu stellen. Die Annahme der Vollständigkeit sowie die Festlegung sinnvoller Szenarien und Objekte gilt es weiter zu untersuchen. Erst durch die kombinierte Testfalldurchführung in der Simulation und der realen Umgebung ist es möglich, das automatisierte System in einem angemessenen Umfang wirtschaftlich, zeiteffizient und übersichtlich zu erproben. Die ganzheitliche Betrachtung der Werkzeugkette ist hierbei von hoher Bedeutung, da einerseits die methodischen Ansätze in sich zielführend und stimmig sein müssen, jedoch andererseits der holistische Ablauf von der Systembeschreibung bis hin zur Testdurchführung und -auswertung gegeben sein muss. Für die stetig zunehmende Komplexität der automatisierten Fahrsysteme und der damit zusammenhängenden Aufgaben und Verantwortlichkeiten ist vor allem auf die virtuelle Systemerprobung ein stärkerer Fokus zu legen und diese von vornherein in die Testentwicklung zu integrieren.

Danksagung

Diese Arbeit wurde im Rahmen des Projekts VAL, FKZ 5320000013, EBA Az. 8fd/003-1255#008-VAL, gefördert durch das Bundesministerium für Digitales und Verkehr durchgeführt.

Literaturverzeichnis

[1] D. Flege, A. Geißler, M. Roggermann, M. Henke, und B. Möbius, „10 Gründe für mehr Schienenverkehr“. Allianz pro Schiene e.V., Juli 2020. [Online]. Verfügbar unter: https://www.vdv.de/10-gruende-schienenverkehr2020-einzelseiten.pdfx

[2] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Hrsg., *Verkehr in Zahlen 2009/2010*, 10. Jg. Hamburg: DVV Media Group GmbH, 2009.

[3] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Hrsg., *Verkehr in Zahlen 2020/2021*, 49. Jg. Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt, 2020.

[4] Geschäftsstelle des Beauftragten der Bundesregierung für den Schienenverkehr und Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, „Masterplan Schienenverkehr“, Berlin, Juni 2020.

[5] SPD, Bündnis 90/Die Grünen, FDP, „Mehr Fortschritt wagen: Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit“, Jan. 2021.

[6] „BMDV - Gleisanschlussförderung“. Zugegriffen: 13. April 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://bmdv.bund.de/goto?id=237212

[7] SAE International, „SAE J3016“. 2021 SAE International/ISO, April 2021. Zugegriffen: 4. April 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.sae.org/content/12-03-01-0003/

[8] R. Isermann, Hrsg., *Fahrerassistenzsysteme 2017: Von der Assistenz zum automatisierten Fahren - 3. Internationale ATZ-Fachtagung Automatisiertes Fahren*. in Proceedings. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017. doi: 10.1007/978-3-658-19059-0.

[9] Pegasus, „Projekt zur Etablierung von generell akzeptierten Gütekriterien, Werkzeugen und Methoden sowie Szenarien und Situationen zur Freigabe hochautomatisierter Fahrfunktionen“, Schlussbericht – Gesamtprojekt, Feb. 2020. [Online]. Verfügbar unter: https://www.pegasusprojekt.de

[10] „Verification Validation Methods“, VVM Projekt. Zugegriffen: 4. Juli 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.vvm-projekt.de/

[11] L. Schnieder, *Communications-Based Train Control (CBTC)*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2020. doi: 10.1007/978-3-662-61013-8.

[12] J. Pachl, *Systemtechnik des Schienenverkehrs*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021. doi: 10.1007/978-3-658-31165-0.

[13] „IEC 62290-1:2014 Railway applications – urban guided transport management and command/control systems – part 1: system principles and fundamental concepts“. 2014.

[14] IEC 62267:2009, *Railway applications. Automated urban guided transport (AUGT). Safety requirements*, Definitive. 2010.

[15] F. Schuldt, „Ein Beitrag für den methodischen Test von automatisieren Fahrfunktionen mit Hilfe von virtuellen Umgebungen“, Braunschweig, 2017. [Online]. Verfügbar unter: http://publikationsserver.tu-braunschweig.de/get/64747
[16] S. Ulbrich, T. Menzel, A. Reschka, F. Schuldt, und M. Maurer, „Definition der Begriffe Szene, Situation und Szenario für das automatisierte Fahren“, Jan. 2015. [Online]. Verfügbar unter: https://www.uni-das.de/images/pdf/veroeffentlichungen/std-01-ulbrich.pdf
[17] G. Bagschik, T. Menzel, A. Reschka, und M. Maurer, „Szenarien für Entwicklung, Absicherung und Test von automatisierten Fahrzeugen“, Jan. 2017. [Online]. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/316452171_Szenarien_fur_Entwicklung_Absicherung_und_Test_von_automatisierten_Fahrzeugen
[18] F. Schuldt, F. Saust, B. Lichte, M. Maurer, und Scholz Stephan, „Effiziente systematische Testgenerierung für Fahrerassistenzsysteme in virtuellen Umgebungen“, Jan. 2013. [Online]. Verfügbar unter: http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00052570
[19] G. Bagschik, T. Menzel, und M. Maurer, „Ontology based Scene Creation for the Development of Automated Vehicles“, Apr. 2018. [Online]. Verfügbar unter: https://arxiv.org/pdf/1704.01006.pdf
[20] M. Scholtes *u. a.*, „6-Layer Model for a Structured Description and Categorization of Urban Traffic and Environment“, *IEEE Access*, Bd. 9, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3072739.
[21] „IEC 62290-1:2006 Railway applications – urban guided transport management and command/control systems – part 1: system principles and fundamental concepts“. 2006.
[22] J. P. Powell, A. Fraszczyk, C. N. Cheong, und H. K. Yeung, „Potential Benefits and Obstacles of Implementing Driverless Train Operation on the Tyne and Wear Metro: A Simulation Exercise“, *Urban Rail Transit*, Bd. 2, Nr. 3–4, S. 114–127, Dez. 2016, doi: 10.1007/s40864-016-0046-9.
[23] „Rio Tinto completes first fully autonomous rail journey in Western Australia“. Zugegriffen: 6. April 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.riotinto.com/en/news/releases/first-fully-autonomous-rail-journey-completed
[24] U. Maschek, *Sicherung des Schienenverkehrs: Grundlagen und Planung der Leit- und Sicherungstechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2022. doi: 10.1007/978-3-658-37633-8.
[25] British Standards Institution (BSI), *Operational design domain (ODD) taxonomy for an automated driving system (ADS). Specification*. London, United Kingdom: BSI Standards Limited, 2020.
[26] DB Netz AG, „Richtlinie 408 - Züge fahren und Rangieren: Ril408“. DB Kommunikationstechnik GmbH, 10. Dezember 2006.
[27] M. Cichon und R. Falgenhauer, „Integrales ATO-System für Rangier-Aufgaben“, in *Tagungsband Rad-Schiene-Tagung 2023*, Dresden, März 2023.
[28] L. Greiner-Fuchs, S. Schäfer, T. Hofmeier, und M. Cichon, „Database-supported methodical approach for the development of a toolchain for the evaluation of ATO functions using a scenario-based test methodology“, in *Proceedings of the Fifth International Conference on Railway Technology: Research, Development and*

Maintenance, in Paper 13.4. Montpellier: Civil-Comp Press, 2022. doi: 10.4203/ccc.1.13.4.

[29] T. Hofmeier, L. Greiner-Fuchs, S. Schäfer, und M. Cichon, „Task analysis of a shunting locomotive to derive use-cases for scenario based tests of ATO Functions“, gehalten auf der 9th Auto Test Conference, Stuttgart, Okt. 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/364301750_Task_analysis_of_a_shunting_locomotive_to_derive_use-cases_for_scenario_based_tests_of_ATO_Functions

[30] S. Schäfer, L. Greiner-Fuchs, T. Hofmeier, P. Koch, und M. Cichon, „Virtual Validation Method of Automated On-Sight Driving Systems for Shunting Operations“, in *BOOK OF ABSTRACTS*, Belgrade, Serbia: University of Belgrade – The Faculty of Transport and Traffic Engineering, Apr. 2023.

Session 17

Lucas Greiner-Fuchs, Steffen Schäfer, Tobias Hofmeier, Martin Cichon

Autoren

Greiner-Fuchs, Lucas, M.Sc.

Lucas Greiner-Fuchs studierte an der DHBW Mannheim in Kooperation mit der Firma Schaeffler AG Maschinenbau im Bachelor. Anschließend absolvierte er an der TU Braunschweig seinen Masterabschluss in Kraftfahrzeugtechnik und arbeitet seit April 2021 an der TH Nürnberg als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Projekt VAL. Innerhalb seiner Forschung beschäftigt er sich vorwiegend mit dem Themengebiet Szenariobeschreibung und Operational Design Domain im Bereich Schienenfahrzeugtechnik sowie der Planung, Durchführung und Auswertung realer Feldtests am Rangierbahnhof.

Schäfer, Steffen, M.Sc.

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fahrzeugtechnik der Technischen Hochschule Nürnberg und des Karlsruher Instituts für Technologie. Seit 2014 forscht er an Automatisierungen und Innovationen zur Verbesserung der nachhaltigen Mobilitätssituation. Er studierte Luft- und Raumfahrttechnik an der RWTH Aachen und erforscht den Einsatz virtueller Systeme bei der Diffusion künstlicher Intelligenzen in die Fahrentscheidungsfindung von Bahnsystemen

Hofmeier, Tobias, M.Sc.

Tobias Hofmeier schloss sein Maschinenbaustudium an der TH Nürnberg als Master of Science ab. Während seines Studiums vertiefte er sich unter anderem in die Fahrzeugtechnik. In seiner Masterarbeit optimierte er die Ortungsgenauigkeit einer Navigationsplattform für Schienenfahrzeuge. Im Rahmen seiner Tätigkeiten als wissenschaftlicher Mitarbeiter entwickelt er fotorealistische Simulationsumgebungen für Bahnsysteme und erarbeitete die Use Cases einer Abdrücklokomotive aus deren betrieblichen Prozessen und Regularien.

Cichon, Martin, Prof. Dr.-Ing.

Prof. Dr.-Ing. Martin Cichon ist Leiter des Institutsteils Bahnsystemtechnik am Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT). Sein Forschungsgebiet umfasst die Thematik des Maschinenbaus im Bereich der Schienenfahrzeugtechnik. Er leitet Kooperationsprojekte mit DB Cargo und weiteren Industrie- und Forschungspartnern und begleitet maßgeblich die Technologiemigration von ATO-Systemen.

Session 17
Raphael Pfaff, Bernd D. Schmidt, Katharina Babilon

Decoupled integration of automation functions for non-productive operation

A concept for the integration of assistance functions into existing vehicles and infrastructure maintaining homologation

Pfaff, Raphael[1], Schmidt, Bernd D.[1], Babilon, Katharina[1]

[1]FH Aachen, Mechanical Engineering and Mechatronics, Aachen, Germany

Abstract

Automation of train operation, frequently aiming on mainline operation, plays an increasingly vital role on the technological roadmap of the railway system. A less addressed topic is the automation of non-productive operations in the railway context, in particular stabling, which do not generate revenue for the railway undertakings and employ scarce personnel during this time. The typical business case is viable, as long as little to no cost arise from the acceptance testing and homologation. The SAMU project presented in this paper aims to develop functionally decoupled interfaces to vehicle and infrastructure, which enable a cost effective refurbishment of such functions.

Keywords: Automatic Train Operation, Stabling, Shunting

1. Introduction

A typical revenue service operation of a passenger multiple unit starts and ends at a dedicated stabling track. From this starting point, the vehicle is powered up and runs through its pre-departure checks before it can be moved to the first platform to start its productive run. The same occurs at the end of a day of operation, here the service ends at a platform, after which the vehicle is brought to a stabling track or a depot.

From the point of view of the driver, the transfers to and from the stabling point are the most inconvenient part of the job: they are typically done late at night or early in the

morning and include considerable walking distances in the railway area. From an operators view, the time between stabling and first or last passengers do not contribute to the company revenue, however cause personnel costs as well as occupation for the increasingly scarce resource of railway drivers. The time for moving to and from stabling (including surveillance of the automated start-up and test routines) is estimated to be two to three hours per day, which means that 15% - 20% of the driver's time and cost is spent on non-productive tasks.

While there is an obvious advantage in automating railway operation as much as possible, it requires substantial investments in infrastructure and rolling stock while at the same time, many issues for mixed operation are not solved yet. At the same time, one major economic factor for railway undertakings is the depreciation of assets which means that it is imperative to run vehicles and infrastructure according to their planned life cycle. Also major upgrades, such as an integration of automatic train operation (ATO) functionalities, are prohibitive due to the cost and risk associated with homologation procedures.

To overcome this issue and solve the problem of automation of some non-productive functions, a decoupled approach that uses existing interfaces to both vehicle and infrastructure appears feasible and does not require new homologation tests.

An automation approach typically requires interfaces to both vehicle and infrastructure as well as a means of communication between both. The vehicle interface needs to be able to control the velocity of the vehicle and command brake applications. The infrastructure interface receives the movement authority and any emergency brake commands. Both interface units rely on safe and available communication, in particular with regards to emergency brake requests.

The Stabling Automation for Multiple Units (SAMU) project aims to develop and demonstrate a concept for the decoupled integration of automation functions into existing fleets, operating on existing infrastructure while the homologation of both subsystems is maintained.

1.1 Problem setting

SAMU aims to solve the problem of automating vehicle driving functions for limited tasks while at the same time maintaining the integrity of the vehicle in such a way that existing homologation a remain valid. This is a valid problem since the multiple unit age distribution (shown in Figure 1) indicates that most multiple will continue to operate for

at least ten years, assuming the standard lifetime of 30 years. These vehicles were put into service under different homologation regimes, which makes a new homologation particularly difficult and costly.

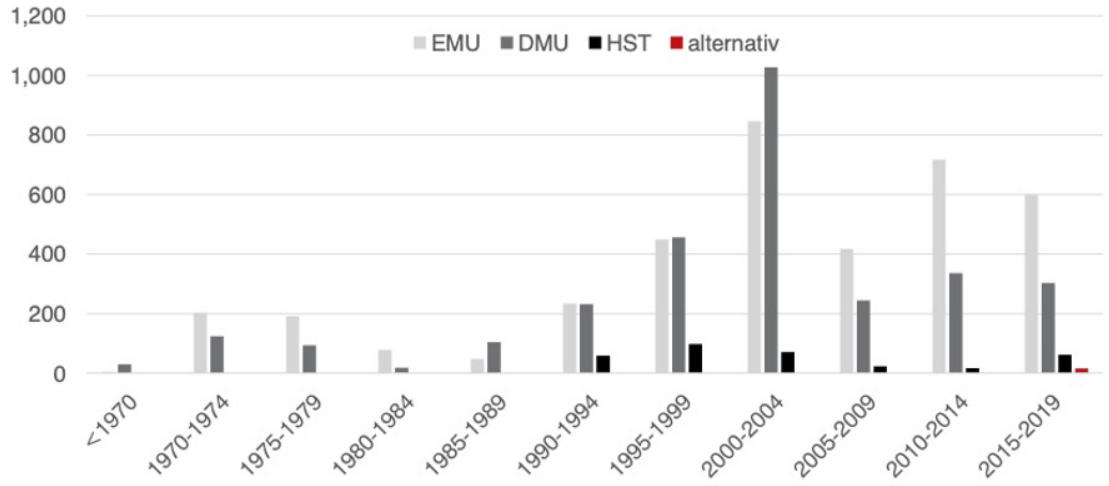


Figure 1: Age structure of multiple units in Germany (2020 data by SCI Verkehr) [1]

1.2 GoA perspective

The standard point of view for ATO classification in railways is the UITP Grade of Automation [2], which focus on urban public transport vehicles. The different Grades of Automation (GoA) are shown in Table 1. It is interesting to note that this definition is applicable mostly to the revenue part of the service, since part of the definition is derived from e.g. door control.

In Table 1, the infrastructure and vehicle requirements are added to the classification. It is obvious that an increase in GoA requires more infrastructure, e.g. in the form of continuous safe communication or localisation, as well as more vehicle borne sensors, e.g. for obstacle detection. Most sidings suitable and available for stabling are equipped to allow shunting movements, which would suffice only for GoA 0. Also vehicles are only equipped to operate in GoA2 at best.

The task in SAMU is to run a GoA4 operation in a very limited scope with a GoA1 vehicle on GoA0 infrastructure. Amendments to the existing equipment are likely to be required. Any addition of e.g. sensors or control units shall be done such that no new homologation of the vehicle is required.

Table 1: GoA classification and technical requirements

Grade of Automation	Operation type	Description	Infrastructure and vehicle requirements
GoA0	On-Sight	No automation, fully reliant on driver.	None
GoA1	Manual	Vehicle operation manual, protection against errors by train protection system, e.g. German PZB.	Low: Most legacy systems provide the functionality.
GoA2	Semi-automatic	Driving functions are automated, mostly relying on an advance train protection system which includes positioning of the train and continuous exchange of commands, e.g. German LZB. A driver in the cab is still responsible to ensure safe passenger transfer, freedom of movement of the vehicle and can take over the control in case of emergency.	Medium: Updated tracks, e.g. in the high-speed network, provide sufficient infrastructure. No special equipment of the vehicles required.
GoA3	Driverless	In addition to driving functions, door operation is also automated which requires no driver in the cab. A member of staff is in the vehicle to take over control of the train in case of emergencies.	High: Track infrastructure as for GoA2. Vehicle equipment has to ensure safety of passengers during boarding and alighting as well as provide obstacle detection means.
GoA4	Unattended	All operations can be performed without staff on train, also in emergency situations.	High: In addition to GoA3 requirements on vehicle and infrastructure, the installation of platform screen doors is recommended.

1.3 Economical perspective

Since driving personnel for railways is currently a scarce resource, the economy of the SAMU system could be calculated against cancelled services which justifies enormous investments. If however, only a conservative saving of 2 h of driver time is calculated,

this yields potential savings of 100 €/d and 30.000 €/a. This makes a total investment of 150.000 € per SAMU system economically feasible.

It is obvious that this amount is not sufficient for any homologation process except for large fleet sizes and truly homogeneous stabling requirements.

The SAMU system consists of two vehicle borne units equipped with camera and lidar as well as one interface to the control room. By dividing the estimated investment into three equal parts, a target price of 50.000 € per part of the system can be derived. For this price, many of the sensor technologies currently being tested for automatic railway operation are unavailable [3, 4]. This calls for a robust, yet performant approach.

2. Solution Approach

The SAMU system consists of interface units integrated into both vehicle and control infrastructure and a means of communication between these.

2.1 Vehicle interface

The SAMU vehicle interface receives movement authorisation as well as any emergency stop request and transmits these to the vehicle. In addition to the transfer of information and commands, the vehicle mounted unit also guarantees the freedom of movement. For this purpose, it is equipped with a combination of camera and lidar sensors as well as edge processing capabilities. Since multiple units, the targeted vehicle segment, offer short braking distances from typical shunting velocities, a far less sophisticated sensor equipment and processing is required in comparison to other solutions currently developed [4, 5, 6].

It is intended to use the multiple traction interface of the vehicle via the coupler for the vehicle control. This typically exposes a wired emergency brake loop as well as traction control to the SAMU system.

2.2 Environment perception

The environment perception system on the one hand needs to allow for sufficiently safe operation, while on the other hand it needs to allow for sufficient performance, typically expressed in terms of velocity for the shunting movement. Since the intended stabling operation will take place under shunting regime, the maximum velocity by regulation is 25 km/h. An in-depth study of braking distances at low velocities is provided in [8].

Since the target sector is multiple units, the deceleration can be expected to be rather constant and at least $a = 0.8\ \mathrm{m/s^2}$. Further the reaction time of multiple unit brake systems is typically well below that of the UIC brake system and for this study assumed to be $t_r = 1\ \mathrm{s}$. The braking distance from an initial velocity v_0 is thus expressed as

$$s = \frac{v_0^2}{2\,a} + t_r v_0.$$

The braking distances for different initial velocities are shown in Figure 2.

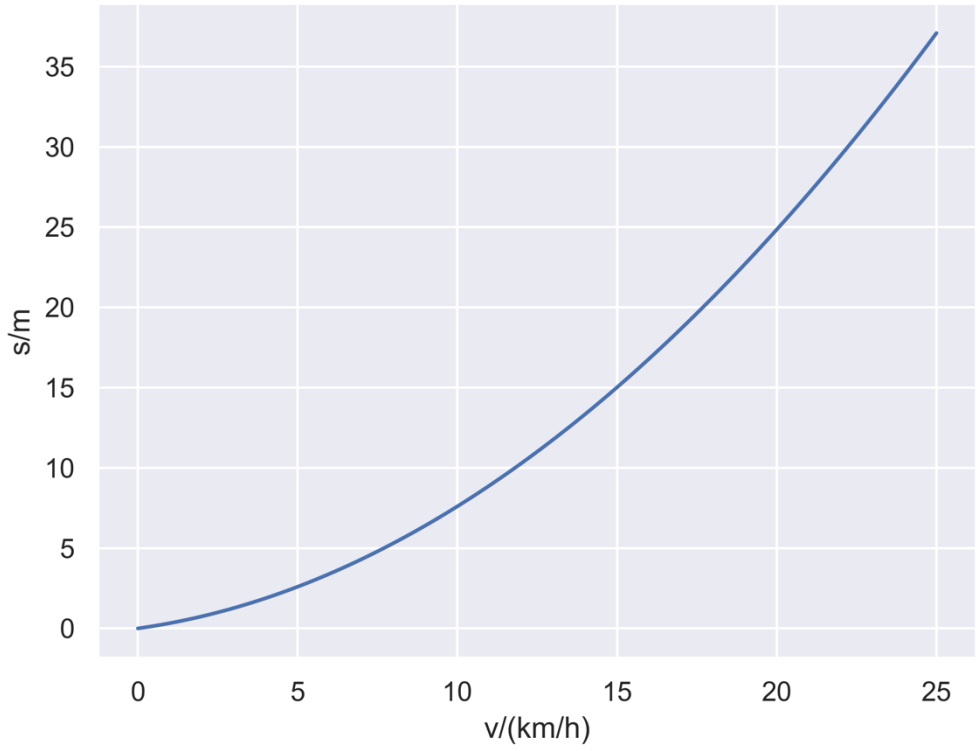


Figure 2: Braking distances for different velocities in the shunting regime

All stopping distances are well within the range of affordable lidar sensors and commercially available cameras are able to detect objects within this range. The perception system can thus be based upon readily available sensors.

For the decision system, the lidar resolution is another critical aspect. It is vital that sufficient points are generated from objects in the trajectory of the train to be moved. By using a MEMS based rather than a rotating lidar, it is possible to scale the resolution while at the same time maintaining a field of view suitable for railway operation.

2.3 Decision system

The decision system has the task of analysing the planned trajectory, i.e. the path the vehicle is set to travel, for any obstacles that would inhibit driving, e.g. an object with the space envelope of the vehicle movement. The decision whether to advance the vehicle on the path needs to be made such that an accident is avoided. The remaining hazard rate, i.e. the probability of an object being not detected, has to be such that the final system is deemed sufficiently safe.

The German standard [9] provides a risk score matrix. For accidents in the shunting context, the required hazard level are either none (no hazard rate required) in risk category A or 10^{-5}/h for risk category B.

Table 2: Risk categories and example scenarios (selected from [9])

Category	Example scenarios (selected)	Risk
A	• Contact of shunting movemen with object • Untimely emergency brake application	No injuries
B	• Contact of freight train with object • Collision of shunting movements	One minor injury

In current solutions known to the authors [4, 5, 6, 7], an explicit search for objects, mostly by help of artificial intelligence, is applied to the images supplied by the perception system. While this is an approach closely resembling the human operator, we do not expect that a formal proof of such systems against the requirements mentioned above is possible with appropriate effort. Instead of analysing for objects in the path of the vehicle, the solution already established in the SAMIRA project [5,11] uses LIDAR scanner information to analyse the free distance ahead of the vehicle.

According to this free distance, the currently possible velocity is selected such that stopping before the end of this free distance is possible. In this way, the decision and velocity selection resembles the concept of moving block operation in mainline more closely.

As indicated in Figure 3, the resolution is high enough to allow for such a procedure for the braking distances shown in Figure 2. In particular, at a conservative detection ration

of 99.8% per LiDAR point, objects covered by at least eight points will be detected at a rate of

$$\lambda = 1 - 0.26 \cdot 10^{-6} > 1 - 10^{-5}$$

and will lead to stopping of the vehicle before the object.

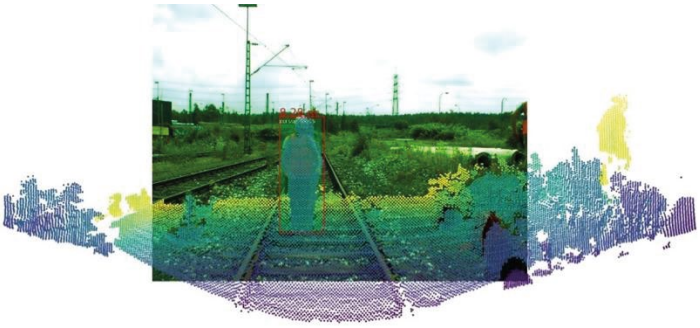


Figure 3: Person in the planned trajectory of a shunting movement (image captured from stationary vehicle)

A remaining problem in this decision algorithm is the track detection. Since most algorithms known to the authors [4, 10] rely on potentially unsafe image processing techniques, a conservative approach is proposed based on the minimum radius in either direction of the vehicle, which are merged in the freedom of movement analysis to form the space required for continuing the movement.

Such a space is given in Figure 4, which is drawn to scale for a small radius of 150 m. The maximum distance that can be considered free safely is 22 m, providing a maximum possible velocity of approximately 18 km/h. The situation improves for a minimum radius of 300 m, which is the standard point radius for German infrastructure. Under this assumption, the maximum free distance that can be detected is 31 m, yielding a maximum velocity of approximately 20 km/h. Both velocities are sufficient for automated shunting operation, since the time constraint is not as vital as it is under human surveillance.

This approach can be considered rather conservative in that it will not provide sufficient braking distance for high velocities unless the

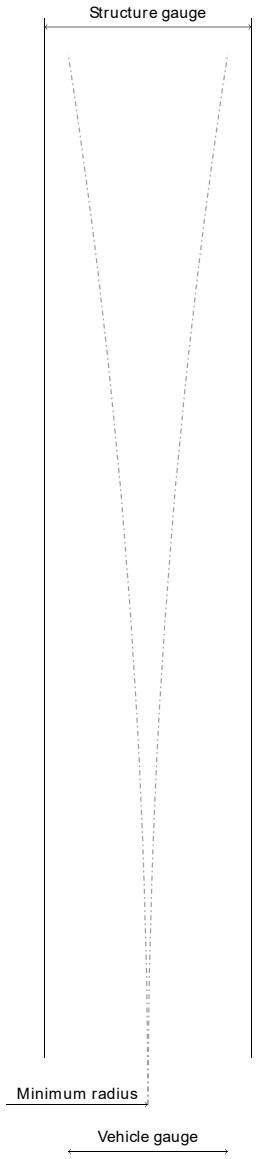


Figure 4: Conservative track position estimation

radii on the infrastructure are sufficiently large. It may be further improved by adding different radii for different ranges of infrastructure or providing faster or more efficient brakes to the system. It differs from that proposed in [12] in that it does not make assumptions on the track position but instead analyses the freedom of movement for all possible paths the vehicle can take.

2.4 Infrastructure interface

The SAMU interface to the railway infrastructure is based on a simple concept:

The digital marking of an autonomous shunting area. As the stabling tracks and the platform track are always the same due to the limited size of the station, only a limited amount of trackside elements needs to get evaluated. These tasks are performed in the SAMU lineside electrical cabinet (SAMU-LEC).

It is intended to use existing monitoring contacts or additional current probes of signals and turnouts (PZB-interface, electrical point detector, Sh1-lamp current detector) for this purpose, detecting the shunting route and the given movement authority from the lineside shunting signal. So it is possible to convey the movement authority for shunting to the SAMU system without implementing additional input or outputs to the interlocking system in order to avoid costly software changes and costs for re-certification of the interlocking. In the application scenario selected for this project, three points and two point machine operated track locks need to be traversed in order to move from platform 12 to track 8, depicted as orange line in Figure 5. It may be viable to use a combination of the point machine monitoring contacts to establish the route and lamp current detection of Sh1 signal lamp to detect the movement authority. Since the operation is led on an on-sight basis, it will use the technique proposed in Section 2.3. to select the maximum velocity. In case of an emergency situation, movement authorities may be withdrawn by setting the shunting-signal to stop (Sh0). This will directly be detected by the SAMU-LEC. But similar as with driver operated shunting, this works only in the influence area of the signal.

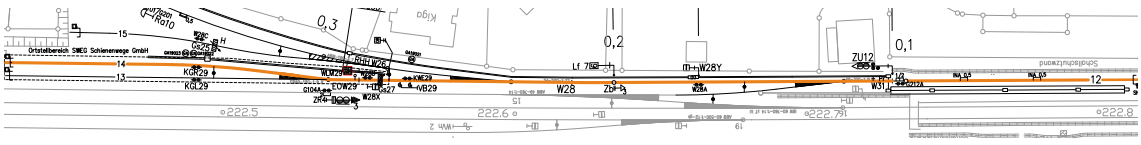


Figure 5: Infrastructure situation

2.5 Communication and localisation

Besides both interface units, a communication needs to be able to safely transfer the commands between infrastructure interface (SAMU-LEC) and vehicle (SAMU). Given the challenging conditions typically encountered in railway environment, an inductive or short range radio solution is preferable thanks to the expected safe communication at low latency.

It is foreseen to investigate a simplified inductive solution based on a trackside loop wire, marking the autonomous shunting area, similar to the physical layer of German LZB system. This wire may operate somewhere in a frequency range of 30-60 kHz. An other alternative may be dedicated short range radio communication (DSRC) and cellular communication via 5G network. Both the DSRC standard, which is a variant of WiFi communication utilised for Vehicle-to-Everything (V2X) communication and the cellular counterpart for V2X-communication (C-V2X) are interesting since they do not require significant investments. But all these alternative solutions have the big disadvantage of inaccurate localisation, especially concerning position of fouling point indicators in the switch area of the station. However the cost driver may be the homologation procedure, so a simple yet effective solution may be an inductive loop, requiring more installation effort, but offering a safe deenergise-to-apply solution to issuing and withdrawal of movement authorities. An inductive wire based solution may also enable the accurate localisation of fouling points and track locks. For other solutions, either Bluetooth Low Energy beacons, RFID labels as proposed in [13] or a high precision GNSS [14] operated by a third party (US, Russian or Chinese Ministry of Defence or European Space Agency) are required. The satellite-based systems are beyond control of the railway operator and do only work properly if free sight on at least 4 satellites is possible. This cannot be guaranteed in (urban) railway environments, where bridges, buildings and platform roofs generate shadows. Since the inductive loop provides a functional integration of communication and localisation, this is the preferred approach.

2.6 Monitoring interface

In order to assess the status of the SAMU system and its elements, a web based monitoring interface is provided. This can be displayed on a fixed monitor or on a handheld device (e. g. tablet) and allows the staff to view error and status messages (e. g. pictures of obstacles on the track, battery status, speeds, etc.) and allows non safety

critical interactions as defining the final stabling point or powering up/booting the EMU. This interface may be accessed via intranet or vpn. In case of need for safety critical functions (e. g. emergency stop push buttons on the platform or vehicle) these will need to be hard-wired to SAMU or SAMU-LEC.

3 Demonstration scenario

To demonstrate the feasibility of the concept, a demonstration run on public railway infrastructure is planned, moving a vehicle from its final operation platform to the stabling position as depicted in orange lines in Figure 5. The vehicle will be one of the SWEG fleet, also the infrastructure is owned an operated by SWEG.

The data collected in this scenario will be published in the form of ROS-Bags to an extent as large as possible. Also, parts of the software will be made available.

4 Conclusion and perspective

This paper presents a project aimed at providing a simple yet effective automation solution for stabling of multiple units. The system is rooted in the SAMIRA project, where a cost-effective driver assistance system was developed.

The next steps will be primarily the investigation for suitable interfaces, which form a major project basis and at the same time a risk.

Acknowledgment

The SAMU project is funded by mFUND of the German Federal Ministry of Digital and Transport under grant number 19FS2055A.

The authors thank Reviewer 2 for helpful suggestions improving this paper.

References

[1] Wille, N., Pfaff, R., Nolte, R., Vetter, M., Hohn, M. and Tappert, T. Identifizierung von Forschungsansätzen und technischen Grundlagen zur Entwicklung eines leiseren, umweltfreundlicheren und betriebswirtschaftlich darstellbaren innovativen Triebfahrzeugs für bislang nicht elektrifizierte Netze, Report to BMDV, 2020.

https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/E/schiene-innovationen-forschung/studie-innovatives-triebfahrzeug.html

[2] IEC 62290-1:2014. Railway applications - Urban guided transport management and command/control systems - Part 1: System principles and fundamental concepts, 2014.

[3] Gleichauf, Johanna, et al. "Sensor fusion approach for an autonomous shunting locomotive." Informatics in Control, Automation and Robotics: 14th International Conference, ICINCO 2017 Madrid, Spain, July 26-28, 2017 Revised Selected Papers. Springer International Publishing, 2020.

[4] Alstom press release, https://www.alstom.com/de/press-releases-news/2022/11/alstom-demonstriert-vollautonomes-fahren-einer-rangierlokomotive-den-niederlanden#_ftn1 (Last access: 29.07.2023), 2022.

[5] Rail Vision – Shunting Yard, https://railvision.io/shunting-yard/ (Last access 08.11.2023), 2023.

[6] Cichon, M., & Schaal, R. LocAssysTH®–Fahrassistenzsysteme als Schritt zum automatischen Fahren auf der Schiene. In: Proceedings of the 2nd International Railway Symposium Aachen, 2019.

[7] Pavlović, M. G., Ćirić, I. T., Ristić-Durrant, D., Nikolić, V. D., Simonović, M. B., Ćirić, M. V., & Banić, M. S. (2018). Advanced thermal camera based system for object detection on rail tracks. Thermal Science, 22(Suppl. 5), pp. 1551-1561.

[8] Pfaff, R. Braking distance prediction for vehicle consist in low-speed on-sight operation: a Monte Carlo approach. Rail. Eng. Science 31, pp. 135–144, 2023. https://doi.org/10.1007/s40534-023-00303-7

[9] DIN VDE V 0831-103 VDE V 0831-103:2020-09, Elektrische Bahn-Signalanlagen, Teil 103: Ermittlung von Sicherheitsanforderungen an technische Funktionen in der Eisenbahnsignaltechnik, 2020.

[10] Ristić-Durrant, D., Haseeb, M. A., Franke, M., Banić, M., Simonović, M., & Stamenković, D. (2020). Artificial intelligence for obstacle detection in railways: Project smart and beyond. In Dependable Computing-EDCC 2020 Workshops: AI4RAILS, DREAMS, DSOGRI, SERENE 2020, Munich, Germany, September 7, 2020, Proceedings 16, pp. 44-55. Springer International Publishing.

[11] Blumenschein, M., Pfaff, R., & Babilon, K. Braking curves in railway shunting and implications for the development of sensor systems for autonomous shunting. Proceedings of Eurobrake, 2021.

[12] Schindler, C., Von Stillfried, A. Fahren auf Sicht - Ein Betriebskonzept für den fahrerlosen Nahverkehr. Eisenbahntechnische Rundschau, 69(10), 22-27, 2020.

[13] Jung, H., Eschmann, F., Schindler, C. Experimental investigation on RFID-odometer-based localization of an automated shunting vehicle. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. 2023 (online first). doi:10.1177/09544097231176464

[14] Gehrt, J., Konrad, T., Lin, J., Breuer, M., Abel, D., Zweigel, R. High Precision Localisation with Dual-Constellation for Railway Applications, Proceedings of the 2018 International Technical Meeting of The Institute of Navigation, Reston, Virginia, January 2018, pp. 35-45.

https://doi.org/10.33012/2018.15570

Session 17
Steffen Schäfer, Furkan Sakir Yöndem, Muhamad Iqmal Naqib Mohd Aliziyad, Martin Cichon

Virtual Reality and Digital System Twins in the Development and Testing of Trainable Highly Automated Driving Decision Making in Shunting Operations

Schäfer, S.[1,2*]; Yöndem, S. F.[1]; Aliziyad, N.[1]; Cichon, M.[2]

[1]Institute of Vehicle Technology Nuremberg (IFZN),
Nuremberg Institute of Technology (NIT)
Keßlerplatz 12
90489 Nuremberg
[*]Mail: steffen.schaefer2@kit.edu
Phone: +49 721 608-41819
[2]Institute of Vehicle System Technology (FAST),
Karlsruhe Institute of Technology (KIT)

Abstract

In the development and testing of highly automated systems, virtual environments such as physics engines and game development frameworks offer a suitable approach for the flexible design of test scenarios [1]–[4]. This paper discusses the application of Unreal Engine 5® (UE5) in testing camera based automated driving elements of shunting operations, i.e., driving on sight. It presents the basic idea of mining training data sets for Computer Vision (CV) -based intelligences and highlights the potential of virtual reality in training adaptive algorithms for driving decision making in railroads.

Keywords: Automated Driving, ATO, Virtual Tests, Unreal Engine, Training Data Set, Simulated Sensors, Machine Learning, Computer Vision

1 Introduction

The shift of freight traffic to rail transport systems is further driven by the current policy strategy offensive [5]–[7]. To cope with the increasing transport volume and the simultaneous academization of professions, high-performance systems such as Automated Train Operation Systems (ATO) are needed to replace the function of the shunting driver as a driver model. Its feasibility in principle was already demonstrated at the Munich North shunting yard in 2017 [8]. Following this, currently the operational reliability and system safety is investigated. Therefore a holistic scenario-based validation method is under development in order to test these functionalities in a way that is appropriate to the application and relevant to the context [9]. A simulated railway environment is developed to independently serve as raw sensor data sources during both algorithm development and end-of-line testing. For a sustainable and comprehensive mapping of the eventuality spectrum, photorealistic virtual tests are pursued. The simulation environment (LAB) enables the generation of a huge variety of scenes, which is also of interest in the context of collecting training data sets for machine learning purposes. Therefore, this paper first analyses the requirements on synthetically generated image data sets (virtual images) within a study on photorealism. Real comparison data sets of basic sensor architectures are collected during field operation and their simulatively emulated counterparts are reconstructed. These comparable data sets (data twins) are fed to different pre-trained object detection and classification algorithms. Their confidence is evaluated on both data sets. It is shown to what extent the image classification Confidence Score (CS) can be increased by means of model-like parameter variations. For the second stage an adaptive algorithm is trained on virtual images rendered using the rail specific UE5-LAB environment. The performance of the artificial intelligence-based object classification is then evaluated on the in-field recordings.

Due to increases in rendering performance and the flexibility in scenario and object design, the possibilities for data set creation surpassed limitations mentioned in the literature [10]. Furthermore, developments on frameworks of artificial intelligences, i.e. later versions of neural network-based CV systems are promising and lead to the central research question.

Can virtual images from the virtually rendered railway environment (UE5-LAB) serve as a training dataset for a CV system that should operate in the real world and what are the requirements for the dataset?

2 State of research

The integration of Virtual Reality (VR) into technical processes was demonstrated at the latest in 1993 with the development of a teleoperation system for space activities [11]. Today, the technology is not only used for human-machine-interfaces but also for machine-machine-interfaces, such as described in the following sections.

2.1 Virtual Reality as a machine playground

The migration of VR into the development processes of perception based autonomous systems is known as an established technology from parallel industries [1]–[3]. The basic adaptation of this approach to the railroad sector is demonstrated in [9]. Along a developed tool chain, a virtual closed-loop test bench was developed for scenario-based testing of highly automated shunting functions [12]. The structure of the simulative laboratory test bench for automated systems is shown in Figure 1. Equivalent to the Operational Design Domain (ODD, [13]), different test scenarios (a) are rendered using the UE5 framework (b). This rendering describes the graphical representation of each static and dynamic element of a scene in the field of view [14]. In accordance with the procedures in the field, each movement of the locomotive is initiated by a shunting task (c). Digital models of camera, localization and Light Detection and Ranging system (LiDAR) are integrated to synthesize the respective virtual sensor data stream in the first-person perspective, post-processed and visualized in (d). From there the emulated data is forwarded via ethernet using the sensor specific User Datagram Protocol (UDP) streams. The receiver software element is the middleware of the autonomous System Under Test (SUT). This middleware, running either on laboratory (e) or the target hardware (f), serves as a publisher and subscriber infrastructure for the SUT. The exact data processing depends on the middleware software framework used. For instance, an autonomous system under development [15] is based on the Robot Operating System open source software libraries (ROS), another system currently under test is using the Eclipse zenoh™ protocol.

Within a closed loop test bench, the sensor data is processed by the SUT (e,f), which in turn forwards the driving decision to the low-level control. Represented by a co-simulated model of the vehicle kinematics or dynamics (g), the low-level closes the loop by controlling the velocity of the vehicle inside the UE5 simulation. The feeding of simulated data sets, including an explicit shunting task, LiDAR point clouds, camera and position

data in the Universal Transverse Mercator (UTM) format, into automated systems has already been demonstrated in [9].

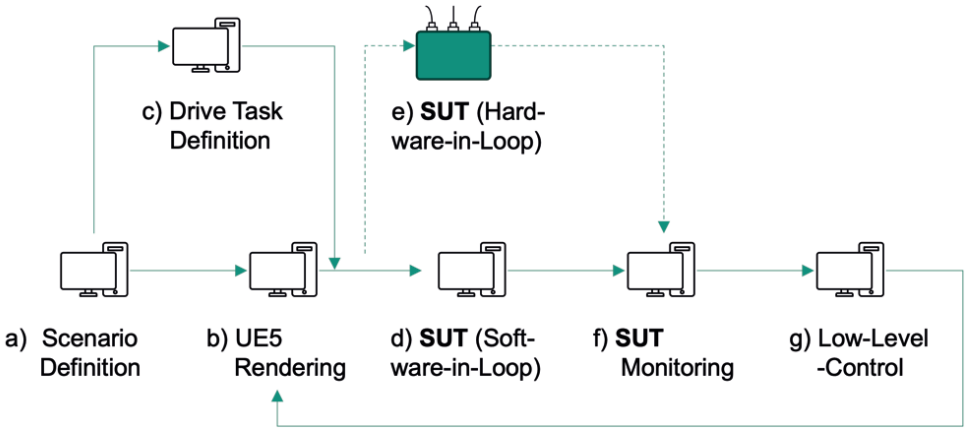


Figure 1: Simulative closed loop test bench for highly automated driving decision making as System under Test (SUT)

2.2 Image based object classification

For obstacle detection on railway tracks the diffusion of machine learning into the autonomous systems is outlined e.g. in [16], [17]. Training neural networks to detect and recognize static railroad signs is presented in [18] and extended to more complex elements such as light signals in [19]. Supervised learning methods require large data sets, whereof each must be labelled in a manner appropriate to the topic. In [16], the architecture of the YOLOv3 convolutional neural network is applied. The network is trained for five different classes with 7 412 images and tested against 880 images. Hence, a massive data set is required for each class. [16]

For the evaluation of the algorithm three metrics are considered. These are:

- The precision (P), defined as the ratio of true positives of a class to the number of images predicted to show this class.
- The Recall (R), as the ratio of the sum of true and false positive predictions to the total number of this class.
- The Intersection over Union (IoU), as the common ratio of the detected bounding box and the labelled (ground trouth) bounding box.

A threshold value for the IoU sets the minimum of congruence to be achieved before a classification is done. For each class this threshold can be varied over an interval [min,max]. This leads to a variation of the P and R values. The area below the P-R-curve

gives the Average Precision (AP). The average of the AP@[min,max] over all classes gives the mean Average Precision (mAP@[min,max]). [20]

In [14], the improvements in computer graphics and image rendering are investigated. The findings summarize a comparison between the human visual system and a CV system and confirm an engineering benefit in the field of artificial intelligence and object classification. In [21] a CV-based steering angle calculation for automotive applications is presented and tested in CARLA and validated through performing in-field test. In [22], the application of Deep Learning as a new area of machine learning is understood as an approach to

"achieve the imitation of the human brain"

within the control of an aerial vehicle. In order of training the autonomous object detection, image classification and path planning algorithms, AirSim, based on Unreal Engine 4 ® is used to obtain the data set.

In [10], it is stated, that virtually rendered images cannot represent a complete data set for an end-to-end CV based automatic steering angle control system in the real world. It is stated, that this is due to the lack of scenarios on the one hand, and the image quality on the other. In addition, precise manual labelling is time-consuming and therefore expensive.

2.3 Photorealism as key to virtual testing

Photorealism aims to make digital content resemble a photograph rather than mimic human vision. Based on that, it is not the human evaluation of the degree of photorealism that is required, but rather that one of CV systems.

The essential elements for creating photorealistic renderings begin in the lighting. On Earth, the atmosphere modifies sunlight into varying daytime light. Without it, sunlight would be harsh, white, and unvarying. Shadows would be sharp and sunsets abrupt. The atmosphere is responsible for the dynamic, visually engaging daylight we experience. [23].

The uncanny valley concept [24] represents a decrease in positive emotional responses to human-like characters that appear almost, but not completely, real [23]. Audiences appreciate non-realistic computer graphics characters like those in Toy Story [25], but may feel disturbed by characters that closely mimic humans yet possess an indistinguishable non-human quality. The uncanny valley applies not only to characters

but also to animated or static elements and entire environments. Although inanimate objects do not evoke the same emotional response, a subtler uncanny feeling occurs when digital images approach photorealism yet lack certain believability.

The challenge is to identify and address the elusive factors that impact photorealism to overcome the uncanny valley. The size of the object in the environment should be accurate. [23]

3 Evaluating photorealism

With the goal of migrating UE5 from the entertainment industry into the engineering process of safety-relevant driving decision-making, the degree of reality simulation becomes relevant. To ensure that both virtually performed tests and virtual images provide reliable and meaningful information, the similarity of the data twins (real/virtual) must be demonstrated. The aim of this chapter, the first step of this research, is to answer the question which elements and settings of a simulated image are crucial for a CV system and which parameters can be used to influence them.

Two different cameras were used for in-field image recording. The according parameters are listed in Table 1. To create realistic and comparable virtual images, the specific characteristics of the cameras were considered for the digital models inside UE5.

Table 1: Camera and lens specifications

Parameter	Basler acA4024-29 µm with a KOWA LM8JC3M2	Sony HDR-HZ1
Resolution in Megapixel	12.2	11.9
Resolution H x V in Pixel	4 024 x 3 036	4 608 x 2 592
Sensor Format in “	1/1.7	1/2.3
Framerate in fps	13.4	29.97
Mono/ Colour	Black/ White	RGB
Lens focal length in mm	8	17.1
f-number	F1.4	F2.8

3.1 Method

For the object detection, trainable neural networks were used due to their high accuracy and adaptability [26]. The algorithms Faster R-CNN, YOLO, SSD, and CenterNet were employed. These algorithms were selected for their ease of implementation using the open-source machine learning framework *Apache MXNet* and the *GluonCV* toolkit, which simplify the development of CV-object detection and classification systems.

The models were trained and tested for the classes *human* and *train* of the COCO dataset [27], a comprehensive object detection, segmentation, and captioning dataset. The performances of the models were evaluated using CSs, which measure the likelihood that the detected object is genuinely the object of interest.

The CS is defined as the product of the actual presence of an object (1 or 0) and the IoU. Finally, the visual aspects of the surroundings were improved based on the keys to photorealism discussed in Chapter 2 and further evaluations were conducted. The correct dimensioning for each major object in the simulation was considered. Objects such as trains and signals were first designed in CAD and then adjusted in *Blender* before being imported to UE5. The general test and improvement loop, shown in Figure 2, is run four times.

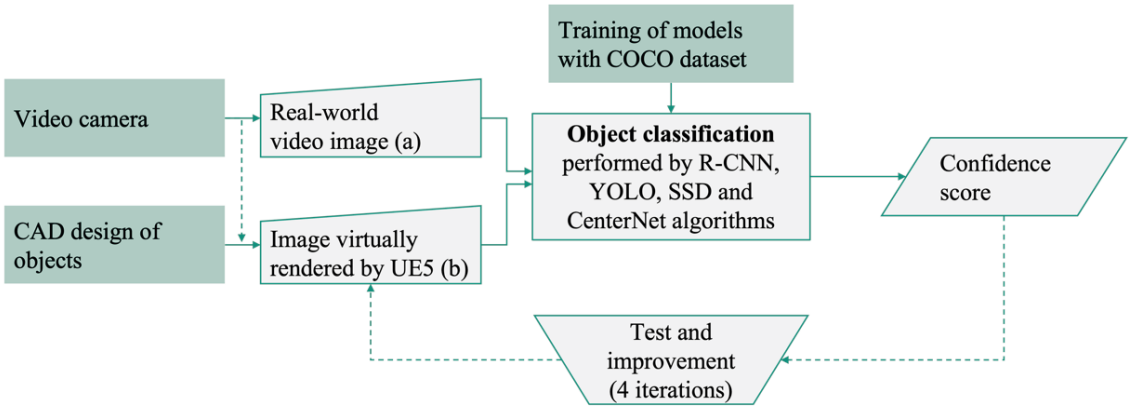


Figure 2: Proposed improvement loop for comparing captured (a) and virtually rendered images (b)

The research on photorealism was divided into two phases. Phase one aimed to study the basic suitability of the proposed object detection method, while phase two focused on examining the level of photorealism and its effect on the CSs.

To identify potential differences in CSs, first the scores on generated images were compared with those on similar real-world images. This step was crucial to confirm the viability of the proposed method for comparing the two image sets.

For the human-class, Faster R-CNN showed minimal differences in the CS between real and virtual images, with a mean deviation in thousandths. YOLO on the other hand showed slightly negative average differences, indicating that its CS on virtual humans is in general higher than on the real-world image. Different categories of wagons were tested. The mean difference using Faster R-CNN is ranged between -0.02 and -0.06, meaning the CS on virtual images with wagons is higher compared to the real image. For the same classes, YOLO showed a positive mean difference (0.03 - 0.08), suggesting a lower CS for virtual images. Out of 30 images, 16 resulted in a CS difference of less than 6 %. Excluding the undetected images, the measurable difference in CS between real-world and virtual images was 40 %. Due to this noticeable deviation two additional algorithms, i.e. Single Shot Detector (SSD) and CenterNet were consulted for the evaluation. The mean of all four algorithms was calculated and employed as a metric in phase two.

For phase two, images captured during in-field recording drives were considered. The test data sets include the presence of humans, steel sheets, dwarf signals, crows and different types of wagons. Four virtual images were considered during each test, using both camera models in two distinct camera positions (0° and 30° local rotation). The different camera positions were used to minimize the influence of using only one object orientation, such as only the front perspective. A test was conducted to assess the impact of different materials on the confidence score of the object detection algorithm for the wagons Eanos-x 056 and Tads 961. Both real-world and virtual images were compared using various materials applied to the wagons. For the virtual image rendering in UE5, four material representations were used in this study, named: Basic, Automotive, Imperfection and Megascan, each of which differs in the level of detail and thus appearance. The comparison of the according confidence scores for both cameras in each position is listed in Table 2.

Table 2: Comparison of the mean confidence score of four object detection algorithms for an Eanos-x 056 wagon with different materials, cameras and perspectives

	Real-world	Basic	Automotive	Imperfection	Megascan
Sony, Position 1					
Metric	0.85	0.36	0.29	0.75	0.28
Sony, Position 2					
Metric	0.66	0.47	0.67	0.85	0.45
Basler, Position 1					
Metric	0.85	0.36	0.24	0.79	0.19
Basler, Position 2					
Metric	0.66	0.78	0.92	0.92	0.83
Overall mean	0.76	0.49	0.53	0.83	0.44

The overall mean provides the average metric value for each material type across both camera models and positions. The imperfection material showed the highest overall mean (0.83), indicating the best average performance among the materials. In contrast, the Megascans material showed the lowest overall mean (0.44), indicating the poorest average performance. For the Tads 961 wagon the highest overall mean CS of 0.70 was achieved when using the Megascans material, indicating the best performance among all tested materials. Conversely, the imperfection material yielded the lowest overall mean CS (0.53), suggesting the weakest performance on average. It is essential to recognize that both materials were downloaded from Megascan, but the material types and textures used differed. The reason for the scatter is still the subject of ongoing research. The basic and automotive materials demonstrated similar mean CSs, ranging from 0.49 to 0.59.

The subsequent test cases focused on the sensitivity analysis on the CSs due to the impact of surrounding changes. Four different environments were designed, which included the

presence of a bush, the use of different grass materials, placing the object on grass without a rail track, and positioning the wagon on a road. It was observed that the presence of a bush caused the shadow of the wagon to appear larger. Using the starter content grass material resulted in lower photorealism in the environment, as the grass lacked imperfections and appeared excessively green. Positioning the wagon on grass without a rail track led to a reduced CS, as trains are typically found on rail tracks. Further scenarios inspected the effect of changing materials of objects or objects themselves in the background. The impact of altering the material of a background building was investigated. The results showed that changing the background material had a minimal effect on the CS, with changes ranging between -1% to 2%. Inspection of the effect of daytime and the according lighting (sunlight, dusk, night, lamp illumination during night) showed, that the period directly after sunset had the lowest mean CS. This was due to the absence of sunlight and lamps were not turned on. After the lamps were turned on, the mean CS increased and ranged from 0.43 to 0.59. As the sun becomes visible the mean CS increased to a range of 0.84-0.89.

In Phase one, pre-trained neural networks showed similar results on real and virtual images, with a resulting detection rate of 97%. In Phase two, the virtual images resulted in a lower detection rate: out of 316 total images, 90 objects remained undetected yielding a 72% detection rate. It is also to consider that some images in Phase two were expected to be undetected, such as wagons occluded by bushes or wagons on roads.

3.2 Conclusion on photorealism

The study on photorealism should highlight the potential benefits of virtual training datasets and evaluate whether their application is advantageous for the current use case, such as automated shunting. As a representation of the autonomous system, we used four object detection algorithms: Faster R-CNN, YOLOv3, SSD, and CenterNet, which were trained on real-world images from the COCO dataset. Our method however did not measure the photorealism of an image directly as it was not the objective of the study. Instead, it relied on the CSs of object detection algorithms to compare virtual images to similar real-world images.

The impact of the surrounding and lighting was categorized. Overall, the findings suggest that CV systems are able to detect objects known from the real world in rendered images. Furthermore, it is shown, that material selection can significantly influence the performance of object detection algorithms. The study concludes with the motivation to

reverse the methodical approach and design a virtual training dataset for a supervised learning algorithm for real-world use.

4 Design of a virtual image training data set for in-field object classification

The next step was to replace the generic COCO dataset with a training dataset specific to a particular use case. Therefore, virtual images obtained from the photorealistic simulation environment were used. This data set aims to serve for the training of a deep learning algorithm for signal detection and classification. The validity of the virtual training data is shown using the example of the dwarf signal, as shown in Figure 3, in each case for white (Sh1, go) and red (Hp0, stop). Following up on the research presented in [20] where the YOLOv5 deep network is proposed for object detection and recognition, this research uses the improved later version YOLOv8.

Figure 3: Dwarf signal, Hp0 red (left) and Sh1 white (right)

In this section, initially the requirements on training neural networks are outlined. As shown in Figure 4, the chosen network is trained in two stages, to demonstrate the impact of the scenario design. Therefore, simple images virtually rendered by UE5 are augmented to serve as the first training data set for the Yolo-framework. The CV – model is tested on video camera images from in-field recordings. In a second stage, the training data set is improved in terms of representing a holistic coherent scenario description and tested again. Afterwards the integration of the classifier into the virtual test bench is shown and the live object classification is demonstrated. In the final step, recordings from the field are used to test the classifier on 345 real world images for both detail levels presented in the sections 4.2 and 4.3 respectively.

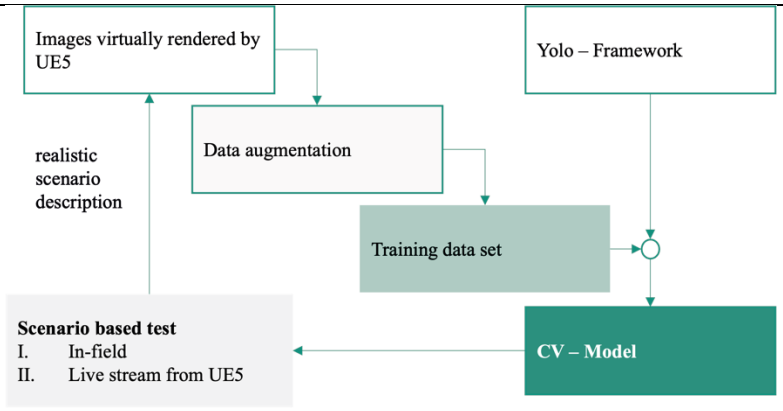


Figure 4: Design process of the Yolo-based CV-Model.

4.1 Requirements on training data sets and general processing

According to the suggestions of the developer, the later, advanced data set was created along the following instructions:

- Appropriate diversity
- Consistency with application scenario
- Class balance

First and foremost, appropriate diversity is required. For instance, the weather distribution observed in the field is relevant. For this purpose, the weather report of the target marshalling yard recorded during the last years was considered. In addition, consistency with the application scenario is required. This means that the operation environment of the CV system was designed with typical elements such as tracks, rail vehicles, buildings and people wearing high-visibility vests. Third, class balance is required. This means that training data of at least similar quantity must be available for each respective class to be recognized.

The training data set was exported from UE5. Before feeding the images to the YOLOv8 algorithm, the classes were labelled. For this purpose, the software tool *Make Sense AI* was used. Every class appearing in a single image was framed by a bounding box, designed as tight as possible and assigned to the corresponding class.

In order to increase the variety of the images and to simulate disturbances a step called data augmentation was carried out using the python library *albumentations*. The augmentation was reviewed using the *pybboxes* library. The images were saved in .jpeg format along with the according label document containing the coordinates of the bounding boxes and the class description in a .txt file, both in the same folder. The

augmentation techniques used are rotation (between -30° and +30°), brightness (between -15% and +15%), blur (up to 5 pixels) and noise (up to 8% of pixels). After sorting out irrelevant images, the data augmentation more than doubled the data set.

4.2 Model One – Simple data set

The first training data set was set up with 800 images in a variety of weather and lighting conditions, such as shown in Figure 5. The data set was extended using the described data augmentation techniques to 1 916 images in sum. The elements used include academic examples and do not represent the railroad guidelines conformity yet. In this stage elements from the periphery such as buildings, vehicles etc. were not considered.

For the training process the initial (lr0) and final (lr1) learning rate were set to the default value of 0.01 each. The image size was set to 640 x 640 pixels, the number of images per batch to two, IoU threshold to 0.5 and the patience to 50. The model used is the large one, i.e. *Yolov8l.pt*. The images were split for training/test/validation purpose as 80/10/10.

The entire training took 424 iterations, processed in about 20 hours using a Nvidia Titan Xp graphics card. After finishing the training, the mAP value is 0.92. The bounding box loss is 0.41 and class loss is 0.25. A low box loss value indicates a high IoU.

Figure 5: Excerpt of the virtual training images

4.3 Model Two – Advanced data set

In the second stage of testing the integration of YOLO into the object detection and classification process, the training data set was set up closer to the requirements given in section 4.1. To measure the impact of the training data, the settings of the training process were maintained.

The data set from model one (section 4.2) was extended to 3 897 images (1 655 without the augmentation) focusing on the following details. The simulation of different

surroundings, regarding different illumination conditions, camera perspectives and angles, realistic scenarios including locomotives, trees and florals, terrain, rail track colors etc. such as shown in Figure 6 was applied.

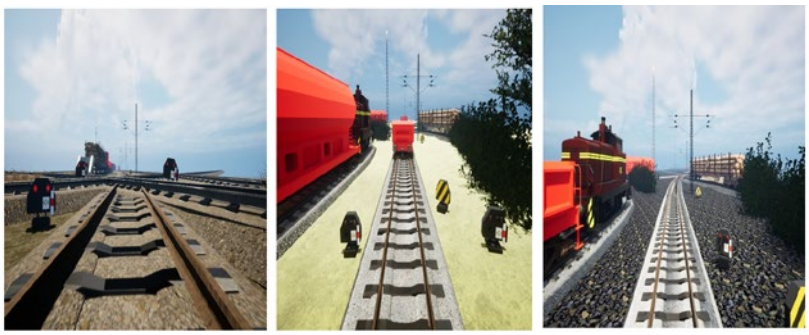


Figure 6: Examples of a coherent and realistic environment for a more advanced and comprehensive training data set

Compared to the first training, the advanced training data set resulted in a higher accuracy of the classificatory, shown in Figure 7.

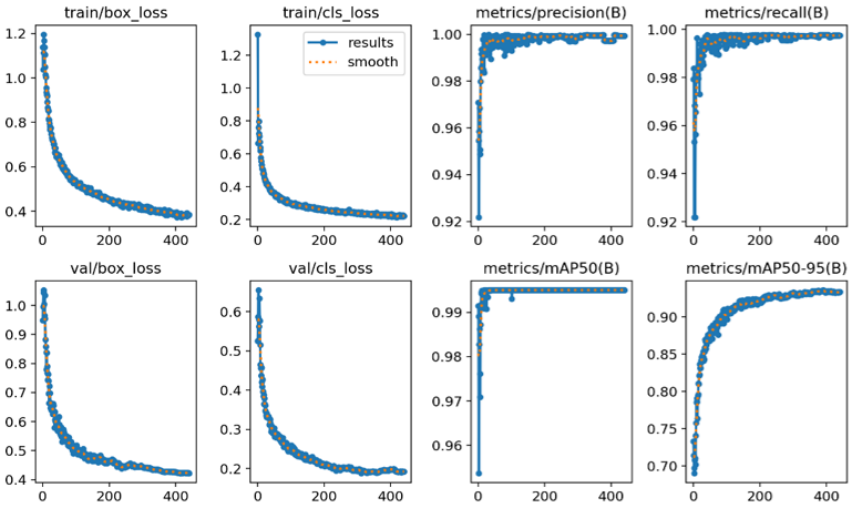


Figure 7: Result of the second training run of Yolov8 using virtual images only

The mAP value increased from 0.92 to 0.95, the bounding box loss decreased from 0.41 to 0.38 and the class loss decreased from 0.25 to 0.22, proving that the extension of the dataset has a positive effect on the accuracy of the model. The abbreviations (train and val) in Figure 7 refer to the data set used for training and validation during the training process. The graphs show typical asymptotic behavior. For the visualization of the

training progress the training iterations, the so-called epochs, are plotted on the abscissa, the respective value on the ordinate. On the left side the improvement on the IoU (decreasing box loss) is shown on both, training (above) and validation data (below). A similar but faster evolution is observed for the right identification of a certain class in an image (decrease of cls_loss). Furthermore the evolution of the metrics P, Rm mAP@50 as well as the mAP@[50;95] is printed over the epochs. It can be seen, that the quality of the chosen neural network quickly improved in the beginning and came to a saturation after a few iterations. When comparing the evolution of the mAP50 and the mAP@[50;95] it becomes clear, that the higher confidences coming in line with higher IoU thresholds take more training iterations.

4.4 Integration of YOLO into the virtual test bench

After completing the training, the virtual test bench, presented in section 2.1, was used to validate and demonstrate the CV-based object detection and classification. Therefore, the images captured by the camera model inside UE5 were streamed out by UDP to a local PC running a Python script. After setting up the network interface the packages are reassembled to images in the RGBA format. These were then converted into the RGB format and fed frame by frame to the CV system based on YOLOv8. The script live draws a bounding box around detected objects and classifies them as either red or white dwarf signal and annotates the according CS. This gives a simple approach to live monitor the decision making of artificial intelligences in driving decision making.

4.5 Testing results on real data

The main intension of this research was to verify a neural network trained on virtual data for object detection and classification on real-world data. Therefore, 345 images captured during in-field recordings were considered. The results of the comparatively high scores for both virtual test runs of the earlier sections can serve as a reference metric. In Table 3, the results for both algorithms, based on the simple (Model One) and advanced data set (Model Two) are listed. Thereby, the metrics are given for both, virtually generated images from the LAB environment and the real-world validation images from the FIELD. The table also includes the results of a further experimental model trained on the exact same parameters and requirements as in Test Two, but using a higher resolution of the images (1 280 x 1 280 Pixel).

The simple training data set of Model One led to very good results (scores > 0.9) when tested on virtual tracks in the LAB environment. The scenes were simple and no other objects included but the track and the signals. When applying the same CV model to the FIELD data, it becomes obvious, that the confidences are comparatively low with an mAP of about 30 %. Model Two, included a data set with more details on the railway environment. The impact on the mAP on LAB data is recordable, the improvement on FIELD data more than doubled the score to over 70 %. Furthermore, the mean recall more than doubled from Model One to Two on FIELD images. The improvement of the system confidence can also be seen in the confusion matrix, shown in Figure 8. For this evaluation approach the two specific classes for the draf signal are explicitly listed, other objects are counted as background.

Table 3: Results of the neural network algorithms trained on virtual images and tested on real world data (FIELD) and generated virtual data (LAB)

Model	mP@0.5	mAP@[0.5, 0.95]	mR@0.5	Accuracy	F1 Score	Inference time in ms
One (LAB)	0.995	0.92	1.00	1.00	1.00	11.6
One (FIELD)	0.593	0.3	0.474	0.424	0.56	11.6
Two (LAB)	0.995	0.943	0.999	0.99	0.99	11.6
Two (FIELD)	0.968	0.705	0.951	0.93	0.96	11.6
Exp. (LAB)	0.994	0.941	0.998	0.99	0.99	43.1
Exp. (FIELD)	0.912	0.668	0.856	0.899	0.87	43.1

The confusion matrix represents the actual true class on the abscissa, and the predicted class on the ordinate. In Figure 8, the results are presented for the CNN-based CV-System trained on the simple data set (left) and on the advanced data set (right). The improvement on the CV system trained on the advanced data set is indicated by the high scores of true/true values. Using model One, only 40 % of Hp0 signals were correctly detected, whereas model Two showed 94 % correct results on that class. Wrong predictions of 60 % with model One lowered to a tenth of that with model Two. The Sh1 signal was correctly detected in 55 % of cases using model One and increased to 97 % with model Two. Furthermore, it can be noted, that less false positives were detected with model Two. Compared to the virtual control quantity, the mAP on real data is still lower but

improvements on the training data set promise a further enhancement of the YOLO classifier. At least the advanced training data set showed CSs of above 87% which is estimated as good.

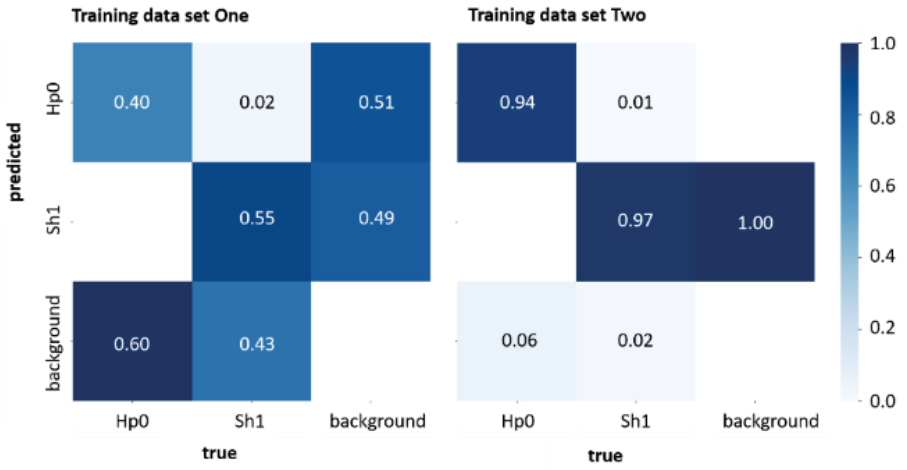


Figure 8: Confusion matrix. Based on the training data set of test one (left) and test two (right). Validated on the same real-world data.

5 Conclusions and future work

In this paper the utilization of convolutional neural networks for railway specific objects was demonstrated. It is shown that the COCO training data gives a point to start research about virtual training data for field applications. Furthermore, extracting training data from the scenario simulator as described in [9],[12] is demonstrated. It is shown, that an improvement on background details in the training data set has a positive impact on the classification and the accompanied CS. The integration of YOLO as an object classification algorithm into the virtual test bench is demonstrated. Furthermore, it is shown, that virtually rendered training data can be used for object detection and classification in the field.

Future work will investigate decisive details to improve the mAP score. Parallelly the approach is rolled out to other sensors such as LiDARs. For a more efficient training the data generation including the required and appropriate labelling is examined with regard to its automatability. The research team is aiming to develop a school bench for autonomous systems.

Acknowledgement

Chapter two of this paper is based on results of the cooperative research project VAL of the consortium partners DB Cargo AG and the NIT, funded by the Federal Ministry of Digital Affairs and Transport; FKZ 5320000013, EBA Az. 8fd/003-1255#008-VAL.

Literature

[1] K. Neumann-Cosel, „Virtual Test Drive“, TUM, München, 2012. Zugegriffen: 31. Oktober 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn:nbn:de:bvb:91-diss-20140206-1126934-0-2

[2] W. Guerra, E. Tal, V. Murali, G. Ryou, und S. Karaman, „FlightGoggles: Photorealistic Sensor Simulation for Perception-driven Robotics using Photogrammetry and Virtual Reality“, in *2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Macau, China: IEEE, Nov. 2019, S. 6941–6948. doi: 10.1109/IROS40897.2019.8968116.

[3] S. Shah, D. Dey, C. Lovett, und A. Kapoor, „AirSim: High-Fidelity Visual and Physical Simulation for Autonomous Vehicles“, in *Field and Service Robotics*, Bd. 5, M. Hutter und R. Siegwart, Hrsg., in Springer Proceedings in Advanced Robotics, vol. 5. , Cham: Springer International Publishing, 2018, S. 621–635. doi: 10.1007/978-3-319-67361-5_40.

[4] Pegasus, „Projekt zur Etablierung von generell akzeptierten Gütekriterien, Werkzeugen und Methoden sowie Szenarien und Situationen zur Freigabe hochautomatisierter Fahrfunktionen“, Schlussbericht – Gesamtprojekt, Feb. 2020. [Online]. Verfügbar unter: https://www.pegasusprojekt.de

[5] SHIFT2RAIL, „SHIFT2RAIL STRATEGIC MASTER PLAN“, Jan. 2014. Zugegriffen: 31. Oktober 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://shift2rail.org/wp-content/uploads/2021/06/Shift2Rail-Master-Plan_approved-by-S2R-GB.pdf

[6] RAILFREIGHT FORWARD EUROPEAN RAILFREIGHT VISION 2030, „30 by 2030: Rail Freight strategy to boost modal shift“, Jan. 2021. Zugegriffen: 31. Oktober 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.railfreightforward.eu/sites/default/files/usercontent/white_paper-30by2030-150dpi6.pdf

[7] UN Climate Technology Centre & Network, „Modal shift in freight transport“. Zugegriffen: 31. Oktober 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ctc-n.org/technologies/modal-shift-freight-transport

[8] M. Cichon und R. Schaal, „Vollautomatische Abdrücklokomotive - Machbarkeitsstudie und Aufbau eines Demonstrators“, gehalten auf der 16. Internationale Schienenfahrzeugtagung, Dresden, Sep. 2018. Zugegriffen: 31. Oktober 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/327860783_Vollautomatische_Abdrucklokomotive_-

_Machbarkeitsstudie_und_Aufbau_eines_Demonstrators

[9] S. Schäfer, L. Greiner-Fuchs, T. Hofmeier, und Cichon, Martin, „Entwicklung eines echtzeitfähigen virtuellen Laborprüfstands (Simulationsumgebung) für das szenariobasierte Testen und Validieren hochautomatisierter Fahrentscheidungs-und Steuerungssysteme von Rangierlokomotiven“, in *Tagungsband 19. Internationale Schienenfahrzeugtagung Dresden*, März 2023, S. 108.

[10] W. Yuan, M. Yang, C. Wang, und B. Wang, „VRDriving: A Virtual-to-Real Autonomous Driving Framework Based on Adversarial Learning“, *IEEE Trans. Cogn. Dev. Syst.*, Bd. 13, Nr. 4, S. 912–921, Dez. 2021, doi: 10.1109/TCDS.2020.3006621.

[11] S. Wenzel und H. J. Claßen, „Die Anwendung von Virtual Reality bei Telerobotik“, in *Virtual Reality*, H. J. Warnecke und H.-J. Bullinger, Hrsg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1993, S. 259–269. doi: 10.1007/978-3-642-88650-8_20.

[12] L. Greiner-Fuchs, S. Schäfer, T. Hofmeier, und M. Cichon, „Database-supported methodical approach for the development of a toolchain for the evaluation of ATO functions using a scenario-based test methodology“, in *Proceedings of the Fifth International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance*, in Paper 13.4. Montpellier: Civil-Comp Press, 2022. doi: 10.4203/ccc.1.13.4.

[13] British Standards Institution (BSI), *Operational design domain (ODD) taxonomy for an automated driving system (ADS). Specification*. London, United Kingdom: BSI Standards Limited, 2020.

[14] A. Singh, M. Kumar, und A. Saxena, „Analysis of Computer Vision for Graphics and Animation“, in *2023 9th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS)*, Coimbatore, India: IEEE, März 2023, S. 804–807. doi: 10.1109/ICACCS57279.2023.10112718.

[15] M. Cichon und R. Falgenhauer, „Integrales ATO-System für Rangier-Aufgaben“, in *Tagungsband 19. Internationale Rad-Schiene-Tagung 2023*, Dresden, März 2023.

[16] R. M. Prakash, M. Vimala, S. Keerthana, P. Kokila, und S. Sneha, „Machine Learning based Obstacle Detection for Avoiding Accidents on Railway Tracks“, in *2023 7th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS)*, Madurai, India: IEEE, Mai 2023, S. 236–241. doi: 10.1109/ICICCS56967.2023.10142837.

[17] R. Sattiraju, J. Kochems, und H. D. Schotten, „Machine learning based obstacle detection for Automatic Train Pairing“, in *2017 IEEE 13th International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS)*, Trondheim, Norway: IEEE, Mai 2017, S. 1–4. doi: 10.1109/WFCS.2017.7991962.

[18] S. Mikrut, Z. Mikrut, A. Moskal, und E. Pastucha, „Detection and Recognition of Selected Class Railway Signs“, *Image Processing & Communications*, Bd. 19, Nr. 2–3, S. 83–96, Sep.

2014, doi: 10.1515/ipc-2015-0013.

[19] G. Karagiannis, S. Olsen, und K. Pedersen, „Deep Learning for Detection of Railway Signs and Signals“, in *Advances in Computer Vision*, Bd. 943, K. Arai und S. Kapoor, Hrsg., in Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 943. , Cham: Springer International Publishing, 2020, S. 1–15. doi: 10.1007/978-3-030-17795-9_1.

[20] A. Staino, A. Suwalka, P. Mitra, und B. Basu, „Real-Time Detection and Recognition of Railway Traffic Signals Using Deep Learning“, *J. Big Data Anal. Transp.*, Bd. 4, Nr. 1, S. 57–71, Apr. 2022, doi: 10.1007/s42421-022-00054-7.

[21] S. Shafique, S. Abid, F. Riaz, und Z. Ejaz, „Computer Vision based Autonomous Navigation in Controlled Environment“, in *2021 International Conference on Robotics and Automation in Industry (ICRAI)*, Rawalpindi, Pakistan: IEEE, Okt. 2021, S. 1–6. doi: 10.1109/ICRAI54018.2021.9651414.

[22] S. Wang, J. Chen, Z. Zhang, G. Wang, Y. Tan, und Y. Zheng, „Construction of a virtual reality platform for UAV deep learning“, in *2017 Chinese Automation Congress (CAC)*, Jinan: IEEE, Okt. 2017, S. 3912–3916. doi: 10.1109/CAC.2017.8243463.

[23] E. Dinur, *The Complete Guide to Photorealism: For Visual Effects, Visualization and Games*, 1. Aufl. New York: Routledge, 2021. doi: 10.4324/9780429244131.

[24] M. Mori, K. MacDorman, und N. Kageki, „The Uncanny Valley [From the Field]“, *IEEE Robot. Automat. Mag.*, Bd. 19, Nr. 2, S. 98–100, Juni 2012, doi: 10.1109/MRA.2012.2192811.

[25] M. Henne, H. Hickel, E. Johnson, und S. Konishi, „The making of Toy Story [computer animation]“, in *COMPCON '96. Technologies for the Information Superhighway Digest of Papers*, Santa Clara, CA, USA: IEEE Comput. Soc. Press, 1996, S. 463–468. doi: 10.1109/CMPCON.1996.501812.

[26] N. O'Mahony *u. a.*, „Deep Learning vs. Traditional Computer Vision“, in *Advances in Computer Vision*, Bd. 943, K. Arai und S. Kapoor, Hrsg., in Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 943. , Cham: Springer International Publishing, 2020, S. 128–144. doi: 10.1007/978-3-030-17795-9_10.

[27] T.-Y. Lin *u. a.*, „Microsoft COCO: Common Objects in Context“, 2014, doi: 10.48550/ARXIV.1405.0312.

Assignment of thematic focus: The proposed contribution topic is basically assigned to highly automated (assisted/automated/autonomous - 3A) rail freight transport, but is transferable to all automatable track-guided driving processes on sight. The presented virtual or digital tools are already used for (simulated) automated dispatching and can provide valuable insights in incident management. The goal of the work is to increase

the competitiveness of rail freight transport and contributes to the focus on mobility management in perspective.

Authors

M.Sc. RWTH Schäfer, Steffen

Research associate at the Institute of Vehicle Technology at Nuremberg Institute of Technology and Karlsruhe Institute of Technology. Since 2014, conducting research on automation and innovations to improve the sustainable mobility situation. Studied aerospace engineering at RWTH Aachen University and researches the influence of virtual systems on the diffusion of artificial intelligences into the driving decision making of railroad systems.

M.Sc. Yöndem, Furkan Sakir

Student assistant at the Institute of Vehicle Technology at Nuremberg Institute of Technology. Completed his master's degree in the field of electrnic and mechatronic systems at Nuremberg Institute of Technology in 2023. During that time, he was researching the impact of artificial intelligence on the decision-making process of autonomous vehicles.

M.Sc. Aliziyad, Muhamad Iqmal Naqib Mohd

Studied mechanical engineering at the Nuremberg Institute of Technology. In his master's thesis he researched the influence of virtually rendered images on computer vision systems.

Prof. Dr.-Ing Cichon, Martin

Head of the Institute of Railway Systems Engineering at the Karlsruhe Institute of Technology. His research fields include vehicle technology, power supply, automation and robust systems. He leads collaborative research projects with DB Cargo and other industry and research partners and drives the technology migration of ATO systems.

IRSA 2023

AUTORENVERZEICHNIS
AUTHOR INDEX

A

Aktaş, Hakan 601
Aliziyad, Muhamad Iqmal Naqib Mohd 726
Armstrong, John 104

B

Babilon, Katharina 713
Bagshaw, Mike 156
Bechev, Dani 265
Beitelschmidt, Michael 277
Berschin, Felix 11
Bešinovic, Nikola 390
Bonn, Florian 191
Breemeersch, Marc 345
Brockmeyer, Ansgar 683

C

Chen, Gang 223
Choupin, Tanguy 233
Christin, Elisa 648
Cichon, Martin 693, 726

D

David, Janecek 428
Dickenbrok, Björn 618
Ding, Xin 223
Dittus, Holger 582
Dumböck, Bertram 296

E

Eisold, Jan 460
Elfert, Lea 601, 632
Enning, Manfred 60

F

Fietze, Mario 408, 441, 493
Fink, Alexander 408
Freitag, Oliver 460
Frogner, Thomas Benjamin 123

G

Garack, Oliver 327
Gerlach, Thomas 511
Grabowski, David 26
Greiner-Fuchs, Lucas 693
Guiche, Fabien 233

H

Hampel, Fabian 542
Hantsch, Fabian 408
Hausberg, Tobias 618
Haydar, Luna Ammar 233
Hecht, Jonathan 428
Heeland, Matthew Maikel 561
Hemmerle, Max 648
Hempel, Thomas 527
Hilgefort, Jan Malte 43
Hilgers, Rudolf 60
Hoffmann, Hendrik 211
Hofmeier, Tobias 693
Höhn, Steffen 601
Hossein Nia, Saeed 223
Houzé, Frédéric 233

J

Jenne, Sven 511
Jung, Oliver 211

K

Kadar, Julian 181
Kager, Bernhard 296
Kaiser, Nicolas 664
Kauer, Björn 327
Kiepiela, Joanna Maria 123
Klick, Sebastian 664
Knetsch, Kevin 561
Kogel, Bastian 441, 493
Kordel, Markus 561
Körner, Sven 191
Körner, Tobias 170
Kraft, Dietmar 345
Krips, Maike 473
Kuckelberg, Alexander 142
Kühnel, Fabian 378

L

Lampe, Felix 618
Laufen, Hendrik 664
Lehnert, Torben Felix 511
Leibner, Philipp 527
Leithoff, Ingolf 142
Lempp, Martin 618
Lennerts, Kunibert 601, 632
Lenze, Wiebke 493

Lichtberger, Bernhard Wilhelm 313
Liu, Zhendong 223
Loete, Florent 233
Lorenzutti, Christoph 76

M

Maciejewicz, Frank 460
Madritsch, Christian 296
Martin, Ullrich 408
Maus, Maren 441, 493
Mayer, Jannik 265
Medeossi, Giorgio 156
Meinerzhagen, Leonie 618
Meirich, Christian 473
Mohn, Tobias 170
Müller, Anton 327
Multhoff, Jörg 211

N

Netter, Helmut 223
Nießen, Nils 441, 493, 618
Niu, Yan 345
Noll, Martin-Christopher 542

O

Obergfell, Jörg 648

P

Pantelidou, Heleni 648
Pape, Jan 191
Petschnig, Günter 76
Pfaff, Raphael 713
Pöhle, Daniel 170
Pospischil, Sarah 191
Prasomsuk, Nutchanon 361
Preis, Henning 390
Preston, John 104

Q

Quade, Katharina Lillith 664

R

Raths, Frederic 88
Reiners, Dirk 211
Reitz, Gregor 211
Rempel, Jessica 648
Riecke, Steven 170
Ruscher, Martin 277

S

Sauer, Dirk Uwe 664
Schäfer, Steffen 693, 726
Scharmach, Marcel 582
Schenker, Moritz 582
Scherer, Philipp 493
Schindler, Christian 361, 527
Schmidhäuser, Stefan 408
Schmidt, Bernd D. 713
Schmitz, Timo 542
Schnieder, Lars 43, 181
Schönberger, Jörn 390
Schott, Max 327
Schrömbges, Michael 378
Schröter, Fabian 441
Shan, Jing 390
Spiller, Martin 211
Stephan, Arnd 191, 277
Stichel, Sebastian 223
Stübinger, Lukas 527

T

Testé, Philippe 233

U

Uhlein, Erik 265

V

Vogel, Pascal 265
von Bohr, Markus 601
Vrba, Jan 248

W

Wasserscheid, Peter 181
Weik, Norman 473
Weinhart, Roland 265
Werner, Ernst August 211
Wilbrecht, Sebastian 277
Wilhelmer, Johannes 683
Wimmer, Simon 156
Wink, Christopher 88, 618
Winkelheide, Sebastian 361
Wolf, Lothar 527

Y

Yöndem, Furkan Sakir 726

Z

Zweigel, René 88