

Analyse extremer Wetterereignisse im Schienenverkehr mittels mikroskopischer Simulation

Die zunehmende Häufigkeit extremer Wetterereignisse wie Starkregen oder Überschwemmungen stellt den Schienenverkehr vor wachsende Herausforderungen. Diese Ereignisse beeinträchtigen Infrastruktur und Betriebsabläufe, führen zu Verspätungen und gefährden die Zuverlässigkeit des Bahnbetriebs. Dieser Artikel stellt eine simulationsbasierte Bewertungsmethode vor, um deren Auswirkungen zu ermitteln.



1. Einleitung und Motivation

Die zunehmende Häufigkeit und Intensität von Extremwetterereignissen stellen das deutsche Schienennetz vor erhebliche Herausforderungen. Insbesondere Starkregen, Überschwemmungen, Stürme oder extreme Hitze beeinträchtigen die Infrastruktur und den Betriebsablauf. In Folge kommt es zu Verzögerungen und Ausfällen im Bahnbetrieb. Die daraus resultierenden Störungen gefährden nicht nur die Pünktlichkeit, sondern auch die Zuverlässigkeit und Sicherheit des Schienenverkehrs (und damit auch der transportierten Fahrgäste und Güter). Dies führt zur Notwendigkeit, die bahnbetriebliche Wirkung dieser Ereignisse bewerten zu können, um deren Einfluss so gering wie möglich zu halten und effektive Anpassungs- und Resilienzstrategien zu entwickeln. Der Einsatz mikroskopischer Eisenbahnbetriebssimulationen, wie sie im

Rahmen dieser Untersuchung mit SUMO erfolgt, ermöglicht dabei eine realitätsnahe Abbildung der Betriebsabläufe unter Störungsbedingungen. Anhand eines Anwendungsfalls im nordwestdeutschen Schienennetz werden die Auswirkungen extremer Wetterereignisse auf Verspätungen und Pünktlichkeit quantitativ erfasst und daraus Handlungsempfehlungen für gezielte Gegenmaßnahmen abgeleitet.

2. Theoretischer Hintergrund zur Bewertung von Extremwetterereignissen

Die Auswirkungen extremer Wetterereignisse auf den Schienenverkehr sind Gegenstand mehrerer wissenschaftlicher Untersuchungen und Studien, die unterschiedliche methodische Ansätze und regionale Schwerpunkte aufweisen. Dabei zeigt sich ein übergreifendes Bild, demnach extreme Wetterbedingungen wie hohe Temperaturen, Starkregen und Überschwemmungen signifikante Verzögerungen im Bahnverkehr verursachen können. [1] analysieren etwa am Beispiel des Londoner U-Bahn-Netzes, wie extreme Hitze zu Infrastrukturversagen durch Gleisbuckelungen führt, was die Pünktlichkeit stark beeinträchtigt. Ähnlich zeigen [2], dass der Klimawandel die Risiken für den Bahnbetrieb generell erhöht, insbesondere durch häufigere Überschwemmungen und veränderte Niederschlagsmuster. Beide Quellen zeigen einerseits die Relevanz einer detaillierten Analyse klimabedingter



Jakob Geischberger

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Verkehrssystemtechnik, Gruppenleiter Bahnbetrieb
jakob.geischberger@dlr.de



Maximilian Held

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Verkehrssystemtechnik, Wissenschaftlicher Mitarbeiter
maximilian.held@dlr.de



Dr.-Ing. Christian Meirich

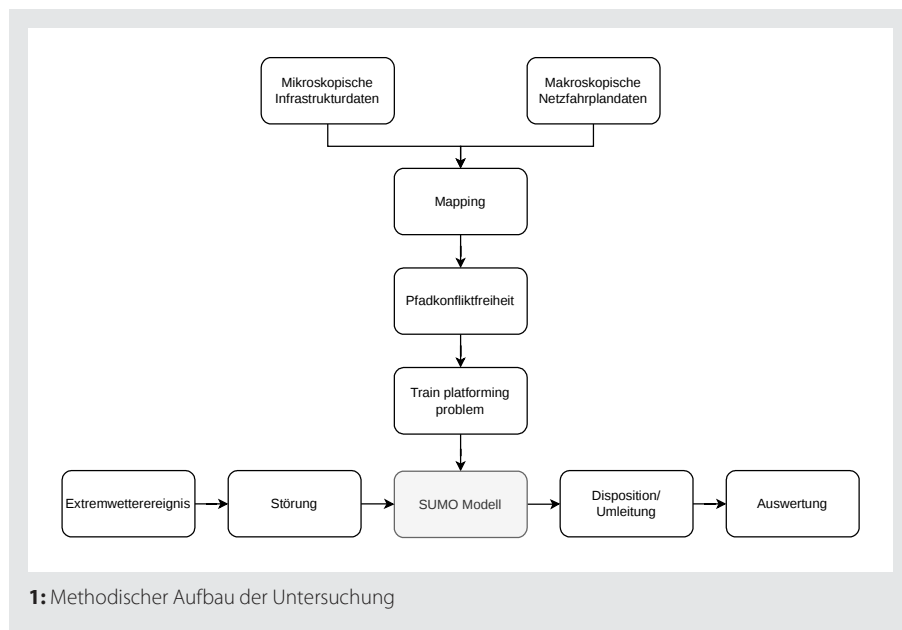
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Verkehrssystemtechnik, Abteilungsleitung Digitalisierter Schienenverkehr und -betrieb
christian.meirich@dlr.de

Betriebsstörungen und andererseits die Dringlichkeit, darauf aufbauend Anpassungsmaßnahmen sowohl in der Bahninfrastruktur als auch in den entsprechenden Planungsmethoden zu entwickeln.

[3] untersuchen darüber hinaus die Pünktlichkeit von Personenzügen in Schweden und identifizieren Überschwemmungen als wesentlichen Faktor für Betriebsunterbrechungen. Die Studie verwendet dabei quantitative Analysen,

Die Untersuchung zeigt,
dass eine mikroskopische
Netzwerksimulation mit SUMO
die Abbildung der Auswirkungen
extremer Wetterereignisse auf den
Bahnbetrieb ermöglicht.





um die Auswirkungen von Extremwetter auf die Betriebsleistung zu bewerten. Ergänzend dazu zeigen [4] anhand einer mehrdimensionalen Bewertung regionaler Klimawandelauswirkungen auf Bahninfrastrukturen, dass sich Wetterextreme in verschiedenen geografischen Kontexten unterschiedlich auswirken. Dies erschwert die Übertragbarkeit von Ergebnissen und zeigt gleichzeitig den Nutzen regional angepasster Modelle auf.

Im weiter gefassten Bereich der Simulation von Verkehrssystemen präsentieren verschiedene Studien Methoden zur Bewertung der Auswirkungen extremer Wetterereignisse. [5] etwa analysieren städtische Infrastrukturnetze mittels Netzwerkmodellierung, um systemweite Verwundbarkeitsmuster durch Hochwasser und Starkregen zu identifizieren und die Resilienz kritischer Infrastrukturen gegenüber Wetterextremen zu untersuchen. Ein weiterer vergleichbarer Ansatz, der über die Bahndomäne hinaus geht, findet sich in [6]. Dort finden mikroskopische Verkehrsmodelle Anwendung, um die Folgen von Überschwemmungen auf den Straßenverkehr zu simulieren – eine methodische Parallele zur vorliegenden Analyse.

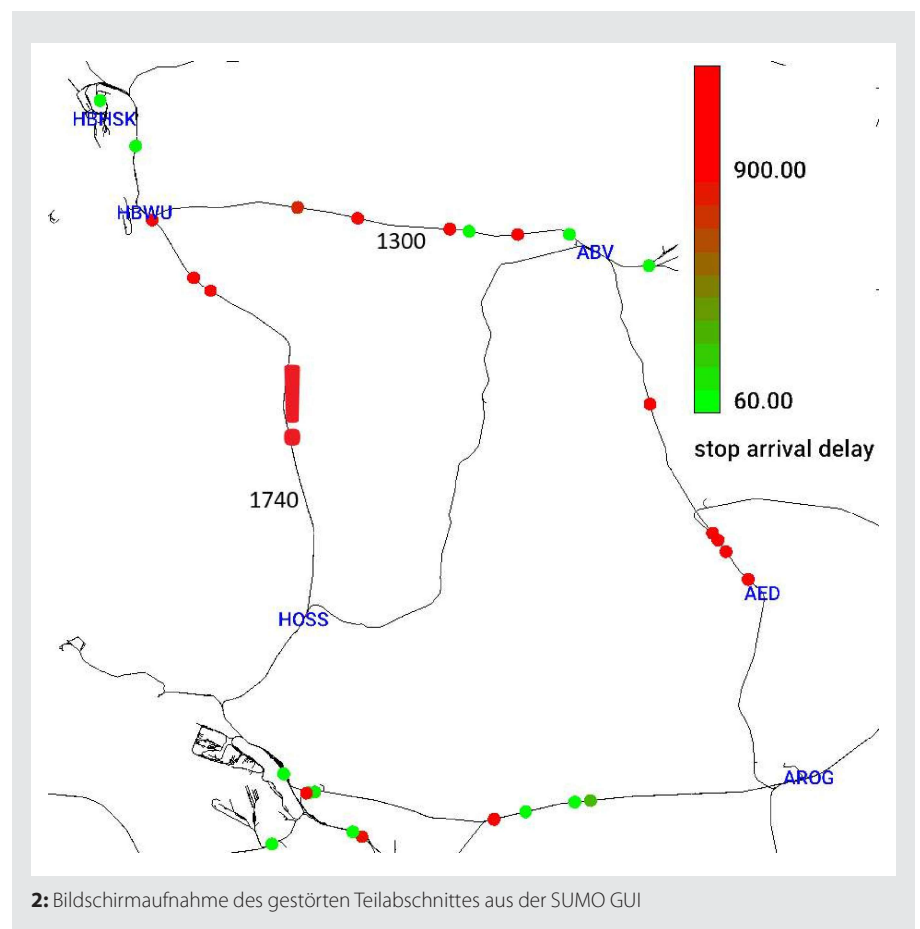
Über den expliziten Kontext von Extremwetterereignissen hinaus existieren mehrere Studien, die Simulationen zur Analyse von Störungen im Schienenverkehr einsetzen. [7] etwa nutzen agentenbasierte mikroskopische Simulationen, um die Dynamik von Betriebsstörungen in urbanen Schienennetzen abzubilden und Verzögerungen zu quantifizieren. De-

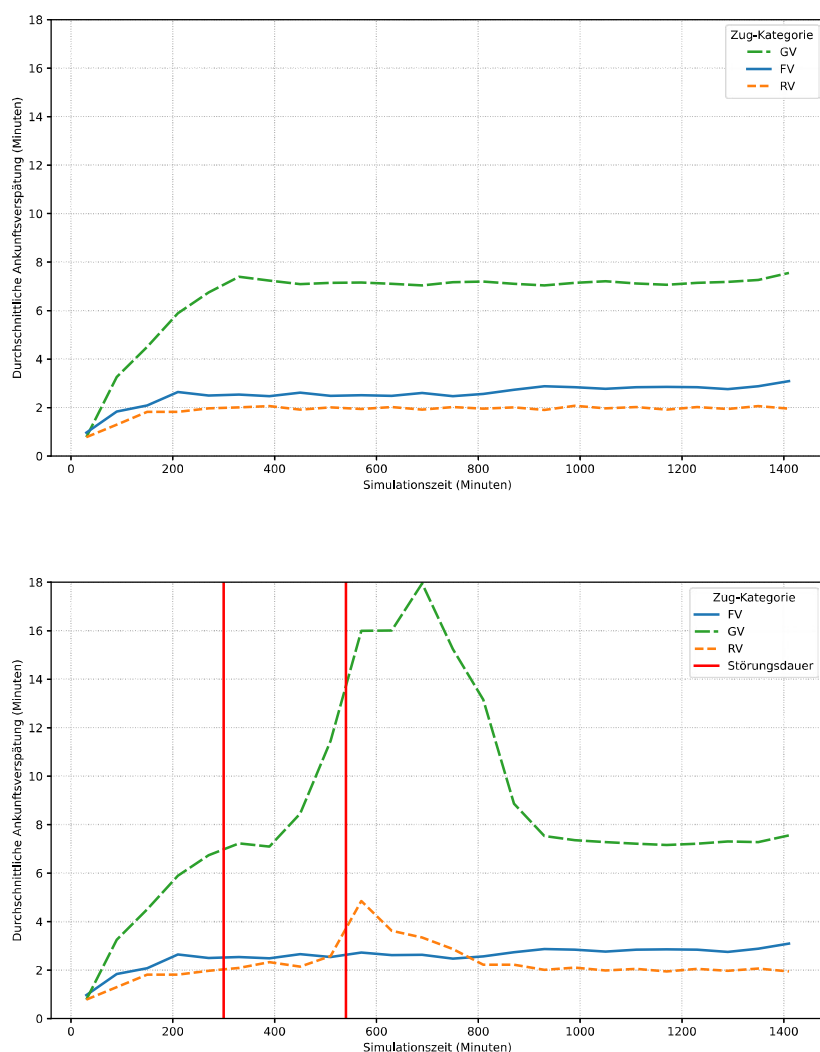
ren Methodik zeigt, wie Simulationen zur Bewertung von Rescheduling-Strategien und zur Minimierung von Störungsauswirkungen eingesetzt werden können. [8] demonstrieren in ihrer Arbeit zur Simulation interregionaler Bahnstörungen, dass die Charakteristika von Störfällen entschei-

dend für das Ausmaß der Verspätungen sind. Die durchgeführte quantitative Analyse liefert Erkenntnisse zur Verzögerungsdynamik, die gleichermaßen für wetterbedingte Störungen relevant sind.

[9] verdeutlicht darüber hinaus, dass die Wahrnehmung der Zuverlässigkeit im Schienennetz zwischen Betreibern und Nutzern divergiert, was auch bei wetterbedingten Störungen relevant ist. Extreme Wetterereignisse können die Pünktlichkeit von Zügen beeinträchtigen, während die tatsächliche Zuverlässigkeit aus Sicht der Nutzer auf der gesamten Transportkette bewertet wird, der entlang sich kundenzentrierte Sendungsverzögerungen „sprunghaft“ fortpflanzen können. Anhand agentenbasierter Simulation in SUMO integrieren sie diese unterschiedlichen Perspektiven, um ein umfassendes Verständnis der Zuverlässigkeit von Transporten im Schienennetz zu gewinnen.

Zusammenfassend zeigt sich eine Kombination von empirischen Analysen und simulationsbasierten Ansätzen zur Untersuchung der komplexen Auswirkungen extremer Wetterereignisse auf den Schienenverkehr. Die Nutzung mikroskopischer Simulationen, wie sie in dieser Studie mit





3: Vergleich der Ankunftsverspätungen über der Simulationsdauer für beide Szenarien

SUMO erfolgt, bettet sich insofern gut in diesen Hintergrund ein. Sie ermöglicht eine realitätsnahe Abbildung von Betriebsabläufen unter Störungsbedingungen, wie im nächsten Kapitel 3 dargelegt. So wird eine quantitative Wirkungsanalyse zu Verspätungen und Pünktlichkeit möglich, siehe Kapitel 4.

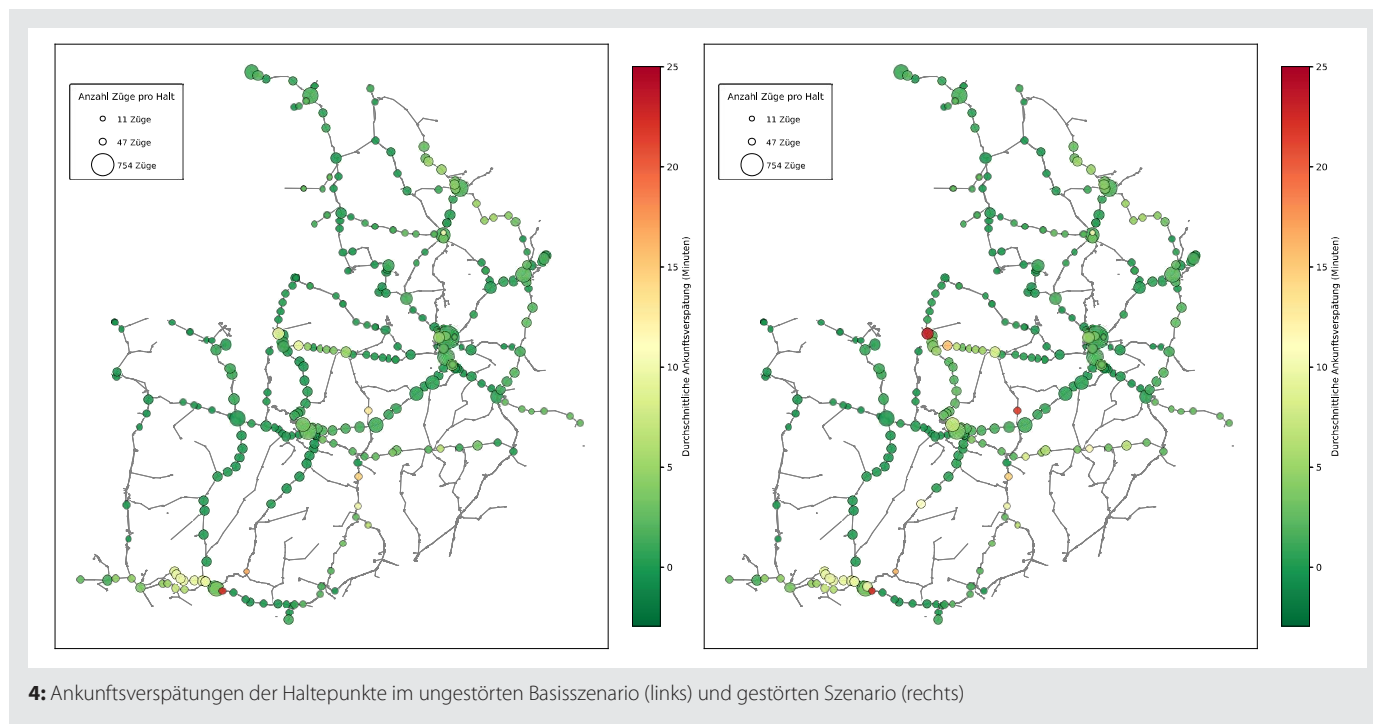
3. Methode zur Ermittlung der Wirkung von Extremwetterereignissen auf den Bahnbetrieb

Ursprünglich als Verkehrssimulator für den urbanen Raum entwickelt, deckt SUMO – Simulation of Urban Mobility [10] – inzwischen auch bahnbetriebliche Simulation mit ab. Dies beinhaltet eisenbahnspezifische Wirkmechanismen wie u. a. Signalisierung, Fahren im Blockabstand, Weichen mit

entsprechendem Belegungs- und Flankenschutz, Haltestellen und -gleise sowie fahrdynamisches Verhalten auf Basis von Zugkraft-Geschwindigkeits-Diagrammen [11]. Der große Vorteil liegt neben dem Open Source-Ansatz dabei auf einem verkehrsträgerübergreifenden Simulationsansatz, der die Verknüpfung bahnbetrieblicher Szenarien mit anderen Verkehrsträgern sowie die Integration von Waren- und Personenströmen erlaubt. Ebenso ermöglicht SUMO einen dynamischen Eingriff in laufende Simulationen via TRaCI-Interface, was die Kopplung der Simulation mit eigenen Methoden in Python erlaubt. Dies führt dazu, dass dynamische Use Cases wie etwa KI-gestützte Disposition, nachfrageorientierte Betriebskonzepte (demand-responsive) oder fahrzeugseitig auftretende Störungen modelliert werden können.

Für die vorliegende Untersuchung wird ein SUMO Netzwerkmodell auf Basis von Open Source-Daten erzeugt, wobei die Infrastruktur aus OpenStreetMap [12] erzeugt und als Fahrplan der Deutschlandtakt [13] verwendet wird. Zur Sicherstellung der Konsistenz von Fahrplan und Infrastruktur werden dazu infrastrukturseitig Korrekturen bzw. Erweiterungen vorgenommen. Nachdem das erzeugte Modell mikroskopischer Natur ist, erfährt im weiteren Verlauf der Modellerzeugung eine heuristische Methodik Anwendung, die makroskopische Netzfahrpläne in mikroskopische Pfade umlegt. So werden jedem Zug mikroskopische, d. h. gleisscharfe Pfade zwischen Verkehrshalten zugewiesen. Des Weiteren wird eine Instanz des sog. Train Platforming Problems (TPP) gelöst, das sicherstellt, dass die Gleiszuweisungen in Bahnhöfen möglichst effizient verlaufen. Im Ergebnis liegt ein mikroskopisches Eisenbahnbetriebs-simulationsmodell eines gesamten Netzwerks vor, das Personen- und Güterzüge beinhaltet, mikroskopische Infrastrukturdaten verwendet und bahnbetriebliches Verhalten (s.o.) abbildet. Eine detaillierte Beschreibung der Erzeugung bahnbetrieblicher Netzwerksimulationsmodelle in SUMO sowie die Integration von Warenströmen findet sich in [9].

Zur Abbildung der Störung durch Extremwetterereignisse wird ein Infrastruktur-basierter Modellierungsansatz gewählt, bei dem Störungen durch Nicht-Verfügbarkeit von Infrastruktur abgebildet werden. Infolgedessen reagiert die in SUMO hinterlegte heuristische Dispositionsroutine, die großräumige Umleitungen auf Basis mehrerer Parameter anstößt: Zunächst wird anhand einer Metrik die voraussichtlich durch die Umleitung entstehende Verspätung errechnet, für die ein Schwellwert als Entscheidungsgrundlage gewählt werden kann. Außerdem kann den Betriebsstellen eine Dispositionspriorität zugewiesen werden, die parametrisiert, ob bzw. wie wahrscheinlich Halte im Zuge der Umleitung entfallen dürfen (entfallende kleinere Unterwegshalte etwa bergen kleinere betriebliche und fahrgastseitige Auswirkungen im Vergleich zu großen Endbahnhöfen). Im Ergebnis liegt ein mikroskopisches Netzwerksimulationsmodell vor, das bahnbetriebliche Spezifika abbilden und die Auswirkungen von Störungen auf die Pünktlichkeit des Betriebs modellieren kann. Abbildung 1 zeigt einen Überblick der angewendeten Methode einschließlich der Modellerzeugung sowie der Analyse



4: Ankunftsverspätungen der Haltepunkte im ungestörten Basisszenario (links) und gestörten Szenario (rechts)

der Auswirkungen von Extremwetterereignissen. Das anschließende Kapitel 4 zeigt die Wirkweise des Modells anhand eines Anwendungsfalls im Seehafenhinterlandverkehr Bremerhaven.

4. Ergebnisse für den Seehafenhinterlandverkehr Bremerhaven

Das beschriebene SUMO Netzwerkmodell ist ausschnittsweise durch eine Bildschirmaufnahme der SUMO GUI in Abbildung 2 dargestellt. Die Benutzeroberfläche ermöglicht die graphische Visualisierung der Simulation, welche sowohl die aus OpenStreetMap (OSM) importierte Gleisinfrastruktur, als auch die nach dem zu Grunde liegenden Fahrplan verkehrenden Personen- und Güterzüge darstellt. Im vorliegenden Beispiel erfolgt eine Visualisierung nach Ankunftsverspätung, wobei grün für niedrige und rot für hohe Werte steht. Der gezeigte Ausschnitt liegt im Bereich des Seehafenhinterlandverkehrs Bremerhaven. Dabei wird die Strecke 1740 (siehe rotes Ausrufezeichen), die den Bahnhof Bremerhaven Kaiserhafen (HBHSK) in Richtung Süden mit Bremen und dem weiteren Landesinneren verbindet, gestört. Zur Ermittlung der bahnbetrieblichen Auswirkungen dieser Störung erfolgt zunächst eine Simulation des ungestörten Basisfalls: Dabei werden 10 Instanzen aus der von der DB Richtlinie 405 [14] vorgegebenen Verspätungsverteilung für simulationsbasier-

te Untersuchungen zufallsbasiert erzeugt und den Zügen entsprechende Einbruchsverspätungen zugewiesen. Infolgedessen weist das Modell eine dem Realbetrieb entlehnte operative Dynamik auf. Die Erzeugung des gestörten Szenarios erfolgt analog. Anschließend kann die Wirkungsanalyse auf Basis eines szenarienbasierten Vergleichs erfolgen.

Die Störung des Teilabschnittes zwischen Bremerhaven-Wulsdorf (HBWU) und Osterholz-Scharmbeck (HOSS) hat eine Sperrung der Gleise in beide Fahrtrichtungen zur Folge, für die eine Dauer von vier Stunden angesetzt wird. Die Umsetzung erfolgt anhand der closingRoute-Funktion aus SUMO. Infolgedessen werden Fahrzeuge, die über einen zuvor definierten Gleisabschnitt gefahren sind, je nach Simulationsparametrisierung entweder umgeleitet oder verkehren bis zum letzten möglichen Halt und fallen im gestörten Abschnitt aus. Im vorliegenden Fall werden ausschließlich die Güterverkehrszüge über Rothenburg (AROG) in Richtung Landesinneren umgeleitet. Die durchgeführte Untersuchung modelliert somit gleichzeitig den neuen elektrifizierten SGV-Bypass, den der Deutschlandtakt vorsieht [15] und kann Aufschluss über dessen Potenzial und Wirkweise geben. Die Personenverkehrszüge entfallen im gestörten Abschnitt, nachdem sich Umleitungen hier zeitintensiv und zu weiträumig darstellen. Abbildung 3 zeigt oben das ungestörte Basisszenario

und unten das Szenario mit implementierter Störung. Die Abbildungen stellen die durchschnittliche Ankunftsverspätung der Züge (in Minuten) über die gesamte Simulationsdauer (in Minuten) aller Züge dar, aufgegliedert in Regionalverkehr (RV), Fernverkehr (FV) sowie Güterverkehr (GV). Die Störung wurde von der fünften bis zur neunten Simulationsstunde realisiert, wie von den roten Linien dargestellt. Dabei wird deutlich, dass der Effekt der Störung sich aufgrund der Netzwerke des Ereignisses erst verzögert auswirkt. Eine Analyse je Zuggattung zeigt, dass im Seehafenhinterland insbesondere Güterzüge von der Störung betroffen sind, die in Folge der Umleitung Verspätung aufbauen. Zudem erfährt der Regionalverkehr vor allem durch die umgeleiteten Güterzüge auf der Umleitungsstrecke kapazitätsbedingt leichte Einschränkungen (die gestörten Regionalverkehrszüge selbst entfallen, sodass deren Einschränkung sich hier nicht niederschlägt). Auffällig ist des Weiteren, dass der Fernverkehr nur minimale Differenzen in der Ankunftsverspätung zwischen gestörtem und ungestörtem Zustand aufweist, da keine Fernverkehrsroute im Abschnitt der Sperrung liegt.

Abbildung 4 zeigt die räumlich-geographische Analyse der betrieblichen Störungsauswirkungen. Sie stellt die durchschnittliche Ankunftsverspätung aller Züge an allen Haltepunkten für den ungestörten (links) und gestörten Fall (rechts) der Simu-

lation dar. Dabei wird durch die Farbe der Kreise die jeweilige durchschnittliche Verspätung der Haltepunkte angegeben. Die Größe der Kreise quantifiziert die Anzahl der Zughalte.

Dabei zeigen sich insbesondere die Auswirkungen auf die Verspätung der Güterverkehrshalte, wie beispielsweise an Bremerhaven Kaiserhafen (HBHSK) und in Elsdorf (AED). Außerdem entstehen zusätzliche Verspätungen auf der Umleitungsstrecke 1300 in Richtung Bremervörde (ABV). Die gestörte Strecke selbst weist dagegen kaum Differenzen in den durchschnittlichen Ankunftsverspätungen auf, da während der Sperrung der Gleise die entsprechenden Halte ausfallen und nicht angefahren werden.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchung zeigt, dass eine mikroskopische Netzwerksimulation mit SUMO die Abbildung der Auswirkungen extremer Wetterereignisse auf den Bahnbetrieb ermöglicht. Am Beispiel des Seehafen-hinterlandverkehrs Bremerhaven werden Verspätungen und Betriebsstörungen quantitativ analysiert, wobei insbesondere Güterzüge durch Umleitungen betroffen sind. Die Simulation erlaubt eine differenzierte Bewertung verschiedener Szenarien und deren betriebliche Folgen. Im Ausblick bietet das Modell somit Potenzial zur Entwicklung und Ableitung gezielter Anpassungs- und Resilienzstrategien. Aufgrund seiner großen Flexibilität bietet das Modell auch Möglichkeiten zur Iteration des Störungsortes. Zukünftige Arbeiten könnten außerdem durch die Integration weiterer Störungsarten und die Kopplung mit anderen Verkehrsträgern vertieft werden. ●

DOI 10.61067/260831

Literatur

- [1] S. Greenham, E. Ferranti, A. Quinn, and K. Drayson, "The impact of high temperatures and extreme heat to delays on the London Underground rail network: An empirical study," *Meteorological Applications*, vol. 27, no. 3, 2020, doi: 10.1002/met.1910.
- [2] A. H. S. Garmabaki et al., "Climate Change Impact Assessment on Railway Maintenance," in *Book of Extended Abstracts for the 32nd European Safety and Reliability Conference*, M. C. Leva, E. Patelli, L. Podofillini, and S. Wilson, Eds., Singapore: Research Publishing Services, 2022, pp. 2913–2920. doi: 10.3850/978-981-18-5183-4_s25-01-126-cd.
- [3] C.-W. Palmqvist, N. O.E. Olsson, and L. Winslott Hiselius, "Some influencing factors for passenger train punctuality in Sweden," *International Journal of Prognostics and Health Management*, vol. 8, no. 3, 2017, doi: 10.36001/ijphm.2017.v8i3.2649.
- [4] E. A. Kostianai, A. G. Kostianoy, M. A. Scheglov, A. I. Karelov, and A. S. Vasileisky, "Impact of Regional Climate Change on the Infrastructure and Operability of Railway Transport," *Transport and Telecommunication Journal*, vol. 22, no. 2, pp. 183–195, 2021, doi: 10.2478/tjt-2021-0014.
- [5] M. Pregolato, A. Ford, C. Robson, V. Glenis, S. Barr, and R. Dawson, "Assessing urban strategies for reducing the impacts of extreme weather on infrastructure networks," *Royal Society open science*, vol. 3, no. 5, p. 160023, 2016, doi: 10.1098/rsos.160023.
- [6] K. Pyatkova et al., "Flood Impacts on Road Transportation Using Microscopic Traffic Modelling Techniques," in *Simulating Urban Traffic Scenarios*, M. Behrisch and M. Weber, Eds., in *Lecture Notes in Mobility*, Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 115–126. doi: 10.1007/978-3-319-33616-9_8.
- [7] S. O. P. Blume, M.-A. Cardin, and G. Sansavini, "Dynamic Disruption Simulation in Large-Scale Urban Rail Transit Systems," in *Complex Systems Design & Management*, G. A. Boy, A. Guegan, D. Kroh, and V. Vion, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 129–140. doi: 10.1007/978-3-030-34843-4_11.
- [8] C. Fikar, M. Gronalt, and P. Hirsch, "A decision support system for coordinated disaster relief distribution," *Expert Systems with Applications*, vol. 57, pp. 104–116, 2016, doi: 10.1016/j.eswa.2016.03.039.
- [9] J. Geischberger, N. Weik, and J. Pannek, "Reliability evaluation of rail freight transport processes – An agent-based approach combining microscopic rail simulation and freight network logistics," *Journal of Rail Transport Planning & Management*, vol. 37, p. 100558, 2026, doi: 10.1016/j.jrtpm.2025.100558.
- [10] P. A. Lopez et al., "Microscopic Traffic Simulation using SUMO," in *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, IEEE, 2018, pp. 2575–2582. doi: 10.1109/ITSC.2018.8569938.
- [11] German Aerospace Center (DLR) and others, "Documentation: Railways." 2026. Available: <https://sumo.dlr.de/docs/Simulation/Railways.html>
- [12] OpenStreetMap contributors, "OpenStreetMap." 2026. Available: <https://www.openstreetmap.org/>
- [13] GOVDATA, "Daten des Zielfahrplans Deutschlandtakt im Format railML TT." 2025. Available: <https://www.govdata.de/suche/daten/daten-des-zielfahrplans-deutschlandtakt-im-format-railml-tt>
- [14] DB NETZ AG, "Richtlinie 405 Fahrwegkapazität." 2022.
- [15] SMA and Partner AG, Intraplan Consult GmbH, VIA Consulting & Development GmbH in Kooperation mit TTS TRIMODE Transport Solutions GmbH im Auftrag des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr, "Abschlussbericht zum Zielfahrplan Deutschlandtakt Grundlagen, Konzeptionierung und wirtschaftliche Bewertung: Version: 3-00" 01. September 2022. Available: https://downloads.ctfassets.net/scbs508bajs/e70b2P0qqjFPmrt6FSXSxy/f2f48d117f4399a3b165cac6ebf4f179/2022-09-01_Abschlussbericht_Deutschlandtakt_3-00.pdf

Summary

Analysis of extreme weather events in rail transport using microscopic simulation

The study uses microscopic simulation with SUMO to analyse the impact of extreme weather events on rail operations in the Bremerhaven seaport hinterland. Disruptions caused by weather-related track closures lead to significant delays, particularly for diverted freight trains, whilst regional and long-distance services are less severely affected. Through its assessment of rail operations, the simulation model can support the development of targeted adaptation and resilience strategies.

INSERENTEN

DEVK Köln.....	U1, 79	Plasser & Theurer GmbH, Wien.....	U2
DVV Media Group GmbH, Hamburg..	U3, U4, 19, 47, 51, 59, 68, 69, 71, 75, 92	Zöllner Signal GmbH, Kiel.....	83, 87
HYPERION Verwaltung GmbH, Vastorf.....	67	Dieser Ausgabe liegt eine Beilage der Bauakademie Biberach bei.	
PJ Messtechnik GmbH, Graz.....	9		