

# Modellierung von Störungen in der Eisenbahnbetriebswissenschaft – Stand der Technik und aktuelle Entwicklungen

Eisenbahnbetriebswissenschaftliche Methoden haben die Modellierung der systemischen Wirkung von Planungsentscheidungen zum Ziel. Ein wesentlicher Aspekt ist die Berücksichtigung von Störungen, welche Rückschlüsse auf die Qualität und Robustheit des Angebots erlauben. Die Abbildung von Störereignissen in unterschiedlichen Verfahren wird im Beitrag untersucht und vor dem Zielbild einer robusten Infrastrukturplanung diskutiert.



## 1. Einleitung

Störungen und ihre Auswirkungen sind ein unvermeidlicher Bestandteil der Betriebsführung in geplanten Verkehrssystemen. Um später eine gute Servicequalität erreichen zu können, ist die Berücksichtigung von Abweichungen vom Regelbetrieb ein wesentlicher Aspekt der Planung und Konzeptionierung von Infrastruktur und Verkehrsangebot. In eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Methoden, welche die Analyse und Bewertung von planerischen Grundsatzentscheidungen zum Ziel haben, kommt der Modellierung von Störungen daher eine wichtige Rolle zu.

Der Begriff der Störung beinhaltet eine Vielzahl von Aspekten und reicht von der Berücksichtigung kleinerer, häufig auftretender betrieblicher Abweichungen bis hin zum Management gravierender Ereignisse mit überregionaler Tragweite. Eine

Eine robuste und resiliente Infrastruktur muss es erlauben, verschiedenen Störszenarien mit ihren spezifischen Anforderungen effektiv zu begegnen.



robuste und resiliente Infrastruktur muss es erlauben, verschiedenen Szenarien mit ihren spezifischen Anforderungen effektiv zu begegnen. Vor diesem Hintergrund wird im vorliegenden Beitrag eine Bestandsaufnahme der Möglichkeiten und Limitierungen der Störungsmodellierung in eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Methoden für die Infrastruktur- und Angebotsplanung vorgenommen. Neben den aktuell bei der DB Netz AG verwendeten, zertifizierten Verfahren werden Methoden der Netz- und Verkehrsplanung sowie aktuelle Entwicklungen in der Forschung im In- und Ausland beleuchtet.

## 2. Betrachtete Störungsszenarien und eisenbahnbetriebswissenschaftliche Methoden

In Abhängigkeit von den betrachteten Betriebs- bzw. Störfällen ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an das System sowie die Modellierung. In der nachfolgenden Diskussion werden drei unterschiedliche, für die betriebliche Praxis relevante Betrachtungsfälle unterschieden:

(1) Singuläre Störereignisse von großer Tragweite: Hierunter werden Störereignisse wie Stellwerksausfälle oder wetterbedingte Effekte gefasst, welche mit regionalen oder überregionalen Verfügbarkeitseinschränkungen des Netzes einhergehen.



**Dr. Norman Weik**

Wissenschaftlicher Mitarbeiter  
Deutsches Zentrum für  
Luft- und Raumfahrt e.V.  
Institut für Verkehrssystem-  
technik, Braunschweig  
norman.weik@dlr.de

- (2) Szenarienbasierte Betrachtung von Störereignissen begrenzter Tragweite: Hierbei werden die Auswirkungen ausgewählter, zuvor definierter Störereignisse (wie beispielsweise Weichenausfälle, Haltezeitüberschreitungen aufgrund von Türstörungen o.ä.) auf lokaler Ebene betrachtet. Somit können die Kritikalität spezifischer Störereignisse analysiert, sowie Systemvarianten bezüglich eines Ensembles von Störszenarien vergleichend bewertet werden.
- (3) Gesamtheitliche Betrachtung des Störgeschehens: In diesem Fall soll die Angebotsqualität vor dem Hintergrund der systemimmanenten, regelmäßig beobachtbaren betrieblichen Abweichungen bewertet werden. Ziel ist weniger die Analyse des spezifischen Störgeschehens, sondern die Bewertung des Reaktionsvermögens sowie der Leistungsfähigkeit des Systems.

**Tabelle 1:** Typische Kenngrößen zur Quantifizierung betrieblicher oder verkehrlicher Störungsauswirkungen (eigene Zusammenstellung basierend auf [2, 3])

Singuläre Ereignisse großer Tragweite	Szenariobasierte Betrachtung von lokalen Störereignissen	Gesamtheitliche Betrachtung
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Erreichbarkeit</li> <li>■ Zahl betroffener Züge, Zugausfälle</li> <li>■ Durchführbare Transportleistung, Transportkapazität</li> <li>■ Beförderungszeit</li> <li>■ Verkehrliche Widerstände</li> <li>■ Unternehmerische und gesellschaftliche Kosten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Zahl betroffener Züge, Zugausfälle</li> <li>■ Pünktlichkeit, Verspätungen, Verspätungszuwachs</li> <li>■ Fahrzeitverlängerung</li> <li>■ (Rest-)Leistungsfähigkeit (bez. auf ein Level of Service)</li> <li>■ Fahrplanwiederherstellungszeit</li> <li>■ Betreiberkosten EVU/EIU</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Pünktlichkeit, Verspätungen, Verspätungszuwachs</li> <li>■ Leistungsfähigkeit (bez. auf ein Level of Service)</li> <li>■ Infrastrukturbezogene Behinderungen (räuml. Verortung von Verspätungen)</li> <li>■ Effektive Beförderungszeit, Beförderungszeitquotient</li> <li>■ Aufgegebene/gehaltene Anschlüsse</li> </ul>

Zur Quantifizierung der Störungsauswirkungen sind Kenngrößen weit verbreitet, welche sich einerseits auf das Störgeschehen selbst beziehen (z.B. Störungshäufigkeit oder Störbestehenszeit), sowie andererseits die qualitativen Einschränkungen des Betriebs sowie des Verkehrsangebots bewerten (z.B. Pünktlichkeit, Verspätungen, Transportkapazität, gesellschaftliche Kosten) [1, 2]. Mit Bezug zur Störungsmodellierung in eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Methoden sind insbesondere die letztgenannten Kenngrößen von Interesse; ein schematischer Überblick von für die jeweiligen Betrachtungsfälle typischen Kenngrößen ist in Tabelle 1 gegeben.

Von methodischer Seite werden die folgenden sechs Kategorien eisenbahnbetriebswissenschaftlicher Methoden beleuchtet:

- (Graphentheoretische) Netzwerkanalysemethoden
- Warteschlangenmodelle
- Datengestützte (statistische) Verfahren
- Fahrplanerische Verfahren
- Stochastische Verspätungspropagationsmodelle
- Simulationen der Betriebsführung

Die genannten Kategorien ergänzen und erweitern, basierend auf dem aktuellen Fachartikel von Besinovic [2], die in der Richtlinie 405 vorgestellten und bei der DB Netz AG aktuell eingesetzten Verfahrensklassen (vgl. [3, 4]) und berücksichtigen u.a. aktuelle Entwicklungen im Bereich der Fahrplanoptimierung und des maschinellen Lernens.

### 3. Berücksichtigung von Störungen im Rahmen eisenbahnbetriebswissenschaftlicher Methoden

Die Verfahren und die jeweils darstellbaren Störungsmodelle werden nachfolgend detailliert beschrieben.

**Netzwerkanalysemethoden** basieren auf den topologischen Netzwerkeigenschaften der Infrastruktur oder des Liniennetzes (vgl. [2, 5]). Sie sind nicht an den Verkehrsträger Bahn gebunden, sondern können ebenso gut zur Beschreibung anderer Modi oder intermodaler Angebote herangezogen werden. Entsprechende Methoden beruhen auf der graphentheoretischen Analyse des Netzwerkzusammenhangs und der durchführbaren Transportleistung. Störungen können über Änderungen der Topologie (Verfügbarkeit von Knoten und Kanten) oder Parameteränderungen (z.B. Geschwindigkeiten, Kapazitäten oder Nutzungseinschränkungen) berücksichtigt werden. Durch das Routing von Verkehrsströmen auf dem so adaptierten Graphen können Qualitätsänderungen in Form von geänderten Erreichbarkeiten und Widerständen sichtbar gemacht und ggf. eine Rückkopplung zur Nachfrage vorgenommen werden. Die Vorgehensweise ist u.a. geeignet für Vulnerabilitätsanalysen, die Planung von Baumaßnahmen, sowie um kritische Netzstrukturen und -elemente zu identifizieren (vgl. [6]).

Überwiegendes Einsatzgebiet ist die makroskopische netzweite Modellierung von Störungseffekten auf Basis von Reise- und Transportketten. Für die detaillierte Abbildung der Verspätungsübertragung zwischen Zügen und die mikroskopische Abbildung der Leit- und Sicherungstechnik sind entsprechende Ansätze weniger geeignet. Eine gute Übersicht entsprechender Analysemethoden für Verkehrsnetze wird in [5] gegeben.

**Warteschlangenmodelle** sind abstrakte Modelle der Verspätungsübertragung, welche vorwiegend in der Langfristplanung bei der Dimensionierung der Eisenbahninfrastruktur zum Einsatz kommen. Die Bedienzeiten entsprechen Mindestzugfolge- oder Gleisbelegungszeiten und werden explizit aus den mikroskopischen Sperrzeiten abgeleitet. Der Fahrplan wird

jedoch abstrahiert und es wird stattdessen von einem zufälligen Zugankunftsprozess ausgegangen. Eine explizite Abbildung von Verspätungen ist somit nicht möglich, anhand der resultierenden Wartezeiten oder -wahrscheinlichkeiten kann jedoch mittels eines an Betriebsdaten geeichten Level of Service die Infrastrukturkapazität bemessen werden (vgl. [3]). Eine direkte Betrachtung von Störungen ist im Rahmen der Verfahren gemäß Richtlinie 405 nicht vorgesehen, entsprechende Modellerweiterungen, welche die Berücksichtigung unterschiedlicher Systemzustände erlauben, sind jedoch möglich und wurden beispielsweise in [7] sowie [8] diskutiert.

**Datengestützte (statistische) Verfahren** beziehen sich vorrangig auf die Analyse von Ist-Prozessen. Auf Basis von Betriebsdaten können Zusammenhänge zwischen Störungen, Dispositionsmaßnahmen und Verspätungsentwicklung untersucht werden. Entsprechende Auswertungen bilden beispielsweise die Grundlage von KPI-basierten Auswertungen der Verspätungsursachen und des Infrastrukturzustands (vgl. [9]). Während in Richtlinie 405 in erster Linie statistische Methoden zur standardisierten Analyse, Parametrisierung und Auswertung des Betriebszustands dargestellt sind, so werden im Kontext des maschinellen Lernens statistische Verfahren inzwischen in prototypischen Anwendungen auch prädiktiv zur Prognose der Verspätungsentwicklung und zur Verbesserung von Dispositionsentscheidungen eingesetzt [10]. Auf Basis von Betriebsprozessdaten werden Modelle trainiert, welche zur Prognose und als Entscheidungsunterstützung im Realbetrieb eingesetzt werden können. Die Aussagequalität ist dabei maßgeblich von einem repräsentativen Training-Datensatz abhängig, sodass sich für die Analyse von grundlegenden Systemänderungen, wie sie beispielsweise in der Infrastruktur- und Netzplanung vorgenommen werden,

aufgrund mangelnder Trainingsdaten Einschränkungen ergeben. Die Kombination mit detaillierten Simulationen des Systemverhaltens (Digitale Zwillinge) zur Erzeugung der erforderlichen statistischen Datenbasis ist aktuell ein aktives Forschungsfeld.

Der **Fahrplanerstellung** mit den angrenzenden Themenfeldern Linien-, Umlauf- und Einsatzplanung (vgl. [11]) kommt insbesondere im Bereich der taktischen Planung zentrale Bedeutung zu. Während historisch unter der konstruktiven Methode vorrangig die Nachbildung des sequentiellen Fahrplanerstellungsprozesses verstanden wurde [3], sind Verfahren der mathematischen Optimierung im Bereich der Fahrplankonstruktion und Trassenbelegung inzwischen weit verbreitet [12]. Im Kontext der Störungsmodellierung sind insbesondere die Themenfelder „robuste

Optimierung“ sowie „Störfallprogrammerstellung“ hervorzuheben.

Bei der robusten Optimierung wird nach einem Fahrplan gesucht, der auch im Falle von Störungen der Eingangsparameter (z.B. Fahr- oder Haltezeitverlängerungen) zuverlässig funktioniert. Neben globaler Robustheit, welche die Durchführbarkeit des Fahrplans für die Menge aller möglicher Szenarien fordert, haben sich inzwischen probabilistische Konzepte (leichte Robustheit), bei denen die Konstruktionsbedingungen geringfügig bzw. für einen gewissen Anteil von Störszenarien verletzt werden dürfen, als zielführend erwiesen. Ein weiteres relevantes Konzept ist die Wiederherstellungs-Robustheit, welche die Robustheit von Fahrplänen an ihrer Fähigkeit bemisst, in Störfällen stabil zu bleiben und eine schnelle Rückkehr in den planmäßigen Betrieb zu erlauben. Für eine

Darstellung der unterschiedlichen Robustheitskonzepte siehe [13].

Die Erarbeitung von Störfallprogrammen ist ein verwandtes Planungsproblem, das die Definition optimierter Betriebsprogramme für konkrete Störszenarien zum Inhalt hat [14]. Ziel hierbei ist, während der Störbestehenszeit ein qualitativ möglichst hochwertiges Angebot aufrechtzuerhalten und andererseits nach Beseitigung der Störung möglichst schnell wieder in den Regelbetrieb übergehen zu können. Typisch für Notfallprogramme sind reduzierte Linienkonzepte, bei denen Zugläufe gebrochen werden, um Folgeausfälle aufgrund der Nicht-Verfügbarkeit von Personal oder Rollmaterial zu vermeiden. Für die Erstellung und Bewertung von Störfallprogrammen können ebenfalls Optimierungsverfahren genutzt werden.

**Tabelle 2:** Bewertung der Eignung eisenbahnbetriebswissenschaftlicher Verfahren für die Analyse von Störungen. Die Nummerierung der Betrachtungsfälle entspricht der Darstellung in Abschnitt 2 eigene Darstellung

	Netzwerkanalysenmethoden			Warteschlangenmodelle			Datengestützte Verfahren		
Eignung Betrachtungsfall	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
		✓	(✓)	✗	✗	(✓)	(✓)	✗	(✓)
Erläuterung	Hauptanwendungsgebiet: Vulnerabilitätsanalysen auf Ebene von (Teil-) Netzwerken. Grundsätzlich auch auf die lokale Anwendung übertragbar, allerdings ist die Modellierung sowie die Datengranularität bei lokalen Ereignissen, deren Auswirkungen im Wesentlichen durch das Störungsmanagement beeinflusst werden, oftmals nicht ausreichend. Gleiches gilt für die Abbildung des generellen Störgeschehens.			Standardverfahren nach RiL 405: Keine explizite Abbildung von Störungen, Verwendung einer generellen Ankunftsstatistik. Modellerweiterungen: Explizite Berücksichtigung unterschiedlicher Systemzustände und gesamtheitliche Betrachtung der effektiven Systemleistungsfähigkeit auf Basis von Ausfallstatistiken möglich.			Datengestützte Verfahren dienen insbesondere der Klassifikation und Analyse von Betriebsprozessdaten. Für die Untersuchung und Prädiktion großskaliger Störereignisse liegt aufgrund der Seltenheit dieser Ereignisse oftmals keine belastbare Datenbasis vor. Hauptanwendungsgebiet prädiktiver Verfahren ist die Bewertung und das Auffinden von Lösungsansätzen von komplex zu modellierenden Störungen.		
	Fahrplanerische Verfahren			Stochastische Verspätungspropagationsmodelle			Simulation der Betriebsführung		
Eignung Betrachtungsfall	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
	(✓)	✓	(✓)	✗	✗	✓	(✓)	✓	(✓)
Erläuterung	Hauptanwendungsgebiet: Szenarien- oder parametergestützte Analyse und Optimierung der Robustheit von Fahrplänen. Die gesamtheitliche Bewertung von Störungseffekten erfolgt im Umfang der Berücksichtigung der Störfälle. Die Störfallprogrammerstellung und Adaption von Liniennetzkonzepten hat für die Betrachtungsfälle (1) und (2) gleichermaßen Relevanz. Allerdings erfolgt die Darstellung typischerweise auf einer größeren makroskopischen Planungsebene.			Anwendungsgebiet: Modellierung der Verspätungspropagation auf Basis kalibrierter Modelle der Zugverspätungen zur Analyse der Betriebsqualität in Teilnetzen. Die szenariobasierte Adaption von Zugwechselwirkungen und des Netzwerks ist nicht vorgesehen, weshalb sich die Modellierung größerer Störungen schwierig gestaltet.			Simulative Verfahren sind grundsätzlich in der Lage, alle Formen von Störungen abzubilden. Einschränkungen ergeben sich durch den numerischen Aufwand sowie den Horizont der implementierten Dispositionsheuristiken. Die Modellgranularität muss auf die Problemskala abgestimmt sein. Andernfalls drohen unrealistische Lösungen oder Deadlocks. Die gesamtheitliche Betrachtung des Störgeschehens ist möglich, jedoch an die statistische Signifikanz der Stichprobe im Rahmen des Monte Carlo-Ansatzes gebunden.		

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für DLR /  
 Rechte für einzelne Downloads und Ausdrücke für Besucher der Seiten  
 genehmigt / © DVV Media Group GmbH

Während Optimierungsverfahren im Bereich der Fahrplanung meist auf einer Menge von Eingangsdaten oder Störszenarien beruhen, werden in **stochastischen Verspätungspropagationsmodellen** Störungen gesamtheitlich auf Basis von Wahrscheinlichkeitsverteilungen von Fahrzeiten oder Zugverspätungen betrachtet. Die STRELE-Methodik (vgl. [3]), welche aktuell in Deutschland zur Analyse der Streckenleistungsfähigkeit eingesetzt wird, ist ein Beispiel für ein vereinfachtes parametrisches Modell der Verspätungsübertragung zwischen Zügen, welches auf Mindestzugfolgezeiten sowie Verteilungen der Einbruchverspätungen und Pufferzeiten beruht. Neuere Ansätze ermöglichen die netz- oder fahrplanweite Betrachtung von Zugwechselwirkungen auf Basis von Aktivitätsgraphen, wobei Störungen durch die Verspätungsverteilungen der Züge und algebraische Operationen zur Abbildung der Verspätungsentwicklung und des Verspätungsübertrags modelliert werden. Ein Beispiel für ein im Betriebseinsatz befindliches Tool ist die Software OnTime, die beispielsweise von der SBB zur netzwerkweiten Pünktlichkeitsprognose eingesetzt wird [15].

Der Fokus entsprechender Modelle liegt auf der Abbildung typischer betrieblicher Situationen, seltene Extremereignisse werden durch die verwendeten Wahrscheinlichkeitsklassen schlecht wiedergegeben und stellen besondere Anforderungen an die Abbildung der wechselseitigen Zugabhängigkeiten und -reihenfolgen im Aktivitätsgraph. Im Rahmen der stochastischen Modellierung ergibt sich hierbei eine Überlagerung mit einem Entscheidungsproblem, dessen Komplexität durch geeignete Heuristiken reduziert werden muss.

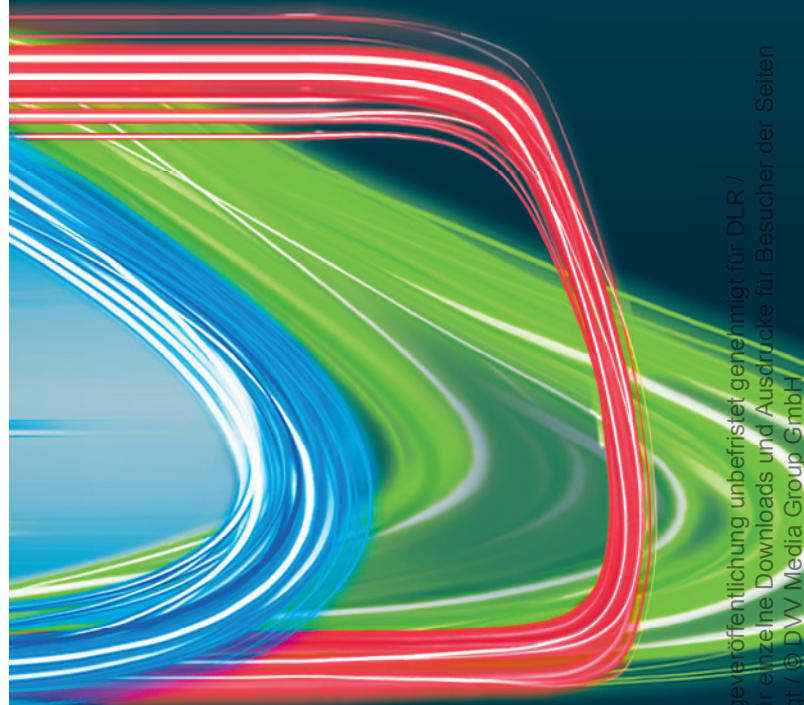
**Simulationen der Betriebsführung** versuchen, den realen Zugbetrieb bzw. dispositive Maßnahmen bestmöglich nachzubilden. „Klassische“ Betriebssimulationen in Software-Tools wie RailSys® beruhen auf einer mikroskopischen fahrdynamischen Simulation und heuristischen Regeln zur Disposition der Zugfahrten (vgl. [4]). Darüber hinaus sind auf mesoskopischer Ebene aktivitätsbasierte Simulationen sowie echtzeitfähige Dispositionsalgorithmen auf Basis mathematischer Optimierungsmodelle (re-scheduling) inzwischen Stand der Technik (vgl. [13]).

Simulationen beruhen generell auf einer szenariobasierten Betrachtung von Störungen. Die Szenarien können hierbei durch Monte Carlo-Sampling anhand von Verspätungsverteilung oder Ausfallhäufigkeiten generiert und anschließend vergleichend bewertet werden. Problematisch ist in diesem Zusammenhang die Tatsache, dass bei Multi-Skalen-Problemen, welche Störereignisse mit unterschiedlicher Häufigkeit und Tragweite beinhalten, seltene Störereignisse nur unzureichend repräsentiert werden. Der Erhalt von, in Bezug auf die Störereignisse, statistisch signifikanten Ergebnissen, stellt sich schwierig dar und bedarf einer Vielzahl von Systemrealisierungen bzw. geeigneter Rare-Event-Simulationstechniken.

Eine zusammenfassende Bewertung der Modellierungsoptionen für die drei im vorhergehenden Abschnitt erläuterten Betrachtungsfälle ist in Tabelle 2 dargestellt.



**InnoTrans 2022**  
20.–23. SEPTEMBER · BERLIN  
Internationale Fachmesse für Verkehrstechnik



**THE FUTURE  
OF MOBILITY**

**KONTAKT**

Messe Berlin GmbH  
Messedamm 22 · 14055 Berlin  
T +49 30 3038 2376  
innotrans@messe-berlin.de

#### 4. Ausblick auf ein Planungswerkzeug für eine resiliente Infrastruktur

Abschließend wird mit Blick auf die obige Diskussion eine mögliche Vorgehensweise für das Resilienz- und Robustheitsmanagement des Systems Bahn skizziert. Ziel muss es sein, dass neben der Auflösung kapazitiver Restriktionen auch die Resilienz der kritischen Infrastruktur durch geeignete Maßnahmen gesteigert wird. Infrastruktur- bzw. angebotsseitig umfasst ein solcher Prozess aus Sicht des Autors drei relevante Punkte:

1. Adressierung der Netz vulnerabilität/ Ausweis von Umleitungsrouten und Nachweis der Umleitungskapazität und des Rest-Serviceangebots.
2. Lokale Ausbaumaßnahmen mit dem Ziel der Resilienzsteigerung auf Strecken-, Knoten- sowie Teilnetzebene basierend auf der Identifikation routen- oder fahrplanerisch besonders kritischer Systemkomponenten. Die Machbarkeit von reduzierten Betriebsprogrammen (Störfallprogrammen) ist dabei zu berücksichtigen.
3. Gewährleistung der Angebotsrobustheit gegenüber betrieblichen Abweichungen.

Während die Punkte 1) und 3) bereits umfassend diskutiert und durch verschiedene Methoden adressiert werden, ergibt sich in Punkt 2) Ergänzungsbedarf. Aus infrastrukturplanerischer Sicht besteht hier die Schwierigkeit, dass Ausbaumaßnahmen mit dem Ziel der Resilienzsteigerung in der Kosten-/Nutzen-Bewertung nur schwer zu rechtfertigen sind, da aktuell verwendete Methoden Maßnahmen zur

Prävention von Störungswirkungen nicht adäquat berücksichtigen. Ein Verfahren, welches die Lücke zwischen der gesamtgesellschaftlichen Bewertung der Zuverlässigkeit (3) sowie der dezidierten Berücksichtigung von größeren Verfügbarkeitseinschränkungen (1) schließt, sollte sich dabei aufgrund ihrer Flexibilität (vgl. Tabelle 2) vorrangig auf eine Kombination von simulativen Verfahren sowie Verfahren der Fahr- und Linienplanung stützen.

Wesentlich für eine zu entwickelnde Methodik erscheint hierbei:

1. Die Definition zielführender Störszenarien sowie die Lösung des Multi-Skaleneffekts, der sich aus der Überlagerung von betrieblichen Abweichungen und Störungseffekten ergibt.
2. Die Berücksichtigung des Störfallmanagements und möglicher reduzierter Betriebsprogramme.
3. Die Definition geeigneter qualitätsbezogener Auswertungskenngrößen zur Bewertung der Kritikalität von Störungen und der verbleibenden Angebotsqualität im Störfall.

Während für Teilaspekte bereits Lösungsvorschläge diskutiert wurden (vgl. z.B. die Forschungslinie zum Störfallmanagement an der TU Darmstadt [14], oder den sensitivitätsbasierten Ansatz zur Kritikalitätsbewertung durch den Autor [8]), so ist eine Gesamtlösung, welche den Resilienzaspekt für alle drei Betrachtungsfälle von Störungen in die Systemplanung integriert, aktuell nicht verfügbar und ein Thema zukünftiger Forschung. ●

#### Literatur

- [1] E. Grass und B. Scheier, „Resilienz von Schienenverkehrssystemen“, ETR – Eisenbahntechnische Rundschau, S. 36–39, Juni 2019.
- [2] N. Besinovic, „Resilience in railway transport systems: a literature review and research agenda“, Transport Reviews vol. 40 (4), S. 457–478, 2020.
- [3] DB Netz AG, „Richtlinie 405 – Fahrwegkapazität“, Frankfurt, Berlin, 2009.
- [4] T. Schaefer, „Optimierung der Kapazitätsnutzung bei der DB Netz AG“, Deine Bau, S. 6–13, Oktober 2020.
- [5] L.-G. Mattsson und E. Jenius, „Vulnerability and resilience of transport systems – A discussion of recent research“, Transportation Research Part A: Policy and Practice, vol. 81, S. 16–34, 2015.
- [6] BMVI Expertennetzwerk, „Verlässlichkeit der Verkehrsinfrastruktur erhöhen“, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Berlin, 2020.
- [7] M. Bär, K. Fischer und G. Hertel, Leistungsfähigkeit – Qualität – Zuverlässigkeit, Berlin: Transpress, 1988.
- [8] N. Weik, „Integrierte Modellierung von Leistungsfähigkeit und Infrastrukturverfügbarkeit“, ETR – Eisenbahntechnische Rundschau, vol. 69 (12), S. 28–31, 2020.
- [9] W. Gührs, „Lost Units: Analyse von Verspätungen im Bahnverkehr“, Deine Bahn, S. 12–15, Oktober 2019.
- [10] Bitkom, „Wie kann die KI helfen, bessere Dispositionsentscheidungen zu treffen?“, Berlin, 2020.
- [11] C. Liebchen, „Quo vadis Taktfahrplanoptimierung im Eisenbahnverkehr?“, ETR – Eisenbahntechnische Rundschau, S. 31–35, Januar/Februar 2017.
- [12] D. Pöhle, „Von Click & Ride zum digitalisierten Gesamtfahrplan“, ETR – Eisenbahntechnische Rundschau, S. 10–13, November 2019.
- [13] R. Lusby, J. Larsen und S. Bull, „A survey on robustness in railway planning“, European Journal of Operational Research, vol. 266 (1), S. 1–15, 2018.
- [14] A. Crespo Materna, „Dynamisches Störfallmanagement für S-Bau-Systeme“, ETR – Eisenbahntechnische Rundschau (ETR), S. 16–19, Oktober 2020.
- [15] T. Bükler, B. Franke, T. Graffagnino und H. Lobermeier, „OnTime – Netzweite Analyse der Fahrplanstabilität“, ETR – Eisenbahntechnische Rundschau, S. 36–40, Juni 2012.

#### Summary

#### Modelling of disruptions in the railway operations science – State-of-the-art and current developments

Railway operations science methods aim at modelling the systemic effect of planning decisions. An essential aspect is the consideration of disruptions which allow drawing conclusions on the quality and robustness of the service. In the article, the illustration of disruptions in different process levels is examined and discussed in relation to the objective image of robust infrastructure planning.

Aus infrastrukturplanerischer Sicht ergibt sich die Schwierigkeit, dass Maßnahmen zur Resilienzsteigerung in der Kosten-Nutzen-Bewertung nur schwer zu rechtfertigen sind.