

Resilienz – Definition für das System Bahn und Entwicklung einer Methodik zur Quantifizierung

Es wurde eine Methodik entwickelt, um Bahnsysteme systematisch im Hinblick auf ihre Resilienz zu untersuchen und im Folgeschritt gezielte Verbesserungen durch Ableitung wirksamer Maßnahmen vorzunehmen. So werden eine objektive Begründung und Entscheidungsfindung gefördert. Außerdem erlaubt der Ansatz Vergleiche zwischen unterschiedlichen Netzen und Betriebsmodellen als belastbare Grundlage für Benchmarking und Best-Practice-Analysen.



1. Ausgangslage und Motivation

Bahnsysteme werden regelmäßig durch Ereignisse herausgefordert, die zu einer erheblichen Einschränkung ihrer Funktions- und Leistungsfähigkeit führen können. Die Auslöser hierfür umfassen unter anderem komplexe Bauzustände, Extremwetterlagen, Cyberrisiken oder physische Angriffe. Ein vollständiger Schutz vor solchen Ereignisfällen ist aufgrund der Vielzahl möglicher Auslöser und Angriffspunkte nicht realistisch, sodass es nicht ausreicht, nur präventive Maßnahmen zur Verhinderung zu ergreifen. Zusätzlich müssen Möglichkeiten geschaffen und Fähigkeiten erlernt werden, um Ereignisse aktiv zu bewältigen. Dadurch rücken verstärkt Ansätze in den Fokus, die zur Resilienzsteigerung im Bahnsystem beitragen.

Die volkswirtschaftliche Relevanz einschränkender Ereignisse lässt sich am besten durch Praxisbeispiele aufzeigen. Im Jahr 2017 wirkte sich die Havarie einer Tunnelbaustelle bei Rastatt auf die Rheintalbahn aus, was den nahezu vollständigen Ausfall eines zentralen europäischen Güterverkehrskorridors über mehrere Wochen bedeutete. Mangelnde internationale Koordination sowie fehlende Notfallkonzepte führten dazu, dass die theoretisch im Netz bereitstellbare Umleitungskapazität nur zu einem Teil tatsächlich genutzt werden konnte. Die resultierenden Wertschöpfungsverluste werden auf rund zwei Milliarden Euro geschätzt, der Großteil davon traf

Unternehmen der Bahnlogistik und ihre Kunden in der Wirtschaft [1]. Auch Schäden durch Extremwetterereignisse können enorme Ausmaße annehmen; allein für die vergangenen Jahre gehen sie europaweit in die Größenordnung mehrerer Milliarden Euro [2]. Werden derartige Ereignisse durch klimatische Veränderungen wahrscheinlicher, wächst auch das Schadenspotenzial zunehmend an.

Die Praxisbeispiele verdeutlichen, warum ein reiner Fokus auf die Leistungsfähigkeit im Regelbetrieb nicht ausreicht. Zukunftsfähige Bahnsysteme müssen auch unter veränderten Randbedingungen funktionsfähig bleiben, schnell auf die oben skizzierten Ereignisfälle reagieren und sich schließlich davon erholen können. Diese Fähigkeiten werden im Fachkontext als Resilienz bezeichnet und entwickeln sich zunehmend zu einem Schlüsselfaktor im Wettbewerb der Verkehrsträger.

Die Satzung des größten deutschen Eisenbahninfrastrukturbetreibers, der DB InfraGO AG, enthält im Rahmen der Gemeinwohlorientierung eine hohe Resilienz als Unternehmensziel, gemeinsam mit der Kapazität und der Qualität [3]. Die Bedeutung der Messung und Bewertung von Resilienz wird in Zukunft sowohl in Deutschland als auch in allen anderen Bahnsystemen weltweit steigen. Um eine belastbare Grundlage zur Quantifizierung der Resilienzsteigerung durch Maßnahmen zu schaffen, sind entsprechende Verfahren zu entwickeln. Aus diesen können zukünf-



Dipl.-Ing. Phillip Bradt
Projektingenieur
quattron GmbH
phillip.bradt@quattron.com



Fabian Schröter, M.Sc.
Projektingenieur
quattron GmbH
fabian.schroeter@quattron.com



Philipp Scherer, M.Sc.
Projektingenieur
quattron GmbH
philipp.scherer@quattron.com



Dr.-Ing. Thorsten Bükler
Geschäftsführender Partner
quattron GmbH
thorsten.bueker@quattron.com

tig auch Finanzierungsmechanismen für Maßnahmen abgeleitet werden.

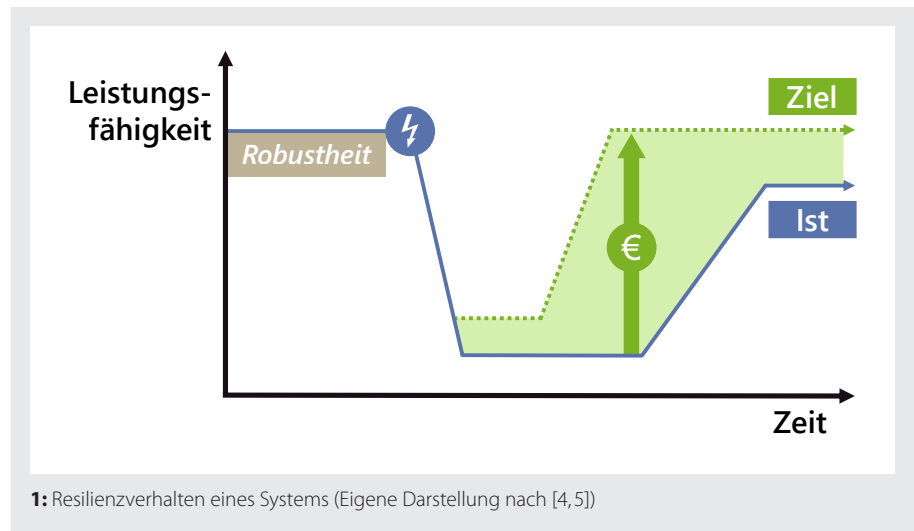
2. Grundlagen und begriffliche Abgrenzung

In der öffentlichen Debatte werden die Konzepte Robustheit und Resilienz teilweise vermischt. Für eine zielgerichtete Analyse und Ableitung von Maßnahmen in Bahnsystemen ist jedoch eine klare begriffliche Trennung erforderlich, da unterschiedliche Prioritäten und Ziele bestehen.

Robustheit beschreibt die Fähigkeit eines Systems, während des Betriebs auftretende Abweichungen von der Planung (oder sogar kleine Planungsfehler) in einem erwartbaren Ausmaß sowie kleine Störungen ohne signifikante Einschränkung der Leistungsfähigkeit zu verarbeiten. Dies erfolgt, indem die Eintrittswahrscheinlichkeit von Störungen oder deren unmittelbare Auswirkungen samt Fortpflanzung im System minimiert werden. Robustheit wirkt überwiegend präventiv, ein aktives Eingreifen ist nicht zwingend notwendig. Typische Instrumente zur Steigerung der Robustheit im Eisenbahnwesen sind Fahrzeitzuschläge und Pufferzeiten im Fahrplan, eine gewisse Redundanz von Anlagen oder Fahrzeugteilen, bauliche Sicherungen und standardisierte Betriebsabläufe.

Es gibt jedoch viele potenzielle Ereignisse, die nicht durch robuste Systemgestaltung abgefangen werden können und die zu einem Einbruch der Leistungsfähigkeit führen werden. In diesen Fällen gilt es, die Leistungsfähigkeit möglichst schnell zu stabilisieren und wiederherzustellen. Diese Fähigkeit wird als Resilienz bezeichnet. Das idealisierte Resilienzverhalten eines Systems und den Nutzen einer hohen Resilienz zeigt Abbildung 1.

Kleine Störungen und betriebliche Schwankungen können durch eine robuste Systemgestaltung abgefangen werden. Tritt ein Ereignis ein, welches einen Einbruch der Leistungsfähigkeit verursacht, werden aktive Eingriffe zur Wiederherstellung erforderlich und die Resilienz des Systems kommt zum Tragen. Resilient ausgestaltete Systeme sind in der Lage, Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit zu begrenzen sowie eine zügige Wiederherstellung eines stabilen Zustandes zu ermöglichen. Der Fokus der Konzepte Robustheit und Resilienz unterscheidet sich also. Gleichzeitig sind die Themen verwandt, sodass eine integrierte Betrachtung den größten Mehrwert bietet.



Eine Quantifizierung der Resilienz und eine Ableitung und Bewertung von Maßnahmen zur Steigerung der Resilienz sind mit diesen Grundlagen ohne die Betrachtung konkreter Ereignisfälle nicht möglich. Um eine davon unabhängige, allgemeine Betrachtung zu ermöglichen, wird als Ausgangspunkt zunächst eine vertiefte Definition der Resilienz vorgestellt.

3. Definition von Resilienz in Bahnsystemen

Aufbauend auf den beschriebenen Grundlagen wird eine prägnante, auf das Eisenbahnwesen und seine spezifischen Herausforderungen ausgerichtete Definition von Resilienz erarbeitet. Diese Definition ist in Abbildung 2 dargestellt. Sie enthält sechs Bestandteile, welche nachfolgend erläutert werden.

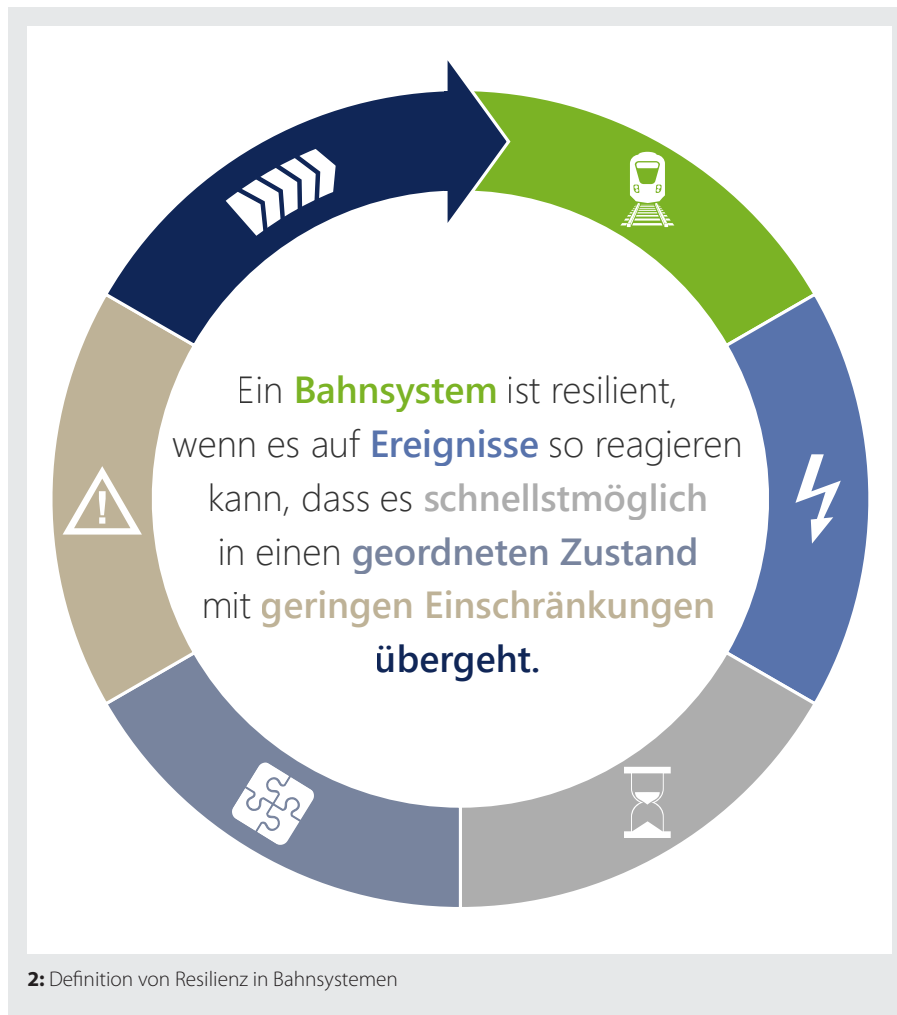
Das Bahnsystem wird für die Betrachtung der Resilienz in die Komponenten Infrastruktur, Fahrzeuge, Anlagen, Fahrplan, System- und Betriebssteuerung sowie Regelwerke und Prozesse unterteilt. Die sechs Komponenten werden zunächst als gleichwertig betrachtet und isoliert untersucht. Durch erhebliche Wechselwirkungen zwischen den Komponenten sind diese Betrachtungen am Ende der Untersuchung zusammenzuführen, um zielführende Ergebnisse zu erhalten. Steigerungen der Resilienz können durch Maßnahmen in einer oder in mehreren Komponenten erzielt werden.

Den Ausgangspunkt für einen Resilienzfall stellt stets ein besonderes Ereignis dar, welches das Bahnsystem trifft und eine Einschränkung verursacht. Ereignisse können sowohl systemintern (z. B. technische Störungen) wie extern (z. B. Unwetter) auftreten.

Der Grad der Unvorhersehbarkeit variiert ebenfalls. Einige Ereignisse sind noch in gewissem Maße planbar (z. B. komplexe Bauzustände), auf den Großteil der Ereignisse trifft dies jedoch nicht zu. Wird eine flexible Reaktion des Systems erforderlich, sind Maßnahmen zu organisieren, welche schnellstmöglich umsetzbar sind und ihre Wirkung entfalten. Diese Maßnahmen sollen das System zurück in einen geordneten Zustand führen. Dabei kann es sich um den Ausgangszustand handeln oder um einen temporären, allgemein akzeptierten Ersatzzustand (z. B. Störfallkonzept). Dabei sollen den Akteuren im System möglichst geringe Einschränkungen kapazitiver, finanzieller, organisatorischer, ressourcenbedingter und zeitlicher Natur entstehen. Zur Wiederherstellung müssen ggf. Übergangsphasen durchlaufen werden. Lernprozesse und kontinuierliche Verbesserungen sind zentrale Elemente der Resilienz für das Eisenbahnwesen. Aus eingetretenen Ereignisfällen können Erkenntnisse gewonnen werden, wie das System noch besser auf zukünftige Ereignisse vorbereitet werden kann. Resilienz ist damit keine statische Systemeigenschaft, sondern ein dynamischer Prozess, der ständig weiterzuentwickeln ist.

4. Methodik zur Messung und Bewertung der Resilienz

Die erarbeitete Definition von Resilienz für das Eisenbahnwesen stellt die Basis für eine Methodik für die Quantifizierung und Bewertung von Resilienz und die Ableitung von resilienzsteigernden Maßnahmen dar. Ausgangspunkt hierfür ist die Einteilung des Bahnsystems in sechs Komponenten.



Je Komponente wurden verschiedene Messgrößen und Kennzahlen ermittelt, welche auf die Resilienz des Systems wirken. Während die Quantifizierbarkeit der Einflussgrößen für technische Parameter in der Regel gut umsetzbar ist, erfordern insbesondere organisatorische Faktoren pragmatische und teilweise qualitative Bewertungsansätze. Die Komponenten, ihr Einfluss auf die Resilienz und ausgewählte Einflussgrößen werden nachfolgend vorgestellt.

Die Gestaltung der betrieblichen Infrastruktur bestimmt maßgeblich die Flexibilität des Betriebs im Ereignisfall. Beispielsweise stiften redundante Weichenverbindungen und Abstellgleise im Regelbetrieb nur einen geringen Nutzen. Im Ereignisfall können sie jedoch eine signifikante Wirkung entfalten, insbesondere hinsichtlich des Herunterfahrens und Wiederanlaufens des Betriebs. Auch Überholgleise und Infrastruktur für den Gleiswechselbetrieb tragen dazu bei, Verkehrsströme unter Einschränkungen aufrechtzuerhalten.

Die Fahrzeuge in einem System beeinflussen dessen operative Reaktionsfähigkeit wesentlich. Homogene Fahrzeugflotten erleichtern etwa Disposition und Umlaufplanung. Hohe Transportkapazitäten von Fahrzeugen und schnelle Fahrgastwechsel unterstützen die Bewältigung von Nachfragespitzen, gerade auch im Ereignisfall. Komplexe Eisenbahnbetriebe mit zahlreichen verschiedenen Fahrzeugen und Eigenschaften müssen bei Vorfällen zusätzlich bedacht werden und erhöhen die Komplexität, bis das System wieder anlaufen kann.

Der Zustand und die Verfügbarkeit von Anlagen, darunter Leit- und Sicherungstechnik, Ingenieurbauwerke, Energieversorgung und Telekommunikation, wirken sich ebenfalls auf Handlungsoptionen im Ereignisfall und damit die Resilienz aus. Redundanzen im System sowie kurze Entstörzeiten tragen dazu bei, die Auswirkungen von technischen Störungen zu begrenzen.

Resiliente Fahrpläne zeichnen sich dadurch aus, dass sie im Ereignisfall einen ggf. reduzierten, dafür aber stabilen Betrieb

ermöglichen. Robustheitskomponenten wie Reserven vereinfachen dies, zentral sind definierte Ersatzkonzepte. Gleichzeitig soll der Fahrplan im Regelbetrieb möglichst effizient funktionieren und keine Kapazität verschwenden. Hierbei kann ein Zielkonflikt auftreten, für dessen Lösung verschiedene Interessen abzuwiegen sind. Analog zu den Fahrzeugen gilt, dass Komplexität und insbesondere eine Vielzahl unterschiedlicher Interessensträger im Ereignisfall zusätzliche Ressourcen binden und eine Entstörung des Systems verzögern.

Die Komponente der System- und Betriebssteuerung sorgt für die operative Umsetzung von Ersatzkonzepten. Entscheidenden Einfluss darauf nehmen qualifiziertes Personal, klare Entscheidungsstrukturen und die Verfügbarkeit geeigneter Steuerungsinstrumente. Insbesondere das Fehlen von wirkungsvollen Ersatzkonzepten hat negative Folgen auf andere Komponenten, selbst wenn diese resilient gestaltet sind.

Regelwerke und Prozesse wirken ebenfalls auf die Resilienz eines Systems. Regelwerke definieren Handlungsspielräume und Entscheidungslogiken im Ereignisfall. Klare Prozesse und (ggf. vordefinierte) eingeübte Abläufe ermöglichen schnelle Reaktionen und sichern die konsequente Umsetzung geplanter Maßnahmen. Durch mangelhafte Prozesse wird im Gegenzug die Möglichkeit gehemmt, eine hohe Resilienz der anderen Komponenten umzusetzen.

Hinsichtlich des Ansatzes der Einteilung in Komponenten ist hervorzuheben, dass diese in Wechselwirkung stehen und sich gegenseitig beeinflussen. Nur durch eine geeignete Abstimmung der einzelnen Komponenten aufeinander entstehen gesamthaft resiliente Systeme. Außerdem kann die Relevanz von Komponenten oder von einzelnen Einflussgrößen von der Zielsetzung der Untersuchung abhängen (z. B. allgemeines Benchmarking, Schwachstellenanalyse eines Verkehrsunternehmens oder Maßnahmenbewertung eines Infrastrukturbetreibers). Die Methodik ist daher nicht als starrer Rahmen zu verstehen, sondern kann als flexibles Werkzeug an besondere Anforderungen angepasst werden.

5. Anwendbarkeit der Methodik

Der entwickelte methodische Ansatz zielt darauf ab, die Resilienz von Eisenbahnsystemen strukturiert zu analysieren und gezielt weiterzuentwickeln. Dies erfolgt

über eine systematische Identifikation von Schwachstellen sowie die Ableitung wirksamer Maßnahmen in einem Gesamtsystemkontext. Darüber hinaus ermöglicht der Ansatz eine gezielte Priorisierung verschiedener Maßnahmen.

Ein Vorteil des Ansatzes liegt in seiner Übertragbarkeit auf unterschiedliche Märkte und Systeme. Durch die einheitliche Strukturierung der Einflussgrößen und ihrer Bewertung wird es möglich, internationale Vergleiche durchzuführen und die Resilienz verschiedener Netze und Betriebsmodelle systematisch gegenüberzustellen. Dies schafft eine fundierte Grundlage für Benchmarking und Best-Practice-Analysen.

Vor dem Hintergrund knapper finanzieller, personeller und infrastruktureller Kapazitäten unterstützt die Methodik auch dabei, Ressourcen dort einzusetzen, wo sie den größten Beitrag zur Erhöhung der Resilienz leisten. Damit wird ein Übergang von intuitiven zu systematisch begründbaren Entscheidungen ermöglicht.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Strategien zur Erhöhung der Resilienz stellen einen entscheidenden Erfolgsfaktor für zuverlässige und leistungsfähige Bahnsysteme und damit auch die zukünftige Wettbewerbsfähigkeit des Verkehrsträgers Schiene dar.

Ein zentrales Element des Resilienzbegriffs, welches ihn entscheidend von etablierten Konzepten wie der Robustheit abgrenzt, besteht in der Reaktionsfähigkeit des Systems auf unvorhersehbare Ereignisse.

Die vorgestellte Methodik zur Quantifizierung und Messung von Resilienz zeigt, dass Resilienz durch das Zusammenspiel aller Systemkomponenten entsteht. Als zentrale Komponenten wurden in diesem Zusammenhang die Infrastrukturgestaltung, die Fahrzeuge, der Fahrplan, die Anlagen, die System- und Betriebssteuerung sowie die Regelwerke und Prozesse identifiziert. Der methodische Ansatz schafft eine belastbare Grundlage, um Resilienz quantitativ zu bewerten. Darauf aufbauend können zielgerichtete Maßnahmen entwickelt werden, deren Wirkung systematisch nachweisbar ist.

Durch eine Kombination aus Analyse, Planung und kontinuierlichem Lernen/Trainieren lassen sich gezielte Verbesserungen der Resilienz vornehmen und das Systemverhalten in Ereignisfällen steuern. Die Definition und die entwickelte Methodik unterstützen so verschiedenste Akteure im System dabei, gezieltere Entscheidungen zu treffen und die Resilienz in ihrem Verantwortungsbereich und damit im gesamten System zu steigern. •

Literatur

- [1] Hanseatic Transport Consultancy: „Volkswirtschaftliche Schäden aus dem Rastatt-Unterbruch - Folgenabschätzung für die schienenbasierte Supply-Chain entlang des Rhine-Alpine Corridor 2017“, 2018. Verfügbar unter: https://erfail.eu/uploads/2018_April%20Studie-1524476846.pdf [Zugriff am 22.05.2026].
- [2] European Union Agency for Railways: „Rail Resilience to Climate Change - Impact of extreme weather events on the European railway system“, 2026. Verfügbar unter: <https://www.era.europa.eu/content/rail-resilience-climate-change#oe-content-paragraph-5541> [Zugriff am 22.05.2026].
- [3] Satzung der DB InfraGO Aktiengesellschaft (Fassung vom 14.05.2025), 2025.
- [4] Knoester, M.; Bešinović, N.; Afghari, A.P.; Goverde, R.M.P.; van Egmond, J.: „A data-driven approach for quantifying the resilience of railway networks“ – In: Transportation Research Part A 179 (2024).
- [5] Bešinović, N.: „Resilience in railway transport systems: a literature review and research agenda“ – In: Transport Reviews 40 (2020) 4.

Summary

Resilience – Definition for the railway system and development of a methodology for quantification

A methodology has been developed to systematically assess railway systems in terms of their resilience and, in a subsequent step, to implement targeted improvements by identifying effective measures. This promotes objective justification and decision-making. Furthermore, the approach allows for comparisons between different networks and operating models, providing a robust basis for benchmarking and best-practice analyses.

Your Stage. Your Pitch. Your Career.

EURAILPRESS CAREER BOOST AUF DER INNOTRANS 2026

Jobsuchende pitchten sich selbst in 90 Sekunden gegenüber Recruitern - It's a match!

Eurailpress
Career Boost
2026

23. September 2026
14.00 – 16.00 Uhr

Recruiting LAB
InnoTrans Campus
Halle 21E



Jetzt bewerben:
www.eurailpress.de/careerboost26

