

Resilienz von Schienenverkehrssystemen

Bahnnetze sind kritische Infrastrukturen und bedürfen daher eines besonderen „Schutzes“ vor externen Extremereignissen wie den vergangenen Stürmen „Xavier“, „Herwart“ und „Friederike“. Resilienz ist eine Eigenschaft, welche besonders im Hinblick auf derartige Witterungsextreme für den Schienenverkehr von Bedeutung ist. Sie beschreibt die Widerstands- und Anpassungsfähigkeit des Bahnbetriebs gegenüber Krisen jeglicher Art.



Einleitung und Betrachtung des Begriffs „Resilienz“

Der seit einigen Jahren vermehrt verwendete Begriff Resilienz hat seinen Ursprung in der Werkstoffkunde und wurde erstmals in der Psychologie ausführlich erforscht. Auch viele andere Disziplinen wie die Katastrophenforschung erkannten das Potential und die Notwendigkeit des Resilienz-Konzeptes. Resilienz-typische Aspekte sind das Vorausblicken und die Vorbereitung auf das Unerwartete, die richtige Reaktion während der Krise, wobei es hauptsächlich um den Erhalt der Grundfunktionen des Systems geht, sowie die möglichst schnelle Rückkehr in den Ursprungszustand.

Resilienz schafft Überlebensfähigkeit. Dies betrifft Systeme ebenso wie den Menschen. Sie wird insbesondere dann

benötigt, wenn unvorhersehbare Krisen auftreten. Der Begriff wird von dem lateinischen „resilire“ abgeleitet und bedeutet zurückspringen. [1] Seine Anfänge in der Psychologie beschäftigen sich mit der Widerstandsfähigkeit des Menschen. Dabei wird unter Resilienz die Fähigkeit von Menschen verstanden, Lebenskrisen unter Rückgriff auf persönliche und sozial vermittelte Ressourcen zu meistern und als Anlass für Entwicklung zu nutzen. [2] Resiliente Systeme sind dabei keinesfalls ausfallsicher. Sie unterscheiden sich von nicht-resilienten Systemen aber dadurch, dass sie über Strategien verfügen, „gefährliche Umstände zu vermeiden, Störungen zu erkennen, Schäden an Einzelbestandteilen zu minimieren und zu isolieren, ihren Bedarf an Ressourcen zu diversifizieren, auf Sparflamme zu funktionieren und sich nach einer Störung neu zu organisieren.“ [3]

Um nun auch im Bereich des Schienenverkehrs Anwendung zu finden, bedarf es zunächst einer spezifischen Definition, sowie einer Möglichkeit, die Resilienz eines Bahnsystems messbar zu machen.

Der Resilienz-Zyklus im Schienenverkehr

Einen besonders hohen Anspruch auf Resilienz haben kritische Infrastrukturen zur Versorgung der Menschen, zu welchen neben Energie, Wasser unter anderem auch Verkehrsinfrastrukturen wie das Bahnsystem gehören. [4] Diese sind maßgeblich für die Funktionalität einer Gesellschaft verantwortlich und müssen auch in kritischen Ausnahmesituationen zur Verfügung ste-



Evnika Grass M.A.

Wissenschaftliche Mitarbeiterin
Institut für Verkehrssystemtechnik, Abteilung Bewertung des Verkehrs
Evnika.Grass@dlr.de



Benedikt Scheier M.Sc.

Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Institut für Verkehrssystemtechnik, Abteilung Bewertung des Verkehrs
Benedikt.Scheier@dlr.de



hen. Welche Phasen ein resilientes System durchlaufen sollte, zeigt der Resilienz-Zyklus (vgl. Bild 1 [5]).

Mit der Phase Prepare beginnt der Zyklus. Hier geht es darum, Gefahren durch Warnsysteme zu erkennen und sich auf in Zukunft evtl. eintretende Ereignisse vorzubereiten. Vor allem werden Vulnerabilitäten und Risikofaktoren eines Systems identifiziert. In der Phase Prevent sollen die vorher festgestellten Risikofaktoren gemindert werden, um so etwaige Krisen zu verhindern. Kann eine Störung nicht abgewendet werden, so werden bei ihrem Eintritt anschließend mithilfe von Schutzmechanismen die möglichen Schadensausmaße begrenzt (Protect). Die darauffolgende Reaktion (Respond) ist der Umgang mit der eingetretenen Störung, welche sich darauf konzentriert, die Grundfunktionen eines

Systems aufrechtzuerhalten. In der letzten Phase Recover kehrt das System wieder in einen geregelten Betrieb zurück, bei welchem es sich auch um den Ursprungszustand des Systems handeln kann. Es gleicht bestehende Schäden aus und nutzt in der darauffolgenden Phase Prepare die Erfahrung aus der Störungssituation, um auf zukünftige vorbereitet zu sein. [5]

Im Schienenverkehr ist unter anderem das Störfallmanagement dafür zuständig, präventive und korrektive Maßnahmen in Bezug auf Störfälle zu ergreifen und das Bahnsystem betriebsbereit zu halten. [6] Häufig treten jedoch unvorhersehbare Ereignisse auf, welche sich dem Handlungsfeld des klassischen Störfallmanagements entziehen. Insbesondere Wetterereignisse wie die Stürme „Herwart“, „Xavier“ und „Friederike“ können nur relativ kurzfristig prognostiziert werden. Während bei Hochwasser z.B. durch gezielte Deichbrüche eine Bedrohung kritischer Infrastrukturen unter Umständen abgewendet werden kann, ist eine Verhinderung bei Stürmen nicht möglich. Um dennoch die wichtigsten Systemfunktionen erhalten zu können, ist eine Berücksichtigung des Resilienz-Ansatzes empfehlenswert.

Grundlegend für die Realisierung eines resilienten Bahnverkehrs ist die vollumfängliche Kenntnis der Begriffsbedeutung in Bezug auf den Schienenverkehr. Diese setzt bei folgender Begriffsdefinition an:

„Ein Bahnsystem ist resilient, wenn es vorbereitet ist auf unerwartete Ereignisse mit außergewöhnlichen Auswirkungen. Es kann auf diese so reagieren, dass die Grundfunktionen des Systems aufrechterhalten werden können und findet nach einem zuvor definierten Zeitabschnitt wieder in den Ursprungszustand zurück.“ [7]

Für die Erhaltung der Grundfunktionen eines Bahnsystems müssen diese zunächst individuell festgelegt werden. Dabei gilt die Gewährung der Sicherheit der Reisenden und des Personals als vorrangiges Ziel. [8] An nächster Stelle steht der Transport von Reisenden und Gütern, welches das Betriebsziel des Schienenverkehrs darstellt. [9]

Für das System Bahn können folgende beispielhafte Maßnahmen in den einzelnen fünf Phasen des Resilienz-Zyklus getroffen werden, um die Resilienz zu steigern:

- **Prepare:** Schaffung von Frühwarnsystemen, bspw. die echtzeitbetriebene Auswertung von Wetterprognosesystemen.
- **Prevent:** Vermeidung von Bau und Betrieb von Infrastrukturen in besonders

gefährdeten Bereichen, z.B. in hochwassergefährdeten Bereichen, um damit Risikofaktoren für den Eintritt eines Ereignisses zu reduzieren. Vegetationskontrolle entlang der Eisenbahnstrecken, um Böschungsbrände und herabfallende Äste oder Bäume auf Strecke/Oberleitung zu vermeiden.

- **Protect:** Schutzmechanismen, Ergreifen von betrieblichen Sicherheitsmaßnahmen (Fahren auf Sicht) bis hin zur Einstellung des Betriebs.
- **Respond:** Zeitnaher Einsatz einer Instandsetzungstruppe und Bereithaltung von zusätzlichem Personal und Fahrzeugen zur schnellen Wiederaufnahme des Betriebs.
- **Recover:** Aufräumarbeiten, Instandsetzung der Infrastruktur und Rückführung von Betriebsmitteln.

Einflussfaktoren und Indikatoren zur Messung von Resilienz

Ein erster Schritt in Richtung Optimierung der Reaktionsfähigkeit im Krisenfall ist die Bewertung des aktuellen Resilienz-Zustandes des jeweiligen Schienensystems. Neben der Identifikation von Resilienz-Kriterien sind Indikatoren zu definieren, um Resilienz messbar und bewertbar zu machen. Dies schafft Klarheit über die aktuellen Schwachstellen des Systems und eröffnet zugleich Handlungsoptionen zur Verbesserung der Resilienz. Resilienz ist eine Eigenschaft, die sich lediglich situationsbezogen bewerten lässt und stark von der Beschaffenheit und den Voraussetzungen des jeweiligen Systems, aber auch von der Intensität der Krise und der Reaktion auf eben diese abhängt. Eine Bewertung der Resilienz eines Schienenverkehrssystems ist deshalb von vielen Einflussfaktoren abhängig, welche in folgende Resilienz-Kriterien zusammengefasst werden können: [10]

- Robustheit
- Redundanzen: Ressourcen und Reserven
- Ressourceneffektivität und
- Reaktionsschnelligkeit

Jedes dieser Resilienz-Kriterien kann durch einzelne Einflussfaktoren beschrieben werden. Das Kriterium Robustheit trifft eine Aussage über die Widerstandsfähigkeit des Systems. Hier ist der Systemzustand im Regelbetrieb entscheidend. Um die Robustheit abschätzen zu können, helfen Fragen nach der Auslastung des Bahnsystems

und dem Ablauf der Betriebsfunktionen im Regelbetrieb. Ein Indikator zur Abbildung der Robustheit des Bahnsystems ist beispielsweise der Belegungsgrad. Ein hoher Belegungsgrad ist gleich einer hohen Auslastung der Infrastruktur, aber hinsichtlich der Betriebsqualität und des Vermögens, eingetretene Störungen abzumildern, hinderlich. Ein anderer Indikator für Robustheit kann der Bestand von Vegetation (Bäume, Sträucher) an der Infrastruktur sein, um das Gefährdungspotential für Strecke und Oberleitung zu beurteilen.

Reserven und Ressourcen stärken die Redundanz des Bahnsystems. Ausschlaggebend ist dabei beispielsweise die Anzahl von Alternativen für eine bestimmte Verbindung, die dem Schienenverkehrssystem im Krisenfall zur Verfügung stehen. Als Indikator kann hier die Anzahl der Alternativverbindungen in Relation zu der Anzahl der benötigten Alternativstrecken gewählt werden. Um die Güte der Alternativverbindung(en) bewerten zu können, sollte der Belegungsgrad und Fahrzeiten mit einbezogen werden, bei Güterzügen zusätzlich noch Achs- und Meterlasten. Des Weiteren sind hier u.a. die Verfügbarkeit von Ersatzbetriebsmitteln und -personal bedeutend. Durch den Einsatz von zusätzlichen Ressourcen können demnach Reserven gebildet werden, die die Resilienz des Systems steigern können, so lange sie effektiv eingesetzt werden.

Aufbauend auf den Kriterien Robustheit und Redundanzen ist die Ressourceneffektivität entscheidend für den richtigen Einsatz der Ressourcen und Möglichkeiten. Dabei geht es um Informationen, Finanzmittel, Technologien und ebenso um Betriebsmittel oder Personal. Ressourceneffektivität beginnt bereits bei der

Ein resilientes Bahnsystem ist in der Lage, auf unerwartete Ereignisse mit voraussichtlich krisenartigen Auswirkungen so zu reagieren, dass die Grundfunktionen des Systems aufrechterhalten werden können.



Schwachstellenerkennung. Schwachstellen werden priorisiert und je nach Bedarf durch gezielten Ressourceneinsatz behoben. Messbar wird dieses Kriterium durch Betrachtung des konkreten Nutzens der Handlung in der Krisensituation. Ein möglicher Indikator ist die tatsächlich (mehr) transportierte Anzahl an Personen/Gütern durch den Einsatz von zusätzlichen Ressourcen im Krisenfall.

Die Reaktionsschnelligkeit (oder auch Wiederherstellungszeit) fasst alle Maßnahmen durch den Zeitfaktor zusammen. Dabei wird die Zeit vom Eintreffen des Ereignisses bis zur Rückkehr des Bahnsystems in den Ursprungszustand oder einen adäquaten, geregelten Betrieb gemessen. Je schneller dieser erreicht wird, desto resilienter ist das Bahnsystem.

Bewertung der Resilienz

Anhand der folgenden Key Performance Indikatoren (KPI) kann eine vergleichende Bewertung von Resilienz-Maßnahmen innerhalb eines Bahnsystems vorgenommen werden:

- **Wiederherstellungszeit:** Zeit ab Störungseintritt bis zur Erreichung eines geregelten Betriebs oder des Ursprungszustands der Infrastruktur und des Betriebs
- **Verkehrsleistung:** Verkehrsleistung von Gütern und Personen während der Wiederherstellungszeit
- **Verkehrsleistungsrate:** Verkehrsleistung während der Wiederherstellungszeit in

Relation zur geplanten Verkehrsleistung ohne Störfall

- **Kosten:** Lebenszykluskosten der Resilienz-Maßnahmen und Betriebserschwerungskosten, die durch die Störsereignisse entstehen und durch die Resilienz-Maßnahmen verringert werden sollten.

Bild 2 stellt den Verlauf der Systemleistung über die Zeit zwei verschiedener Szenarien des Umgangs mit einer Störung dar:

- **Blaue Kurve der Systemleistung:** Der Bahnbetrieb wird bei Eintritt des Störsereignisses komplett eingestellt. Die Verkehrsleistung ist gleich null, aber der Betrieb geht frühzeitiger in den Ausgangszustand als im Vergleichsszenario möglich.
- **Rote Kurve der Systemleistung:** Der Betrieb wird – soweit es die Störung zulässt – aufrechterhalten. Dadurch ist die Verkehrsleistung vorerst höher, die Wiederherstellungszeit jedoch ebenfalls höher als im Vergleichsszenario.

Auf den ersten Blick erscheint der Verlauf der roten Kurve vorteilhaft, da auch während der Wiederherstellungszeit noch Systemleistung erbracht werden kann. Durch das frühzeitige Einstellen des Betriebs (blaue Kurve) ist jedoch garantiert, dass kein Zug auf der freien Strecke den Betrieb einstellen muss. Dies erhöht die Sicherheit der Reisenden und der Transportgüter. Des Weiteren müssen die Betriebsmittel we-

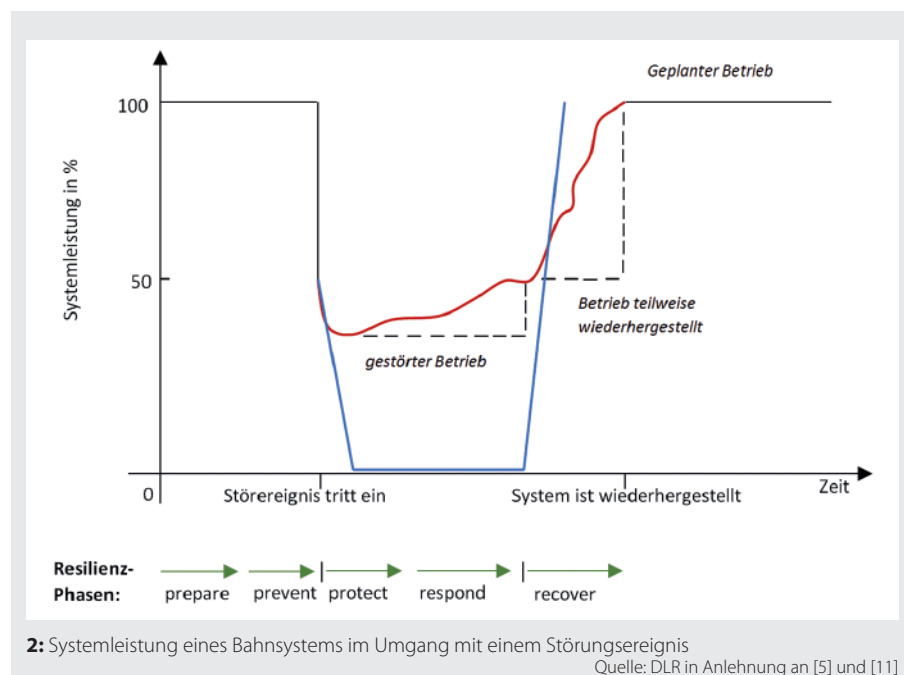
niger aufwändig zurückgeführt werden, sondern der Betrieb kann nach der Phase Recover wieder weiterlaufen.

Je nach zeitlichem und räumlichem Umfang der externen Ereignisse, kann es wirtschaftlich sein, durch den Einsatz von Ressourcen Reserven/Redundanzen aufzubauen, um den Betrieb und somit die Systemleistung weitestgehend weiterführen zu können. Somit ist es sinnvoll, bereits vor den nächsten Extremereignissen die Wirksamkeit von zusätzlich eingesetzten Ressourcen und/oder verschiedenen Strategien im Umgang mit eingetretenen Krisen zu ermitteln.

Um verschiedene Resilienz-Maßnahmen hinsichtlich ihrer Wirksamkeit bewerten zu können, können die quantifizierbaren KPI der Resilienz-Kriterien mittels Simulation des Eisenbahnsystems ermittelt werden. Dabei wird die Infrastruktur und der Eisenbahnbetrieb modelliert und simuliert. So kann bspw. untersucht werden, wie die Wirksamkeit von zusätzlichen Ressourcen bei einem bestimmten Störungsszenario ist. Ergänzende Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen runden die Bewertung ab. Um resilienzfördernde Maßnahmen berücksichtigen zu können, die über das System Bahn hinausgehen – z. B. die spontane Einrichtung von Schienenersatzverkehr – sollte ein Simulationswerkzeug verwendet werden, welches intermodale Reiseketten modellieren und simulieren kann. Die verkehrsträgerübergreifende Verkehrsflusssimulation SUMO (Simulation of Urban Mobility) ist für diese Aufgaben geeignet, da neben den Fahrzeugen unterschiedlicher Verkehrsträger (Autos, Busse, Straßenbahnen, Eisenbahnen) auch die Reisenden mit ihren jeweiligen Reiseketten abgebildet werden. [12] So lassen sich neben der Mengengerüste einzubringender Ressourcen auch die Auswirkungen der Störsereignisse und der Resilienz-Maßnahmen auf die Reisenden bzw. die Transportgüter untersuchen.

Fazit

Es zeigt sich, dass eine Übertragung des Resilienz-Konzeptes auf den Schienenverkehr insbesondere in Hinblick auf seine Kritikalität möglich und sinnvoll ist. Durch die Vorbereitung auf ungewisse, aber wahrscheinliche Ereignisse sowie durch eine optimale Nutzung von Ressourcen, wozu explizit auch die Zusammenarbeit mit anderen Verkehrsträgern gehört, wird die Widerstandsfähigkeit des Systems ge-



stärkt. Eine Analyse der aktuellen Resilienz ermöglicht die Entwicklung entsprechender Resilienz-Maßnahmen, welche anhand von KPI hinsichtlich ihrer Wirksamkeit unter Berücksichtigung der Betriebsziele miteinander verglichen werden können. Durch Anwendung des Resilienz-Konzeptes können somit Auswirkungen extremer Ereignisse möglichst gering gehalten werden.

Literatur

- [1] Langenscheidt, Internet: <https://de.langenscheidt.com/latein-deutsch/resilire>, abgerufen am 11.02.2019.
- [2] Teuber, S., Dicks, I. (2013): Neuer Modebegriff anstelle von Stressmanagement, Internet: https://www.bdu.de/media/18805/fachbeitrag_resilienz.pdf, abgerufen am 04.01.2019.
- [3] Zolli, A.; Healy, A. M. (2013): Die fünf Geheimnisse der Überlebenskünstler, 1. Aufl., München, 2013, S. 24.
- [4] Bundesministerium des Innern (2009): National Strategie zum Schutz Kritischer Infrastrukturen (KRITIS-Strategie), S. 5, Internet: https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/themen/bevoelkerungsschutz/kritis.pdf?__blob=publicationFile&v=3, abgerufen am 26.03.2019.
- [5] Scharfe, B.; Thoma, K. (2016): Resilienz – Ingenieurwissenschaftliche Perspektive, in: Rüdiger Wink (Hrsg.): Multidisziplinäre Perspektiven der Resilienzforschung, Wiesbaden 2016, S. 128f.
- [6] Oetting, A. (2014): Die Störungen im Griff, in: Eurailpress, ETR – Eisenbahntechnische Rundschau, Heft Nr. 4, 2014, S. 16 – 17.
- [7] Grass, Evnika: Bewertung von Resilienz im Schienenverkehr. Masterarbeit, Ostfalia – Hochschule für angewandte Wissenschaften und DLR – Institut für Verkehrssystemtechnik, 2018, Internet: <https://elib.dlr.de/124303/>, abgerufen am 04.01.2019.
- [8] DB Netze (2018): Mit jedem Unwetter geht die Lernkurve nach oben, in: DBNetznachrichten, Heft 4/18, S. 7.
- [9] Janicke, J. (2011): Systemwissen Eisenbahn, 1. Auflage, Berlin, 2011, S. 12.
- [10] Tierney, K.; Bruneau, M. (2007): Conceptualizing and measuring resilience: A key to disaster loss reduction, TR News, 250 (May-June), S.14 – 17.
- [11] Dorbritz, R.; Weidmann, U. (2012): Auswirkungen schwerer Störungen auf Bahnnetze, in: ZEVrail, Infrastruktur, Heft 6-7 (Juni-Juli), S. 212 – 224.
- [12] DLR (2019): Simulation of Urban Mobility (SUMO), Internet: https://sumo.dlr.de/wiki/Simulation_of_Urban_MObility_-_Wiki, abgerufen am 25.03.2019.

Summary

Resilience of railway transport systems

A resilient railway system is able to react on unexpected events and possible critical impacts in such a way that the basic functions of the system can be maintained. Due to provisional preparation, a flexible reaction to the critical situation is possible which means the railway system resists the crisis and will finally emerge stronger from it. Resiliency criteria like robustness, redundancy, resource efficiency and responsiveness can be considered as an evaluation basis.

It is important for the system resiliency that all mentioned criteria have to be fulfilled to the greatest possible extent. As no absolute satisfiability can be given, the following applies: the more the form of resiliency criteria approaches the demand for an emergency situation, the more resilient the system. The recovery time to regain standard operation or the original status is suggested to be the key performance indicator for measuring the resilience of a railway system.



Große Visionen und die praktische Umsetzung – Wo steht die LST?



**SAVE
THE
DATE**

19. Internationaler SIGNAL+DRAHT-Kongress



07. – 08. November 2019



Fulda, Maritim Hotel

Mehr Informationen unter:

www.eurailpress.de/veranstaltungen