

# Integrierte Modellierung von Leistungsfähigkeit und Infrastrukturverfügbarkeit

Für den nachhaltigen Betrieb der Eisenbahninfrastruktur sind Kapazitätsplanung und Anlagenmanagement gleichermaßen wichtig. Im Beitrag werden Ansätze und Chancen einer integrierten Betrachtung vorgestellt, die eine Bewertung der Kritikalität von Systemkomponenten sowie der Störungsresilienz von Gleislayouts erlaubt und eine weitere Analyseebene für Infrastrukturinvestitionen erschließt.



## 1. Einleitung

Eine hohe Zuverlässigkeit der Eisenbahninfrastruktur ist grundlegende Voraussetzung für die Gewährleistung marktgerechter und fahrgastfreundlicher Betriebsqualität. Während individuell einzelne Infrastrukturelemente hoch zuverlässig sind, so ist dennoch das Ausfall- und Instandsetzungsgeschehen auf Systemebene aufgrund der Vielzahl technischer Komponenten von entscheidendem Einfluss.

Im Zuge des Ausbaus und der Erneuerung des Schienennetzes ist die Schnittstelle zwischen Netzkapazität und Asset Management aktuell Gegenstand umfassender Diskussionen. Hierbei ist eine gewisse Bipolarität der Betrachtungsweise zu beobachten: Aus dem Blickwinkel des Asset Managements werden betriebliche Implikationen häufig in Form von akkumulierten, durch das Ausfallgeschehen bedingten Verspätungsminuten analysiert. Demgegenüber wird in der für die Infrastrukturdimensionierung typischen prädiktiven Sichtweise das Störgeschehen lediglich implizit in Form von zufällig ein-

gestreuten Urverspätungen berücksichtigt. Eine integrierte, vorausschauende Planung von Infrastrukturverfügbarkeit und Leistungsfähigkeit fehlt gegenwärtig, ist jedoch für den späteren Zugbetrieb von großer Bedeutung.

Im Rahmen der Dissertation des Autors [1] wurde vor diesem Hintergrund eine Methodik zur gemeinsamen Modellierung von Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit entwickelt, welche den Aspekt der Infrastrukturverfügbarkeit in die Leistungsfähigkeitsanalyse von Bahnanlagen integriert und somit die Bewertung der Kritikalität von Systemkomponenten mit direktem Bezug zur Betriebsqualität erlaubt. Die Grundlagen des Modells und die hierdurch erschlossenen Analysemöglichkeiten an der Schnittstelle zwischen Asset Management und Betriebsplanung werden nachfolgend vorgestellt.

## 2. Asset Management und Kapazitätsanalyse – ein Überblick

Asset Management und Kapazitätsanalyse stellen zwei komplementäre Bereiche der Infrastrukturplanung von Bahnsystemen dar, welche die Prognose des technischen Zustands einerseits und des betrieblichen Geschehens andererseits zum Inhalt haben.

Aufgabe des **Asset Managements** ist die Optimierung von Anlageninvestitionen unter Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus von der Planung und Inbetriebnahme, über Monitoring und Instandhaltung im Betrieb bis zum Ersatz [2]. Wesentliche Bestandteile sind hierbei die Zustandserfassung und -prognose, die Pla-



**Dr. Norman Weik**

Wissenschaftlicher Mitarbeiter  
Deutsches Zentrum für Luft-  
und Raumfahrt e.V., Institut für  
Verkehrssystemtechnik, Braun-  
schweig

norman.weik@dlr.de

nung von Wartungsmaßnahmen sowie die Kosten-/Nutzenbetrachtung (LCC-Analyse) von Investitionen.

Die **Kapazitätsanalyse** befasst sich mit der Untersuchung der Betriebsqualität, die auf einer gegebenen Infrastruktur für ein geplantes Betriebsprogramm oder Fahrplankonzept realisiert werden kann [3]. Sie beruht in Deutschland wesentlich auf sogenannten eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Untersuchungen. Hierbei werden bei der Konzeption oder Modifikation von Infrastruktur die nach Maßgabe einer definierten Betriebsqualität durchführbaren Zugfahrten bewertet.

Die in diesem Artikel behandelte Frage des Zusammenspiels zwischen Anlagenmanagement und Kapazität ist mit der strategischen Langfristplanung von Bahnanlagen verknüpft, welche angesichts der langen Erneuerungszyklen der Eisenbahninfrastruktur leicht mehrere Jahrzehnte in die Zukunft reichen kann. Vor diesem Zeithorizont erscheint die Gewährleistung einer gewissen Robustheit und Flexibilität der zugrundeliegenden Infrastruktur – auch über ein konkretes Fahrplankonzept hinaus – wünschenswert.

Eine integrierte Planung von Infrastrukturverfügbarkeit und Leistungsfähigkeit fehlt aktuell, ist jedoch für den späteren Betrieb von großer Bedeutung.



Methodisch werden in Deutschland neben Fahrplanstudien vorrangig analytische Modelle zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit bzw. der realisierbaren Betriebsqualität eingesetzt. So bilden die mit der Strele-Formel berechneten außerplanmäßigen Wartezeiten die Grundlage der Dimensionierung von Strecken [4], während für Fahrstraßenknoten und Gleisgruppen ein- bzw. mehrkanalige Warteschlangenmodelle auf Basis der Näherungsverfahren von Wakob [5] und Hertel [6] weitverbreitet sind. Die zugrunde liegende Methodik geht dabei maßgeblich auf langjährige Forschungsarbeiten in Aachen und Dresden zurück.

**3. Effektive Systemleistungsfähigkeit – Modellierungsvarianten**

Zur Integration des Infrastrukturzustands in die Warteschlangenmodellierung wurden bereits in den 80er Jahren in Dresden detaillierte Untersuchungen durchgeführt [7]. Im Wesentlichen wurden hierbei drei unterschiedliche Vorgehensweisen identifiziert:

- A) Separate Modellierung des Zuverlässigkeits- und des Leistungsfähigkeitsaspekts und numerische Verknüpfung der Kenngrößen
- B) Adaption der Eingangsparameter der Leistungsfähigkeitsmodellierung zur Berücksichtigung des Störgeschehens
- C) Integrierte Betrachtung des Leistungsfähigkeits- und Zuverlässigkeitsaspekts

Variante A) entspricht der weitverbreiteten szenariobasierten Betrachtung von Infrastrukturausfällen mit Zuordnung korrespondierender Leistungskennzahlen. Diese Modellierung kann als eine Erweiterung von Zuverlässigkeitsmodellen um Leistungsstufen gesehen werden und bietet den Vorteil der schlanken, unabhängigen Modellierung der beiden Aspekte. Andererseits besteht der Nachteil, dass eine Verknüpfungsfunktion zwischen Systemzuständen und Leistungsstufen definiert werden muss. Dies limitiert die Flexibilität des Modells, da die prädiktive Aussagequalität maßgeblich von der Gültigkeit der Zusammenhänge abhängt. Besonders herausfordernd stellt sich auch die Modellierung temporär instabiler Systemzustände sowie transientser Prozesse wie des Einschwingverhaltens von Störungen oder der Wiederherstellung des ursprünglichen Betriebszustandes dar.

Variante B) kann als eine Erweiterung von Leistungsfähigkeitsmodellen um den Zuverlässigkeitsaspekt angesehen werden. Im Rahmen der stochastischen Modellierung wird das Störgeschehen in die Verteilungen der Systemparameter wie z.B. der Mindestzugfolgezeiten integriert. Während auch hier eine einfache Adaption möglich ist, liegt die Schwierigkeit in der statistischen Repräsentation von Störungen. So üben individuelle, seltene Störereignisse oftmals keinen wahrnehmbaren Einfluss auf die Verteilung der Eingangsgrößen aus. Umgekehrt können jedoch auch besonders drastische Störfälle aufgrund ihrer katastrophalen Auswirkung auf den Zugbetrieb die statistischen Parameter der Eingangsgrößen unzulässig verschieben.

Die integrierte Modellierungsvariante C), bei der Kapazität und Zuverlässigkeit in einem gemeinsamen Modellhorizont betrachtet werden, hat den Vorteil, dass Leistungsfähigkeits- und Zuverlässigkeitsaspekt unmittelbar verknüpft sind. Neben Effekten wie lastinduzierte Störungen können insbesondere zeitabhängige Effekte wie der Aufbau von Verspätungen im Störfall oder die graduelle Wiederherstellung des normalen Betriebsgeschehens abgebildet werden. Nachteilig wirkt sich an dieser Vorgehensweise der numerische Aufwand durch die gemeinsame Modellierung von Stör- und Betriebsgeschehen aus.

**4. Integrierte Betrachtung von Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit**

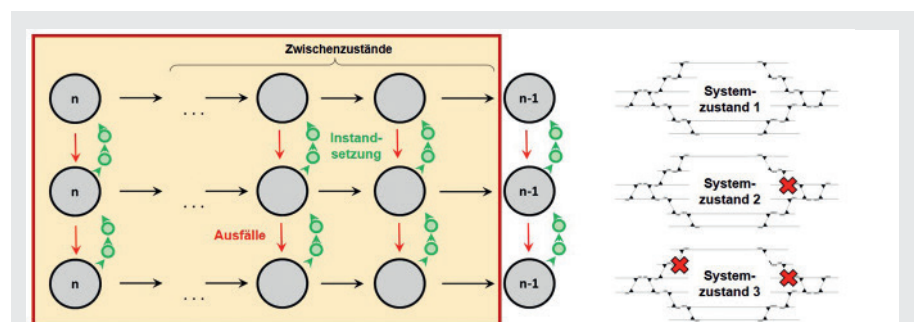
Aufgrund der angesprochenen Vorzüge wurde im Rahmen der Dissertation [1] ein integrierter Ansatz verfolgt. Grundlage des Modells bildet eine zustandsbasierte Systembeschreibung auf Basis von Markovketten, wie sie den aktuell in Deutschland in der Langfristprognose verwendeten Warteschlangenmodellen zugrunde liegen und

auch in der Zuverlässigkeitsmodellierung weitverbreitet sind.

Kern der Idee ist analog zur Beschreibung in [7] die Erweiterung des Bedienprozesses um eine zweite Dimension, welche unterschiedlichen Systemzuständen Rechnung trägt (vgl. Bild 1). Während die Übergänge in horizontaler Richtung den Leistungsfähigkeitsaspekt beschreiben (Abfertigung von Zugfahrten), entspricht die vertikale Richtung dem Infrastrukturdegradations- und -instandsetzungsprozess. Unterschiedlichen Systemzuständen werden hierbei unterschiedliche Abfertigungsraten zugewiesen, die Einschränkungen der Infrastrukturnutzung, Umrouten von Zügen, etc., Rechnung tragen. Da das zweidimensionale System weiterhin formal den Bedienprozess eines Warteschlangensystems abbildet, sind Leistungskenngrößen wie Wartezeit, Warteschlangenlänge oder Wartewahrscheinlichkeit von Zugfahrten (vgl. [3]) in gleicher Weise auch dem erweiterten Modell zu entnehmen. Innovative numerische Verfahren ermöglichen eine effiziente Behandlung sowie verteilungsbasierte Aussagen, die über die Bestimmung der mittleren Wartezeit oder Warteschlangenlänge hinaus (vgl. [3, 7]) Aussagen über die Überschreitungshäufigkeit eines definierten Level of Service erlauben.

Im Detail wurde in [1] eine weitgehend automatisierte Vorgehensweise auf Basis der folgenden Schritte entwickelt:

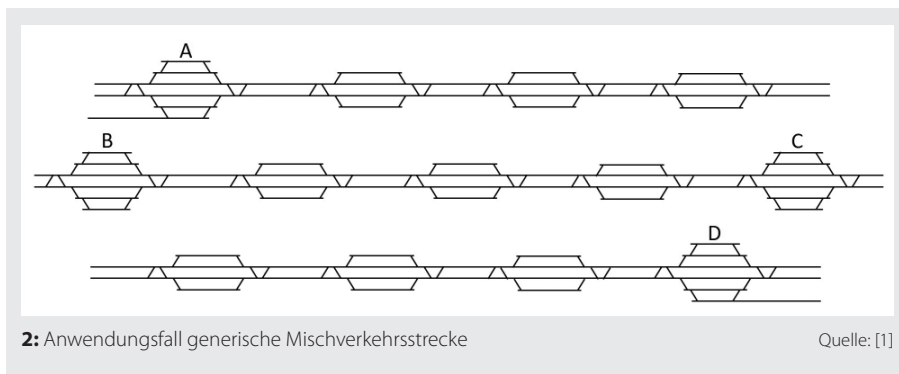
- Import von Infrastruktur und Zugdaten auf Basis im Bahnbereich gängiger Datenaustauschformate
- Definition der zu betrachtenden Störungen
- Berechnung der Bedienzeiten bei Ausfällen von Infrastrukturkomponenten (inkl. Berücksichtigung von simultanen Störungen)



1: Zustandsübergänge im integrierten Leistungs-/Zuverlässigkeitsmodell

Quelle: [1]

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



2: Anwendungsfall generische Mischverkehrsstrecke

Quelle: [1]

- Generierung des integrierten Leistungsfähigkeits-/Zuverlässigkeitsmodells
- Iterative Lösung des Modells mittels Krylovraum-Verfahren
- Analyse des Warteprozesses, Ableitung von Kennzahlen und Identifikation der betrieblichen Kritikalität von Infrastrukturelementen

### 5. Anwendungen im Rahmen der Strecken- und Knotenanalyse

Die Anwendung des integrierten Leistungsfähigkeits-/Zuverlässigkeitsmodells und der zugehörigen Analysemethoden werden nachfolgend auf Basis ausgewählter Szenarien vorgestellt.

#### 5.1. Anwendungsfall „Strecke“ – Betrachtung der effektiven Leistungsfähigkeit:

Zunächst wird eine generische zweigleisige Mischverkehrsstrecke des Typs M160 von ca. 130 km Länge untersucht (vgl. Bild 2). Das Betriebskonzept sieht 4 Zugarten (IC, RE, RB, GV) mit unterschiedlicher Haltepolitik und zulässigen Geschwindigkeiten zwischen 100 und 160 km/h vor. Die Verkehre beider Richtungen unterscheiden sich im Güterverkehrsrouting in den Randbetriebsstellen A und D, sodass zwei unter-

schiedliche, richtungsspezifische Systembelastungen resultieren.

Für die gegebene Infrastruktur werden die Effekte von Weichenausfällen auf die Streckenkapazität anhand dreier Szenarien mit unterschiedlicher Zuverlässigkeit der Elemente untersucht. Die beiden Streckengleise werden hierbei als zwei unabhängige Wartesysteme betrachtet, wobei – analog zum bei der DB Netz AG praktizierten Vorgehen bei höhengleichen Bahnsteigzugängen bzw. seitenfalsch liegenden Überholgleisen [3] – Behinderung durch den Gegenverkehr bei Nutzung des anderen Streckengleises in der Mindestzugfolgezeitberechnung berücksichtigt werden. Neben den bekannten Kapazitätskennzahlen Auslastung und mittlere Wartezeit ist in Tabelle 1 zusätzlich das Servicerisiko aufgeführt, welches die Überschreitungshäufigkeit des Level of Service ausweist [3].

Es zeigt sich, dass insbesondere die mittlere Wartezeit mit steigender Ausfallwahrscheinlichkeit der Weichen stark ansteigt, während das Servicerisiko einen deutlich moderateren Anstieg um einige wenige Prozentpunkte bei Berücksichtigung der Ausfälle gemäß Szenario 1 und 2 aufweist. Dies ist eine Konsequenz der massiven Qualitätseinbußen, die durch Ausfälle einiger besonders kritischer Weichen aus-

gelöst werden, welche beispielsweise zur Nicht-Nutzbarkeit eines Streckengleises zwischen zwei Betriebsstellen führen. Das arithmetische Mittel wird in signifikanter Weise durch diese Extremereignisse von besonderer Tragweite beeinflusst, während das Servicerisiko als verteilungsbasierte Kennzahl der Häufigkeit der entsprechenden Ereignisse besser Rechnung trägt. So hat die Kapazitätsanalyse üblicherweise nicht die Wahrung der Betriebsqualität im Falle katastrophaler betrieblicher Einschränkungen zum Ziel, sondern die Bewertung des Regelfalls. Das Servicerisiko erscheint daher als Dimensionierungsgrundlage für die Risikobewertung von Infrastrukturausfällen besser geeignet.

#### 5.2. Anwendungsfall „Knoten“ – Betrachtung der Kritikalität von Komponenten:

Neben der Betrachtung von Strecken stellt gerade die Anbindung und Verknüpfung von Strecken und Abfertigungsanlagen im Bahnhof aufgrund der Komplexität möglicher Gleislayouts und der Vielzahl von Feldelementen eine besondere Herausforderung dar. Eine grundlegende Entscheidung ist hierbei die Abwägung zwischen einer Reduktion der Störungshäufigkeit durch eine schlanke Infrastruktur und der zusätzlichen Flexibilität und Resilienz im Störfall, die mit zusätzlichen Weichenverbindungen einhergeht.

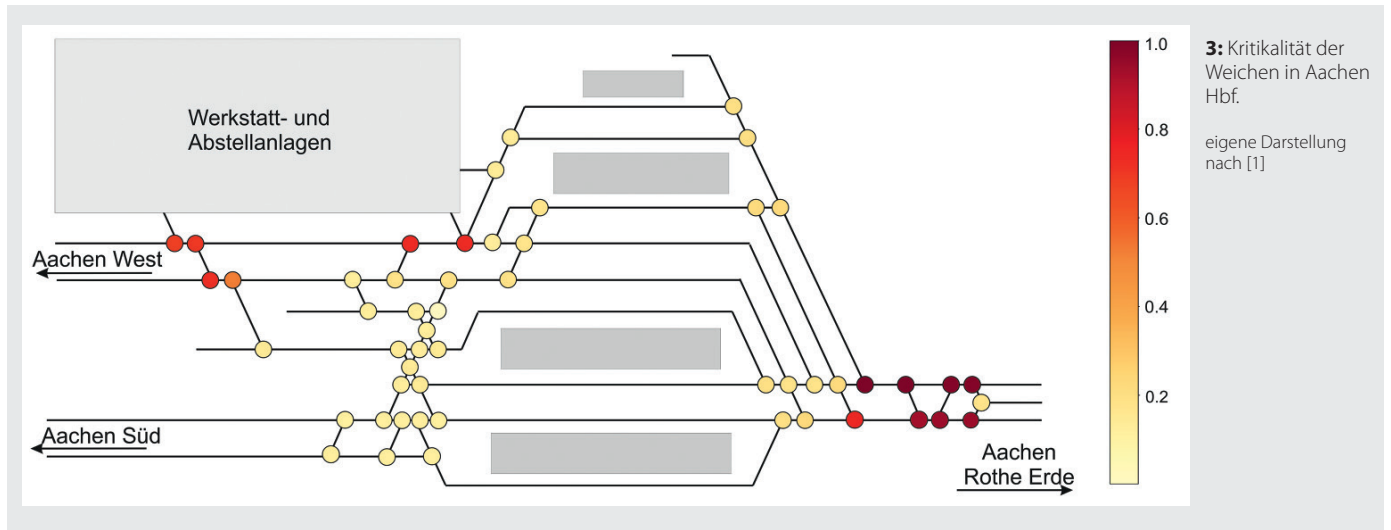
Aufbauend auf der Betrachtung der effektiven Systemleistungsfähigkeit im fehlerbehafteten System, kann der Einfluss spezifischer Ausfälle auf das Verhalten des Betrachtungsobjekts untersucht werden. Hierzu wird die Korrelation des Servicerisikos und spezifischer Weichenausfälle über den sogenannten Birnbaum-Index

$$I_v = \frac{\partial(\text{Servicerisiko})}{\partial(\text{Zuverlässigkeit Element } v)} \quad [8]$$

	Betriebsrichtung	Mittlere Auslastung	Mittlere Wartezeit	Servicerisiko
Referenzszenario (uneingeschränkte Verfügbarkeit)	Links-Rechts	63.4 %	5.4 min	29.9 %
	Rechts-Links	54.2 %	3.2 min	20.7 %
Szenario 1: Mittlere Zeit zw. zwei Ausfällen eines Elements (MTBF): 2 Jahre	Links-Rechts	63.9 %	5.8 min	30.6 %
	Rechts-Links	54.8 %	3.6 min	21.5 %
Szenario 2 MTBF: 1 Jahr	Links-Rechts	64.5 %	6.3 min	31.4 %
	Rechts-Links	55.5 %	4.0 min	22.3 %
Szenario 3 MTBF: 3 Monate	Links-Rechts	68.6 %	12.4 min	38.4 %
	Rechts-Links	60.6 %	9.5 min	29.7 %

Tabelle 1: Effektive Systemleistungsfähigkeit unter Berücksichtigung von Weichenausfällen Quelle: [1]

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



gemessen. Dieser gibt wieder, wie eine Änderung der Zuverlässigkeit von Einzelelementen sich auf die Gesamtzuverlässigkeit des Systems auswirkt.

Analog zur Vorgehensweise bei Strecken können analytische Ansätze zur Bewertung von Gleisanlagen im Bahnhofsbereich mit der vorgestellten Vorgehensweise um den Aspekt der Infrastrukturverfügbarkeit erweitert werden. Beispielhaft wird dies anhand einer Weichenkritikalitätsanalyse des Aachener Hauptbahnhofs unter Berücksichtigung von Teilausfällen für ein der Realität nachempfundenes Betriebskonzept verdeutlicht. Bild 3 gibt farbcodiert die Ergebnisse für die relative Kritikalität der Weichen, d.h. mit Bezug zum kritischsten Element, wieder.

Es zeigt sich, dass insbesondere die Weichen im Gesamtfahrstraßenknoten (GFK) in Richtung Aachen Rothe Erde besonders kritisch sind. Geringfügig geringere, jedoch ebenfalls hohe Bedeutung haben Ausfälle in Richtung Aachen West. Demgegenüber stellt sich die Anbindung nach Aachen Süd deutlich unkritischer dar. Diese Bewertung korreliert mit der jeweils über die entsprechenden Bahnhofsbereiche durchgeführten Zugzahl. So ist die Belastung des östlichen GFK am höchsten, während sich in Richtung Westen die Verkehre ungefähr im Verhältnis 1:4 auf die Strecke nach Belgien sowie die Strecke nach Mönchengladbach aufteilen. Ziel des Asset Managements, wie es in einer weitergehenden Analyse verfolgt werden kann, sollte im Sinne eines gezielten Mitteleinsatzes eine möglichst gleichmäßige Risikoaufteilung im Bereich des Bahnhofsknotens sein. Dies kann beispielsweise durch den Einbau von Kompo-

nenten höherer Zuverlässigkeit oder die Wahl der Wartungsstrategie erreicht werden.

**6. Ausblick**

Im Beitrag wurde aufgezeigt, wie eine integrierte Betrachtung von Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit zu einer zielgerichteten Bewertung der Infrastrukturkonzeption und des Infrastrukturbetriebs beitragen kann. Der Fokus liegt hierbei auf prädiktiven Aussagen im Zuge der Lang-

fristplanung und der hierfür gegenwärtig verwendeten analytischen Methodik. Die Vorgehensweise ist jedoch nicht hierauf beschränkt, sondern kann ebenso auf Zustandsprognosemodelle oder Simulationsmethoden übertragen werden, wobei für die prädiktive Betrachtung eine integrierte Modellierungsweise zur Abbildung von Wechselwirkungen zwischen Infrastrukturzustand und Leistungsfähigkeit zielführend erscheint.

**Literatur**

[1] N. Weik, Long-term capacity planning of railway systems – A stochastic approach capturing infrastructure unavailability, Dissertation, RWTH Aachen, 2020.  
 [2] P. Veit, Instandhaltung und Anlagenmanagement des Fahrwegs, in Handbuch Eisenbahninfrastruktur, Berlin Heidelberg, Springer, 2013.  
 [3] DB Netz AG, Richtlinie 405 – Fahrwegkapazität, Frankfurt, Berlin, 2009.  
 [4] W. Schwanhäuser, Die Bemessung der Pufferzeiten im Fahrplangefüge der Eisenbahn, Dissertation, RWTH Aachen, 1974.  
 [5] H. Wakob, Ableitung eines generellen Wartemodells zur Ermittlung der planmäßigen Wartezeiten im Eisenbahnbetrieb unter besonderer Berücksichtigung der Aspekte Leistungsfähigkeit und Anlagenbelastung, Dissertation, RWTH Aachen, 1985.  
 [6] G. Hertel, Exakte Lösung zur Berechnung der Wartegleiszahl vor im Einrichtungsbetrieb befahrenen Strecken, Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Verkehrswesen Dresden, 31, 1984.  
 [7] M. Bär, K. Fischer und G. Hertel, Leistungsfähigkeit - Qualität – Zuverlässigkeit, Berlin, Transpress, 1988.  
 [8] Z. Birnbaum, On the importance of different components in a multicomponent system, Technical Report No. 54, Laboratory of Statistical Research, Washington University Seattle, 1968.

Die Gewährleistung einer gewissen Robustheit und Flexibilität der Infrastruktur – auch über ein konkretes Fahrplankonzept hinaus – ist wünschenswert.

**Summary**  
**Integrated modelling of capacity and infrastructure availability**

For the operation of railway infrastructure, a targeted capacity planning as well as a sustainable plant management are equally relevant. In the present article, approaches and chances of an integrated consideration are examined. It is shown how a joint modelling of plant condition and operational quality can be used to evaluate the criticality of infrastructure components and how the capacity analysis can be supplemented by the factor of operational resilience.