

Lars Schnieder

Communications- Based Train Control (CBTC)

Komponenten, Funktionen
und Betrieb

4. Auflage

FLASH-
CARDS
INSIDE

MOREMEDIA



Springer Vieweg



Communications-Based Train Control (CBTC)

SPRINGER NATURE

FLASH-
CARDS
INSIDE

SN Flashcards Microlearning

Schnelles und effizientes Lernen mit digitalen Karteikarten – für Arbeit oder Schule!

Diese Möglichkeiten bieten Ihnen die SN Flashcards:

- Jederzeit und überall auf Ihrem Smartphone, Tablet oder Computer **lernen**
- Den Inhalt des Buches lernen und Ihr Wissen **testen**
- Sich durch verschiedene, mit multimedialen Komponenten angereicherte Fragetypen **motivieren lassen** und zwischen drei Lernalgorithmen (Langzeitgedächtnis-, Kurzzeitgedächtnis- oder Prüfungs-Modus) **wählen**
- Ihre eigenen Fragen-Sets **erstellen**, um Ihre Lernerfahrung zu **personalisieren**

So greifen Sie auf Ihre SN Flashcards zu:

1. Gehen Sie auf die **1. Seite des 1. Kapitels** dieses Buches und folgen Sie den Anweisungen in der Box, um sich für einen SN Flashcards-Account anzumelden und auf die Flashcards-Inhalte für dieses Buch zuzugreifen.
2. Laden Sie die SN Flashcards Mobile App aus dem Apple App Store oder Google Play Store herunter, öffnen Sie die App und folgen Sie den Anweisungen in der App.
3. Wählen Sie in der mobilen App oder der Web-App die Lernkarten für dieses Buch aus und beginnen Sie zu lernen!

Sollten Sie Schwierigkeiten haben, auf die SN Flashcards zuzugreifen, schreiben Sie bitte eine E-Mail an customerservice@springernature.com und geben Sie in der Betreffzeile **SN Flashcards** und den Buchtitel an.

Lars Schnieder

Communications-Based Train Control (CBTC)

Komponenten, Funktionen und Betrieb

4. Auflage

Lars Schnieder
ESE Engineering und Software-Entwicklung GmbH
Braunschweig, Deutschland

ISBN 978-3-662-68951-6 ISBN 978-3-662-68952-3 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-68952-3>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <https://portal.dnb.de> abrufbar.

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer-Verlag GmbH, DE, ein Teil von Springer Nature 2020, 2021, 2022, 2024

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Alexander Grün

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Wenn Sie dieses Produkt entsorgen, geben Sie das Papier bitte zum Recycling.

The background features a 3D architectural rendering of a modern train station. A blue and white train is stopped at a platform. The station has a white, angular roof structure. A blue beam of light with a Wi-Fi symbol at its end originates from a building in the background and points towards the train. The overall scene is clean and futuristic.

STADLER

INNOVATIVE SOLUTIONS FOR ALL TYPES OF RAILWAYS

Stadler Signalling offers tailor-made signalling solutions in the Mainline, Branchline, Light Rail Vehicle (LRV), Metro and Depot segments, as well as digital solutions and services to ensure efficient, digital and sustainable rail operations.

www.stadlerrail.com

Vorwort zur 4. Auflage

Jeden Tag nutzen Millionen Menschen den öffentlichen Personennahverkehr. Die Metropolen dieser Welt stünden ohne leistungsfähige Schienenverkehrssysteme jeden Tag vor dem Verkehrsinfarkt. Die vorhandene Schieneninfrastruktur stößt jedoch vielerorts an die Grenzen ihrer Kapazität. Der Schlüssel zu einer Steigerung der Leistungsfähigkeit städtischer Schienenverkehrssysteme liegt in ihrer Automatisierung. In den letzten Jahrzehnten haben weltweit immer mehr Städte in leistungsfähige Schienenverkehrssysteme investiert. In Deutschland wurde lange Zeit nicht in die Modernisierung von U- und Stadtbahnsystemen investiert. Die technologische Basis in den Städten ist daher oftmals veraltet und hat an manchen Orten die Grenzen ihrer technischen Lebensdauer bereits überschritten. In einigen Städten werden daher die Verkehrsunternehmen in den nächsten Jahren ihre Infrastruktur umfassend erneuern. Es sind also auch in Deutschland erhebliche Investitionen in die Erneuerung der signaltechnischen Infrastruktur von U- und Stadtbahnsystemen zu erwarten. Dieses Buch stellt die gültigen normativen Grundlagen hochautomatisierter Schienenverkehrssysteme dar. Die Darstellung in diesem Buch basiert auf meinen Erfahrungen in der Beratung von Verkehrsunternehmen sowie meiner praktischen Tätigkeit in der Prüfung von Bauunterlagen sowie der Durchführung von Prüfungen zur Inbetriebnahme von Zugsicherungsanlagen internationaler U- und Stadtbahnen. Mein Dank gilt den Experten der Systemhäuser Alstom, Hitachi, Siemens und Stadler. Ich habe hier in vielen Fachgesprächen ein vertieftes Verständnis der komplexen Zusammenhänge von CBTC-Systemen gewinnen können. Den folgenden Firmen und Betreibern danke ich für die freundliche Genehmigung zur Verwendung von Bilddateien in diesem Buch (Angaben in alphabetischer Reihenfolge):

- Alstom Transport Deutschland GmbH
- Deuta-Werke GmbH
- Frauscher Sensortechnik GmbH
- HASLER RAIL AG
- Huber + Suhner AG
- Lenord, Bauer & Co. GmbH
- PINTSCH GmbH

- Sitron Sensor GmbH
- Stadtwerke Verkehrsgesellschaft Frankfurt am Main mbH (VGF)
- VAG Verkehrs-Aktiengesellschaft Nürnberg
- VIA Consulting & Development GmbH

Ein persönlicher Dank für die vorliegende 4. Auflage dieses Buches gilt Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Nils Nießen. Er gab mir die Möglichkeit, im internationalen Studienprogramm Railway Systems Engineering an der RWTH Aachen ein eigenes Lehrangebot zu automatisierten Nahverkehrssystemen zu etablieren. Die Diskussionen mit den internationalen Studierenden motivieren mich zur kontinuierlichen Weiterentwicklung dieses Buches. Darüber hinaus möchte ich mich bei den Mitarbeitern nationaler Verkehrsunternehmen (Stadtwerke Verkehrsgesellschaft Frankfurt am Main (VGF), Stuttgarter Straßenbahnen AG, Hamburger Hochbahn AG, Münchner Verkehrsgesellschaft mbH (MVG) sowie VAG Nürnberg) sowie internationaler Verkehrsunternehmen (Wiener Linien, Metropolitan Area Transit Authority, sowie der Metro Dubai) bedanken. Für mich war es sehr wertvoll, mit Praktikern aus den Verkehrsunternehmen in vielen Diskussionen die betrieblichen Zusammenhänge eines automatisierten Bahnbetriebs zu erörtern. Zu guter letzt danke ich meiner Frau Juliane und unseren Zwillingen Clara und Christian dafür, dass sie meine Leidenschaft für die Verkehrsautomatisierung akzeptieren und zuweilen auch teilen.

Braunschweig, Deutschland
Juni 2024

Lars Schnieder



Gestalte die **Zukunft** der **Mobilität!**

Gestalte mit uns den CBTC Rollout in Deutschland und der Welt!
Ob Vertrieb, Entwicklung, Projektleitung, Engineering, Logistik,
Fertigung oder Montage: Du willst eine Karriere mit echtem
Impact? Steige bei Siemens ein oder entdecke unsere Studie-Jobs!



Create a better **#TomorrowWithUs**

Bewirb dich jetzt über unser Jobportal:
siemens.com/braunschweig-jobs

SIEMENS

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation und Hintergrund	1
1.1	Entwicklung urbaner Mobilität	2
1.2	Vorteile automatisierter Schienenverkehrssysteme	5
	Literatur	9
2	Systemkomponenten und Umsysteme automatischer Zugbeeinflussungssysteme	11
2.1	Systemkomponenten automatischer Zugbeeinflussungssysteme	12
2.1.1	Streckenseitige Ausrüstung (ATP Wayside)	13
2.1.2	Fahrzeugseitige Ausrüstung (ATP onboard und ATO onboard) ...	17
2.1.3	Datenkommunikationssystem	18
2.1.4	Zugleitsystem (Automatic train Supervision, ATS)	23
2.2	Umsysteme automatischer Zugbeeinflussungssysteme	27
	Literatur	35
3	Automatisierungsgrade automatischer Zugbeeinflussungssysteme	37
3.1	Grade of Automation 0: Zugbetrieb auf Sicht	40
3.2	Grade of Automation 1: Nicht automatisierter Zugbetrieb	40
3.3	Grade of Automation 2: Halbautomatischer Zugbetrieb	41
3.4	Grade of Automation 3: Begleiteter fahrerloser Zugbetrieb	41
3.5	Grade of Automation 4: Unbegleiteter fahrerloser Zugbetrieb	42
	Literatur	42
4	Betriebsarten und Betriebsartenübergänge im automatisierten Betrieb ...	43
4.1	Betriebsarten im Überblick	44
4.1.1	Betriebsarten für den Regelbetrieb	45
4.1.2	Betriebsarten für Gefahren- und Störzustände	46
4.1.3	Betriebsarten für Ausschaltzustände	48
4.1.4	Betriebsarten für Fahrten auf nicht mit CBTC ausgerüsteten Bestandsstrecken	49

4.2	Betriebsartenübergänge in halbautomatischen betriebenen Systemen	50
4.2.1	Wechsel zwischen Restricted Mode und Supervised Manual Mode	50
4.2.2	Wechsel zwischen Supervised Manual Mode und Automatic Mode	52
4.2.3	Wechsel zwischen Automatic Mode und Full Automatic Mode bei Kehrfahrten	53
4.2.4	Wechsel zwischen Automatic Mode und Full Automatic Mode im Betriebshof	55
4.2.5	Wechsel zwischen Automatic Mode und Restricted Mode bei Störungen	56
4.3	Betriebsartenübergänge in unbegleitet fahrerlos betriebenen Systemen	58
4.3.1	Wechsel zwischen Ausschaltzuständen und unbegleitetem fahrerlosen Betrieb	58
4.3.2	Wechsel zwischen Gefahr- und Stöorzuständen und unbegleitetem fahrerlosen Betrieb	59
	Literatur.	59
5	Hauptfunktionen automatischer Zugbeeinflussungssysteme	61
5.1	Hauptfunktion Sichern der Zugbewegung.	62
5.1.1	Oberfunktion Sichern des Fahrwegs	62
5.1.2	Oberfunktion Sichern der Abstandshaltung	65
5.1.3	Oberfunktion Sichern der Geschwindigkeit und Richtung	66
5.2	Hauptfunktion Fahren des Fahrzeugs	76
5.2.1	Oberfunktion Bestimmen des Fahrprofils	76
5.2.2	Oberfunktion Steuern der Züge in Abhängigkeit des Fahrprofils	79
5.3	Hauptfunktion Überwachen der Profilverfreiheit	85
5.3.1	Oberfunktion Verhinderung der Kollision mit Objekten	85
5.3.2	Oberfunktion Verhinderung der Kollision mit Personen im Gleis	86
5.4	Hauptfunktion Überwachen des Fahrgastwechsels	89
5.4.1	Oberfunktion Steuern und Überwachen der Türfreigabe.	89
5.4.2	Oberfunktion Verhindern der Verletzung von Personen zwischen Fahrzeugen.	90
5.4.3	Oberfunktion Sichern der Bahnsteigkante.	90
5.4.4	Oberfunktion Sicherstellen der Abfertigungsbedingungen	98
5.5	Hauptfunktion Automatischer Zugbetrieb.	100
5.5.1	Oberfunktion Einsetzen und Aussetzen von Fahrzeugen.	100
5.5.2	Oberfunktion Betreiben eines Fahrzeugs zwischen betrieblichen Halten.	101
5.5.3	Oberfunktion Überwachung des Fahrzeugzustands.	103

5.6	Hauptfunktion Störfallerkennung und Störfallmanagement	105
5.6.1	Oberfunktion Fahrgastalarmmeldungen	105
5.6.2	Oberfunktion Brandmeldung	108
5.6.3	Oberfunktion Evakuierung	111
5.6.4	Oberfunktion Hinderniserkennung	114
5.6.5	Oberfunktion Entgleisungserkennung	115
	Literatur	115
6	Verlässlichkeit automatischer Zugbeeinflussungssysteme	117
6.1	Sicherheit	118
6.1.1	Funktionale Sicherheit (Safety)	118
6.1.2	Angriffssicherheit (Security)	124
6.2	Verfügbarkeit (Availability)	125
6.2.1	Optimierung der Instandhaltbarkeit (Maintainability) zur Steigerung der Verfügbarkeit	126
6.2.2	Erhöhung der Zuverlässigkeit (Reliability) zur Steigerung der Verfügbarkeit	128
6.2.3	Fehlertolerante Systeme zur Steigerung der Verfügbarkeit	129
	Literatur	130
7	Abwägung von Kosten und Nutzen automatischer Zugbeeinflussungssysteme	133
7.1	Ermittlung der Kostenkomponente mittels Lebenszykluskostenrechnung	134
7.1.1	Elemente der Lebenszykluskosten	134
7.1.2	Berechnung der Lebenszykluskosten	136
7.1.3	Ergebnisse der Analyse der Lebenszykluskosten	137
7.2	Ermittlung der Nutzenkomponente mit Betriebssimulationen und Verkehrsmodellen	138
7.2.1	Simulative Untersuchung der Leistungsfähigkeit signaltechnischer Ausrüstungsvarianten	138
7.2.2	Nutzung der höheren Leistungsfähigkeit für Anpassungen im ÖPNV-Angebot	142
7.2.3	Bewertung des verkehrlichen Nutzens von Anpassungen im ÖPNV-Angebot	143
	Literatur	144
8	Umbau, Test und Inbetriebnahme automatischer Zugbeeinflussungssysteme	147
8.1	Definition der Migrationsstrategie	148
8.1.1	Doppelausrüstung der Fahrzeuge	150
8.1.2	Doppelausrüstung der Streckeneinrichtungen	151

8.2	Anwendungsspezifische Konfiguration automatischer Zugbeeinflussungssysteme.	153
8.2.1	Kategorien streckenspezifischer Konfigurationsdaten.	153
8.2.2	Kategorien fahrzeugspezifischer Konfigurationsdaten	154
8.2.3	Qualitätsmerkmale von Konfigurationsdaten.	154
8.2.4	Qualitätssichernde Prozesse für Konfigurationsdaten	155
8.2.5	Erfassung streckenspezifischer Konfigurationsdaten.	156
8.3	Umrüstung der Fahrzeuge mit CBTC-Fahrzeugausrüstung.	156
8.3.1	Definition betrieblicher Anwendungsfälle.	157
8.3.2	Definition Mechanische Integration des CBTC-Fahrzeuggeräts	157
8.3.3	Elektrische Integration des CBTC-Fahrzeuggeräts	159
8.4	Umrüstung der Strecke mit CBTC-Streckenausrüstung	160
8.5	Definition der Teststrategie und Testdurchführung	162
8.5.1	Umwelttests	162
8.5.2	Fabriktests	163
8.5.3	Fahrzeugtests	164
8.5.4	Testgleis im Betriebshof	165
8.5.5	Inbetriebnahmetests der Streckeneinrichtung	166
8.6	Anpassung betrieblicher Regelwerke für den automatisierten Betrieb	169
8.6.1	Prinzipien der Regelwerksanpassungen in Erneuerungsprojekten	169
8.6.2	Ablauf der Regelwerkserstellung im Erneuerungsprojekt.	171
8.6.3	Rollen und Verantwortlichkeiten der Regelwerkserstellung im Erneuerungsprojekt.	172
8.7	Schulung des Betriebspersonals.	174
8.7.1	Schulungen der Fahrer.	174
8.7.2	Schulungen der Fahrdienstleiter	175
8.7.3	Schulungen des Instandhaltungspersonals.	176
	Literatur.	177
9	Perspektiven und zukünftige Herausforderungen.	179
9.1	Entwicklung der installierten Basis	180
9.2	Standardisierung von Systemlösungen	180
9.3	Integration der Straßenverkehrstechnik in Stadtbahnssystemen	181
9.4	Alternative Funktionsaufteilung zwischen Fahrzeug und Strecke.	183
9.4.1	Zentralisierung sicherheitsrelevanter Anwendungen in Rechenzentren	183
9.4.2	Fahrzeugzentrierte Funktionsallokation.	184
	Literatur.	185
	Stichwortverzeichnis.	187

Abkürzungsverzeichnis

ATC	Automatic Train Control
ATO	Automatic Train Operation
ATP	Automatic Train Protection
ATS	Automatic Train Supervision
CAPEX	Capital Expenditures
CBTC	Communications-Based Train Control
CCTV	Closed Circuit Television
COTS	Commercial off-the-shelf
DTO	Driverless Train Operation
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
GoA	Grade of Automation
HMI	Human Machine Interface
IP	Internet Protocol
ITCS	Intermodal Transport Control System
LCC	Life Cycle Costs
LRU	Line Replaceable Unit
LTE	Long Term Evolution
MDT	Mean Down Time
MTBF	Mean Time Between Failure
MTTR	Mean Time to Repair
MUT	Mean Up Time
NTO	Non-automated Train Operation
OC	Object Controller
OPEX	Operational Expenditures
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
QoS	Quality of Service
RAMSS	Reliability, Availability, Maintainability, Safety, Security
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SIL	Safety Integrity Level
STO	Semi-automated Train Operation

TCMS	Train Control & Monitoring System
TETRA	Terrestrial Trunked Radio
THR	Tolerable Hazard Rate
TOS	Train Operation On Sight
USV	Unterbrechungsfreie Stromversorgung
UTO	Unmanned Train Operation
WLAN	Wireless Local Area Network



SN Flashcards

Als Käufer*in dieses Buches können Sie kostenlos unsere Flashcard-App „SN Flashcards“ mit Fragen zur Wissensüberprüfung und zum Lernen von Buchinhalten nutzen.

1. Gehen Sie bitte auf <https://flashcards.springernature.com/login> und
2. erstellen Sie ein Benutzerkonto, indem Sie Ihre Mailadresse angeben und ein Passwort vergeben.
3. Verwenden Sie den folgenden Link, um Zugang zu Ihrem SN Flashcards Set zu erhalten: ► <https://sn.pub/sK5mLQ>

Sollte der Link fehlen oder nicht funktionieren, senden Sie uns bitte eine E-Mail mit dem Betreff „SN Flashcards“ und dem Buchtitel an customerservice@springernature.com

Weltweit ziehen immer mehr Menschen in die Städte. Gleichzeitig nimmt die Verkehrsnachfrage stetig zu. Dort, wo aktuell noch keine leistungsfähigen öffentlichen Verkehrssysteme vorhanden sind, müssen diese neu errichtet werden. Dort, wo bestehende öffentliche Verkehrssysteme an die Grenzen ihrer Leistungsfähigkeit stoßen, müssen durch umfassende technische und betriebliche Maßnahmen Kapazitätssteigerungen erzielt werden. In diesem Abschnitt wird zunächst die weltweit zu beobachtende Entwicklung urbaner Mobilität beschrieben. Die hieraus resultierenden Herausforderungen können durch die Vorteile automatisierter Verkehrssysteme adressiert werden. Dies wird ebenfalls in diesem einführenden Kapitel beschrieben. In diesem Kapitel wird zunächst die Entwicklung der

urbanen Mobilität aufgezeigt (vgl. Abschn. 1.1). Daraus wird die weltweit zu beobachtende Tendenz zum Einsatz zunehmend höher automatisierter Schienenverkehrssysteme motiviert, deren Vorteile in Abschn. 1.2 dargestellt werden.

1.1 Entwicklung urbaner Mobilität

Zum ersten Mal in der Menschheitsgeschichte lebt die Mehrheit der Weltbevölkerung in den Städten. Bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts werden voraussichtlich sogar mehr als zwei Drittel der Erdbewohner in urbanen Zentren leben (United Nations 2015). Dieser raumstrukturelle Veränderungsprozess wird auch als *Urbanisierung* bezeichnet. Um die Bedürfnisse des täglichen Lebens zu befriedigen (Wohnen, Versorgung, Arbeit, Ausbildung, Erholung usw.), müssen die Menschen mobil sein und sich in ihrer Stadt fortbewegen können. Den zunehmenden Mobilitätsbedarf dem motorisierten Individualverkehr zu überlassen, wäre ökologisch und gesamtwirtschaftlich verheerend. Nachhaltige Mobilitätskonzepte zu entwickeln, ist daher vor allem auch hinsichtlich des Ressourcen- und Klimaschutzes ein wichtiges Anliegen. Hierbei nimmt ein leistungsfähiger öffentlicher Personennahverkehr (ÖPNV) eine zentrale Rolle ein. In den Industriestaaten schreitet parallel zu der zuvor beschriebenen Urbanisierung auch die *Suburbanisierung* (englisch suburban – am Stadtrand) voran. Suburbanisierung bezeichnet hierbei die Abwanderung städtischer Bevölkerung oder städtischer Funktionen wie beispielsweise Industrie und Dienstleistungen aus der Kernstadt in das städtische Umland. Diese Abwanderung führt allgemein zu einer Zunahme der Pendlerbewegungen. Hieraus resultiert eine höhere Belastung der Verkehrsinfrastruktur insbesondere in den morgendlichen und abendlichen Hauptverkehrszeiten.

Urbanisierung und Suburbanisierung erfordern die Erhöhung der Beförderungskapazität städtischer Verkehrsinfrastrukturen. Die *Beförderungskapazität* bestimmt sich hierbei in der Betriebsplanung aus dem Produkt der Anzahl der Fahrten pro Stunde und der Gefäßgröße (Anzahl der verfügbaren Sitz- und Stehplätze) der eingesetzten Fahrzeugflotte (Schneider 2018). Die Beförderungskapazität wird somit wesentlich bestimmt von der Anzahl der Zugfahrten, die in einem bestimmten Betriebszeitraum auf einer Strecke in einer Fahrtrichtung durchgeführt werden können. Dies wird auch als *Leistungsfähigkeit* einer Strecke bezeichnet (Adler et al. 1981). Die Leistungsfähigkeit ist abhängig von verschiedenen Faktoren wie die bestehende Infrastruktur, Charakteristika der Fahrzeuge und der Betriebsorganisation. Dies erfordert insgesamt einen ganzheitlichen Ansatz der Systemgestaltung, wie dieser im Ishikawa-Diagramm in Abb. 1.1 dargestellt ist. Die im Diagramm dargestellten Ansatzpunkte zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit werden nachfolgend diskutiert:

- *Optimierung der Fahrzeugeigenschaften:* Die eingesetzten Fahrzeuge leisten einen Beitrag zur Steigerung der Leistungsfähigkeit einer Strecke. Die Distanz zwischen Stationshalten, die Fahrzeuge mit der maximal zulässigen Geschwindigkeit fahren kön-

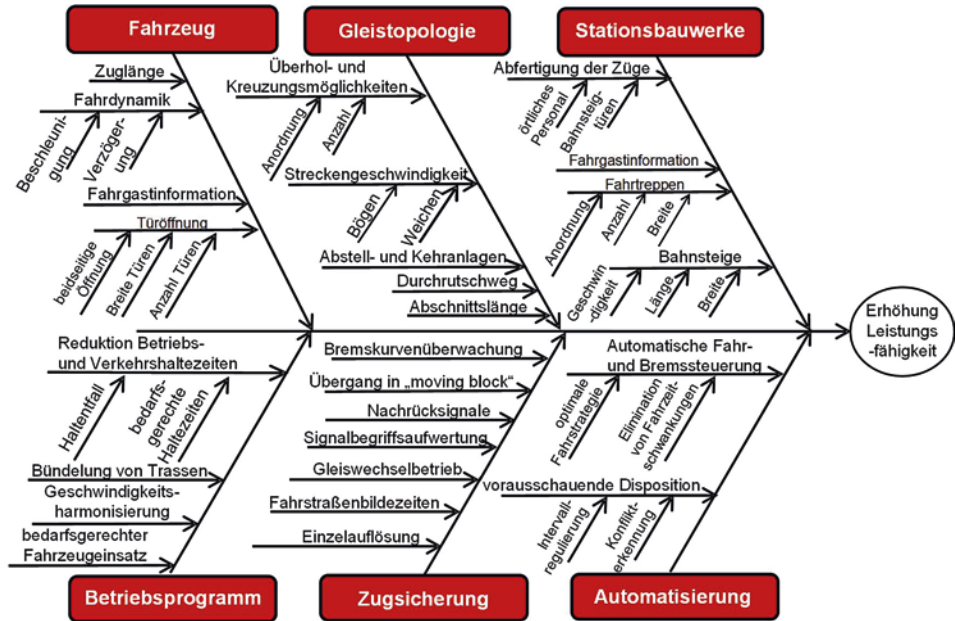


Abb. 1.1 Kapazitätserhöhung als ganzheitlicher Systemansatz. (Eigene Darstellung)

nen, kann erhöht werden, indem die Fahrzeuge eine verbesserte Fahrdynamik erhalten. Dies umfasst neben einem höheren Beschleunigungsvermögen auch ein höheres Bremsvermögen. Darüber hinaus kann mit der Fahrgastwechselzeit in den Haltestellen ein weiterer Störeinfluss in städtischen Bahnsystemen adressiert werden. Um den Fahrgastwechsel in den Stationen zu beschleunigen, kann auch die Anzahl und Breite der Türen bewusst gestaltet werden (obwohl dies auf Kosten des Sitzplatzangebotes geht). In seltenen Fällen sind an beiden Seiten des Fahrzeugs Bahnsteige, sodass die Türen in den Haltestellen auf beiden Seiten geöffnet werden können. Die Betreiber verbinden hiermit die Hoffnung, dass die Fahrgäste das Fahrzeug auf der einen Seite besteigen und auf der anderen Seite verlassen. In der Praxis muss dies mit einer präzisen und verständlichen Fahrgastinformation verknüpft werden. Dies soll unnötige Hektik beim Haltestellenaufenthalt vermeiden und sicherstellen, dass die Fahrgäste den Zug nicht über die „falsche“ Seite verlassen.

- *Optimierung der Gleislogik:* Durch die Gestaltung der Gleispläne können bestehende Einschränkungen reduziert werden. Beispiele hierfür sind veränderte Weichen und Gleisbogenradien für höhere Streckengeschwindigkeiten. Außerdem können bestehende Fahrstraßenausschlüsse behoben werden (Pachl 2016) sowie die Anordnung von Kreuzungs- und Überholstellen bei eingleisiger Betriebsführung geändert werden. Die Anzahl und Position von Keh- und Abstellanlagen ist insbesondere für Störungen im Betriebsablauf relevant. Defekte Fahrzeuge können im Falle von Störungen in Keh- und Abstellanlagen weggeschoben werden und behindern so nicht mehr den Betriebsablauf. Je mehr Keh-