

Lars Schnieder

# Communications- Based Train Control (CBTC)

Komponenten, Funktionen  
und Betrieb

*3. Auflage*

Inklusive  
SN Flashcards  
Lern-App

MOREMEDIA



Springer Vieweg



# Communications-Based Train Control (CBTC)

---

Lars Schnieder

# Communications-Based Train Control (CBTC)

Komponenten, Funktionen und Betrieb

3. Auflage

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

ISBN 978-3-662-65284-8            ISBN 978-3-662-65285-5 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-65285-5>

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

Springer Vieweg

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2020, 2021, 2022

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

---

## Vorwort zur 3. 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 Stadtbahnssystemen 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 Stadtbahnssystemen 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, Stadler und Thales. Ich habe hier in vielen Fachgesprächen ein vertieftes Verständnis der komplexen technischen 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 3. Auflage dieses Buches gehört Frau Holland-Nell von der Dresden International University für die Koordination des Weiterbildungsseminars „Zugsicherungssysteme im Nahverkehr“ sowie dem Referententeam aus der Bahnindustrie für wertvolle Impulse zur Fortentwicklung des Manuskripts. Darüber hinaus möchte ich mich bei den Mitarbeitern der Betreiber, beispielsweise der Wiener Linien, der Stadtwerke Verkehrsgesellschaft Frankfurt am Main (VGF), der Stuttgarter Straßenbahnen AG, der Hamburger Hochbahn AG, der Münchner Verkehrsgesellschaft mbH (MVG), der VAG Nürnberg sowie Washington Metropolitan Area Transit Authority (WMATA) bedanken. Für mich war es sehr wertvoll, mit Praktikern aus den Verkehrsunternehmen in vielen Diskussionen die betrieblichen Zusammenhänge eines automatisierten Bahnbetriebs zu erörtern. Die dritte Auflage dieses Buches vertieft die technischen Zusammenhänge von CBTC-Systemen. Ein besonderer Dank gilt Herrn Peter Axhausen von der ESE Engineering und Software-Entwicklung GmbH für die kritische Durchsicht des Manuskripts und seine konstruktive Kritik.

Braunschweig, Deutschland  
Oktober 2022

Lars Schnieder

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Motivation und Hintergrund</b> .....	1
1.1 Entwicklung urbaner Mobilität .....	1
1.2 Vorteile automatisierter Schienenverkehrssysteme .....	7
Literatur .....	11
<b>2 Systemkomponenten und Umsysteme automatischer Zugbeeinflussungssysteme</b> .....	13
2.1 Systemkomponenten automatischer Zugbeeinflussungssysteme .....	13
2.1.1 Fahrzeugseitige Ausrüstung (ATP onboard und ATO onboard) .....	15
2.1.2 Streckenseitige Ausrüstung (ATP wayside) .....	17
2.1.3 Datenkommunikationssystem .....	19
2.1.4 Zugleitsystem (Automatic Train Supervision, ATS) .....	23
2.2 Umsysteme automatischer Zugbeeinflussungssysteme .....	27
Literatur .....	35
<b>3 Automatisierungsgrade automatischer Zugbeeinflussungssysteme</b> .....	37
3.1 Grade of Automation 0: Zugbetrieb auf Sicht .....	37
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: Vollautomatischer fahrerloser Zugbetrieb .....	41
Literatur .....	42
<b>4 Betriebsarten und Betriebsartenübergänge automatischer Zugbeeinflussungssysteme</b> .....	43
4.1 Betriebsarten automatischer Zugbeeinflussungssysteme .....	43
4.1.1 Betriebsarten für den Regelbetrieb .....	44
4.1.2 Betriebsarten für Gefahren- und Störzustände .....	45
4.1.3 Betriebsarten für Ausschaltzustände .....	47
4.1.4 Betriebsarten für Fahrten auf nicht mit CBTC ausgerüsteten Bestandsstrecken .....	48

4.2	Betriebsartenübergänge automatischer Zugbeeinflussungssysteme . . . . .	49
4.2.1	Wechsel zwischen Restricted Mode und Supervised Manual Mode . . . . .	49
4.2.2	Wechsel zwischen Supervised Manual Mode und Automatic Mode . . . . .	50
4.2.3	Wechsel zwischen Automatic Mode und Automatic Reversal Mode . . . . .	51
4.2.4	Wechsel zwischen Automatic Mode und Restricted Mode bei Störungen . . . . .	53
4.2.5	Automatisierte Betriebsführung im Depot . . . . .	55
	Literatur . . . . .	56
<b>5</b>	<b>Hauptfunktionen automatischer Zugbeeinflussungssysteme . . . . .</b>	<b>57</b>
5.1	Hauptfunktion Sichern der Zugbewegung . . . . .	57
5.1.1	Oberfunktion Sichern des Fahrwegs . . . . .	57
5.1.2	Oberfunktion Sichern der Abstandshaltung . . . . .	61
5.1.3	Oberfunktion Sichern der Geschwindigkeit . . . . .	62
5.2	Hauptfunktion Fahren des Fahrzeugs . . . . .	71
5.2.1	Oberfunktion Bestimmen des Fahrprofils . . . . .	71
5.2.2	Oberfunktion Steuern der Züge in Abhängigkeit des Fahrprofils . . . . .	74
5.3	Hauptfunktion Überwachen der Profelfreiheit . . . . .	79
5.3.1	Oberfunktion Verhinderung der Kollision mit Objekten . . . . .	79
5.3.2	Oberfunktion Verhinderung der Kollision mit Personen im Gleis . . . . .	80
5.4	Hauptfunktion Überwachen des Fahrgastwechsels . . . . .	83
5.4.1	Oberfunktion Steuern und Überwachen der Türfreigabe . . . . .	83
5.4.2	Oberfunktion Verhindern der Verletzung von Personen zwischen Fahrzeugen . . . . .	84
5.4.3	Oberfunktion Sichern der Bahnsteigkante . . . . .	84
5.4.4	Oberfunktion Sicherstellen der Abfertigungsbedingungen . . . . .	90
5.5	Hauptfunktion Automatischer Zugbetrieb . . . . .	92
5.5.1	Oberfunktion Einsetzen und Aussetzen von Fahrzeugen . . . . .	92
5.5.2	Oberfunktion Betreiben eines Fahrzeugs zwischen betrieblichen Halten . . . . .	93
5.5.3	Oberfunktion Überwachung des Fahrzeugzustands . . . . .	95
5.6	Hauptfunktion Störfallerkennung und Störfallmanagement . . . . .	96
5.6.1	Oberfunktion Fahrgastalarmmeldungen . . . . .	96
5.6.2	Oberfunktion Brandmeldung . . . . .	100
5.6.3	Oberfunktion Evakuierung . . . . .	101
5.6.4	Oberfunktion Hinderniserkennung . . . . .	103
5.6.5	Oberfunktion Entgleisungserkennung . . . . .	104
	Literatur . . . . .	105

<b>6</b>	<b>Verlässlichkeit automatischer Zugbeeinflussungssysteme</b>	107
6.1	Sicherheit	107
6.1.1	Funktionale Sicherheit (Safety)	108
6.1.2	Angriffssicherheit (Security)	114
6.2	Verfügbarkeit (Availability)	115
6.2.1	Optimierung der Instandhaltbarkeit (Maintainability) zur Steigerung der Verfügbarkeit	115
6.2.2	Erhöhung der Zuverlässigkeit (Reliability) zur Steigerung der Verfügbarkeit	117
6.2.3	Fehlertolerante Systeme zur Steigerung der Verfügbarkeit	118
	Literatur	120
<b>7</b>	<b>Abwägung von Kosten und Nutzen automatischer Zugbeeinflussungssysteme</b>	123
7.1	Lebenszykluskostenrechnung	123
7.1.1	Elemente der Lebenszykluskosten	124
7.1.2	Ergebnisse der Analyse der Lebenszykluskosten	126
7.2	Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit	126
7.2.1	Vorbereitung des Simulationsmodells	127
7.2.2	Validierung und Kalibrierung des Simulationsmodells	128
7.2.3	Durchführung und Auswertung der Simulationsläufe	130
	Literatur	131
<b>8</b>	<b>Umbau, Test und Inbetriebnahme automatischer Zugbeeinflussungssysteme</b>	133
8.1	Definition der Migrationsstrategie	134
8.1.1	Doppelausrüstung der Fahrzeuge	137
8.1.2	Doppelausrüstung der Streckeneinrichtungen	139
8.2	Projektierung automatischer Zugbeeinflussungssysteme	140
8.2.1	Kategorien streckenspezifischer Projektierungsdaten	141
8.2.2	Kategorien fahrzeugspezifischer Projektierungsdaten	141
8.2.3	Qualitätsmerkmale von Projektierungsdaten	142
8.2.4	Qualitätssichernde Prozesse für Projektierungsdaten	142
8.2.5	Erfassung streckenspezifischer Projektierungsdaten	143
8.3	Ausstattung von Fahrzeugen mit CBTC-Fahrzeugeräten	144
8.3.1	Definition betrieblicher Anwendungsfälle	144
8.3.2	Mechanische Integration des CBTC-Fahrzeugeräts	145
8.3.3	Elektrische Integration des CBTC-Fahrzeugeräts	146
8.4	Definition der Teststrategie und Testdurchführung	147
8.4.1	Umwelttests	148
8.4.2	Fabriktests	148
8.4.3	Fahrzeugtests	149
8.4.4	Testgleis im Betriebshof	150
8.4.5	Inbetriebnahmetests der Streckeneinrichtung	151

---

8.5	Schulung des Betriebspersonals.....	153
8.5.1	Schulungen der Fahrer.....	154
8.5.2	Schulungen des Fahrdienstleiters:.....	154
8.5.3	Schulungen des Instandhaltungspersonals.....	156
	Literatur.....	157
<b>9</b>	<b>Perspektiven und zukünftige Herausforderungen.....</b>	<b>159</b>
9.1	Entwicklung der installierten Basis.....	159
9.2	Standardisierung von Systemlösungen.....	160
9.3	Integration der Straßenverkehrstechnik in Stadtbahnssystemen.....	161
	Literatur.....	163
	<b>Stichwortverzeichnis.....</b>	<b>165</b>

---

# 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
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
MUT	Mean Up Time
NTO	Non-automated Train Operation
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



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 fort-

bewegen 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 (Schnieder 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 können, 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, so dass 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.



**E.C.O. Group**

# Engineering. Consulting. Operations.

---

Nikada / E+ via Getty Images

**Interested in transforming  
the future of mobility?**

Follow us on  
**LinkedIn**



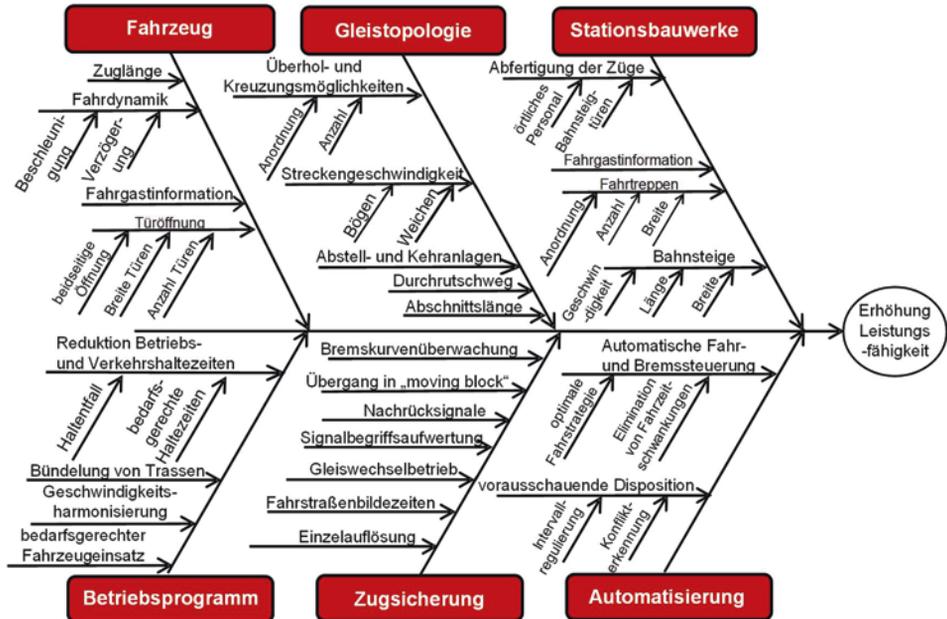
Sign up for our  
newsletter.



[www.db-eco.com](http://www.db-eco.com)

*We are part of DB E.C.O. Group:  
DB Engineering & Consulting | ESE Engineering und Software-Entwicklung |  
infraView | Deutsche Bahn International Operations | inno2grid*





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

- Optimierung der Gleislogistik:* 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 Kehr- und Abstellanlagen ist insbesondere für Störungen im Betriebsablauf relevant. Defekte Fahrzeuge können im Falle von Störungen in Kehr- und Abstellanlagen weggeschoben werden und behindern so nicht mehr den Betriebsablauf. Je mehr Kehr- und Abstellanlagen im Linienverlauf zur Verfügung stehen, desto höher ist die Flexibilität für den Disponenten in der Bearbeitung der Störung. Kehranlagen im Linienverlauf bieten darüber hinaus die Möglichkeit zum frühzeitigen Abkehren von Fahrzeugumläufen im Falle von Verspätungen. Auf diese Weise kann eine Verspätungsübertragung unterbunden werden und eine regelmäßiger Betriebsablauf wieder hergestellt werden.
- Optimierung der Stationsbauwerke:* In Summe muss in städtischen Nahverkehrssystemen ein optimaler Fahrgastfluss erreicht werden. Dies bezieht in einem ganzheitlichen Ansatz auch die Stationsbauwerke mit in die Betrachtung ein. Durch breite Bahnsteige und eine günstige Anordnung von Treppen, Fahrtreppen und Aufzügen können Reisende schnell die Station verlassen. Sie blockieren dann nicht den Bahnsteig für die aus dem nächsten eintreffenden Zug aussteigenden Fahrgäste. Damit die Fahrgäste den Stationsbereich unverzüglich verlassen können, ist auch eine adressatenorientierte Fahrgastinformation im Sinne eines Gebäudeleitsystems unverzichtbar. Darüber hinaus spielt auch das gewählte Abfertigungsverfahren eine nicht zu ver-