

Lars Schnieder

Communications- Based Train Control (CBTC)

Komponenten, Funktionen
und Betrieb

2. 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

2. Auflage

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

ISBN 978-3-662-62875-1 ISBN 978-3-662-62876-8 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-62876-8>

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

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 2. Auflage

Jeden Tag nutzen Millionen Menschen den öffentlichen Personennahverkehr. Die Metropolen dieser Welt stünden ohne leistungsfähige Schienenverkehrssysteme jeden Tag vor dem Verkehrsinfarkt. Allerdings stößt die vorhandene Infrastruktur 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 U- und Stadtbahnssysteme reinvestiert. 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 die Verkehrsunternehmen daher 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, Bombardier, Hitachi, Siemens und Thales. Ich habe hier in vielen Fachgesprächen die komplexen technischen Zusammenhänge von CBTC-Systemen vertiefen können. Den folgenden Firmen sei für die freundliche Genehmigung zur Verwendung von Bilddateien in diesem Buch gedankt (Angaben in alphabetischer Reihenfolge):

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

- PINTSCH GmbH
- Sitron Sensor GmbH
- VIA Consulting & Development GmbH

Ein persönlicher Dank gebührt Herrn Dr.-Ing. Thorsten Büker (VIA Consulting und Development GmbH) für wertvolle Hinweise zum Manuskript. Darüber hinaus möchte ich mich bei den Mitarbeitern der Betreiber, insbesondere der Wiener Linien, der Stadtwerke Verkehrsgesellschaft Frankfurt am Main (VGF), der Stuttgarter Straßenbahnen AG sowie der Hamburger Hochbahn AG bedanken. Für mich war es sehr wertvoll, mit Praktikern aus den Verkehrsunternehmen in vielen Diskussionen die betrieblichen Zusammenhänge eines automatisierten Bahnbetriebs erörtern zu können. Die zweite Auflage dieses Buches ergänzt wesentliche technische und betriebliche Zusammenhänge von CBTC-Systemen. Danken möchte ich auch den Mitarbeitenden des Springer Verlags Herrn Dr. Alexander Grün für die langjährige vertrauensvolle Zusammenarbeit und Frau Susanne Schemann für die sachdienlichen Hinweise zur Erstellung des digitalen Zusatzmaterials für die zweite Auflage dieses Buches.

Braunschweig, Deutschland
Februar 2021

Lars Schnieder

Inhaltsverzeichnis

1 Motivation und Hintergrund	1
1.1 Entwicklung urbaner Mobilität	1
1.2 Vorteile automatisierter Schienenverkehrssysteme	4
Literatur	8
2 Systemkomponenten und Umsysteme automatischer Zugbeeinflussungssysteme	9
2.1 Systemkomponenten automatischer Zugbeeinflussungssysteme	9
2.2 Umsysteme automatischer Zugbeeinflussungssysteme	20
Literatur	25
3 Automatisierungsgrade automatischer Zugbeeinflussungssysteme	27
3.1 Grade of Automation 0: Zugbetrieb auf Sicht	27
3.2 Grade of Automation 1: Nicht automatisierter Zugbetrieb	30
3.3 Grade of Automation 2: Halbautomatischer Zugbetrieb	31
3.4 Grade of Automation 3: Begleiteter fahrerloser Zugbetrieb	31
3.5 Grade of Automation 4: Vollautomatischer fahrerloser Zugbetrieb	31
Literatur	32
4 Betriebsarten und Betriebsartenübergänge automatischer Zugbeeinflussungssysteme	33
4.1 Betriebsarten automatischer Zugbeeinflussungssysteme	33
4.2 Betriebsartenübergänge automatischer Zugbeeinflussungssysteme	37
4.2.1 Wechsel zwischen Restricted Mode und Supervised Manual Mode	37
4.2.2 Wechsel zwischen Supervised Manual Mode und Automatic Mode	38
4.2.3 Wechsel zwischen Automatic Mode und Automatic Reversal Mode	39

4.2.4	Wechsel zwischen Automatic Mode und Restricted Mode bei Störungen	41
4.2.5	Automatisierte Betriebsführung im Depot.	43
	Literatur.	43
5	Hauptfunktionen automatischer Zugbeeinflussungssysteme	45
5.1	Hauptfunktion Sichern der Zugbewegung	45
5.1.1	Oberfunktion Sichern des Fahrwegs	45
5.1.2	Oberfunktion Sichern der Abstandhaltung	47
5.1.3	Oberfunktion Sichern der Geschwindigkeit	48
5.2	Hauptfunktion Fahren des Fahrzeugs	55
5.2.1	Oberfunktion Bestimmen des Fahrprofils	55
5.2.2	Oberfunktion Steuern der Züge in Abhängigkeit des Fahrprofils . . .	57
5.3	Hauptfunktion Überwachen der Profilverfreiheit	62
5.3.1	Oberfunktion Verhinderung der Kollision mit Objekten	62
5.3.2	Oberfunktion Verhinderung der Kollision mit Personen im Gleis . . .	63
5.4	Hauptfunktion Überwachen des Fahrgastwechsels	65
5.4.1	Oberfunktion Steuern und Überwachen der Türfreigabe.	65
5.4.2	Oberfunktion Verhindern der Verletzung von Personen zwischen Fahrzeugen.	65
5.4.3	Oberfunktion Sichern der Bahnsteigkante.	66
5.4.4	Oberfunktion Sicherstellen der Abfertigungsbedingungen	68
5.5	Hauptfunktion Automatischer Zugbetrieb	69
5.5.1	Oberfunktion Einsetzen und Aussetzen von Fahrzeugen.	69
5.5.2	Oberfunktion Betreiben eines Fahrzeugs zwischen betrieblichen Halten.	70
5.5.3	Oberfunktion Überwachung des Fahrzeugzustands.	70
5.6	Hauptfunktion Störfallerkennung und Störfallmanagement	72
5.6.1	Oberfunktion Brandmeldung	72
5.6.2	Oberfunktion Evakuierung.	72
5.6.3	Oberfunktion Hinderniserkennung	73
5.6.4	Oberfunktion Entgleisungserkennung	74
	Literatur.	74
6	Verlässlichkeit automatischer Zugbeeinflussungssysteme	75
6.1	Sicherheit	75
6.1.1	Funktionale Sicherheit (Safety)	76
6.1.2	Angriffssicherheit (Security)	78
6.2	Verfügbarkeit (Availability)	80
6.2.1	Erhöhung der Zuverlässigkeit (Reliability) zur Steigerung der Verfügbarkeit	80

6.2.2	Optimierung der Instandhaltbarkeit (Maintainability) zur Steigerung der Verfügbarkeit	82
	Literatur.	84
7	Abwägung von Kosten und Nutzen automatischer Zugbeeinflussungssysteme	87
7.1	Lebenszykluskostenrechnung	87
7.1.1	Elemente der Lebenszykluskosten.	88
7.1.2	Ergebnisse der Analyse der Lebenszykluskosten.	90
7.2	Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit	90
7.2.1	Vorbereitung des Simulationsmodells	91
7.2.2	Validierung und Kalibrierung des Simulationsmodells.	92
7.2.3	Durchführung und Auswertung der Simulationsläufe	94
	Literatur.	94
8	Umbau, Test und Inbetriebnahme automatischer Zugbeeinflussungssysteme	97
8.1	Definition der Migrationsstrategie.	98
8.1.1	Doppelausrüstung der Fahrzeuge.	99
8.1.2	Doppelausrüstung der Streckeneinrichtungen	100
8.2	Bestandspläne und Erfassung der Gleisgeometrie.	102
8.3	Definition der Teststrategie und Testdurchführung	103
8.3.1	Umwelttests	104
8.3.2	Fabriktests	104
8.3.3	Fahrzeugtests	105
8.3.4	Testgleis im Betriebshof	106
8.3.5	Inbetriebnahmetests der Streckeneinrichtung	106
8.4	Training des Betriebspersonals vor Betriebsaufnahme	109
	Literatur.	111
9	Perspektiven und zukünftige Herausforderungen.	113
9.1	Entwicklung der installierten Basis	113
9.2	Standardisierung von Systemlösungen	114
9.3	Integration der Straßenverkehrstechnik in Stadtbahnssystemen	115
	Literatur.	116
	Stichwortverzeichnis.	117

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
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
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 Bedarfe 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 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:

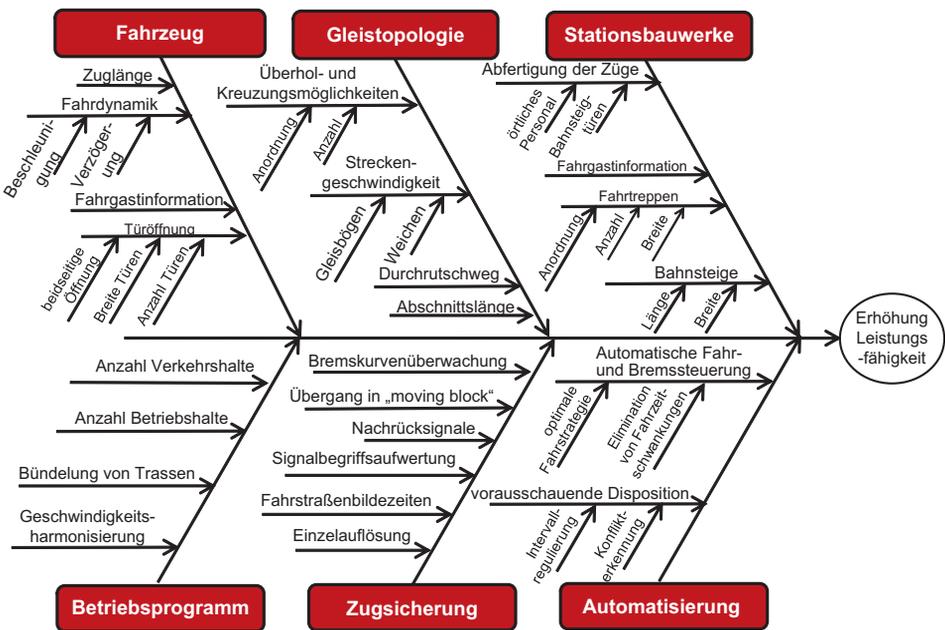


Abb. 1.1 Kapazitätserhöhung als ganzheitlicher Systemansatz. (Eigene Darstellung)

- *Optimierung der Fahrzeugeigenschaften:* Die eingesetzten Fahrzeuge leisten einen Beitrag zur Steigerung der Leistungsfähigkeit einer Strecke. Die Distanz zwischen Stationen, 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.
- *Optimierung der Gleisopologie:* Durch die Gestaltung der Gleispläne können bestehende Einschränkungen reduziert werden. Beispiele hierfür sind veränderte Weichen und Gleisbogenradien für höhere Streckengeschwindigkeiten. Außerdem können bestehender Fahrstraßenausschlüsse behoben werden (Pachl 2016) sowie die Anordnung von Kreuzungs- und Überholstellen bei eingleisiger Betriebsführung geändert 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 Abfertungsverfahren eine nicht zu vernachlässigende Rolle. So kann beispielsweise durch eine gezielte Unterstützung der Abfertigung durch Personal in den Stationen die Pünktlichkeit insbesondere in den Hauptverkehrszeiten erhöht werden.
- *Optimierung des Betriebsprogramms:* Heterogene Betriebsprogramme können harmonisiert werden, um eine höhere Leistungsfähigkeit der Strecke zu erreichen. Ein Beispiel hierfür ist neben der Angleichung unterschiedlicher Zuggeschwindigkeiten die Bündelung von Trassen von Zügen unterschiedlicher Fahrtrichtung bei eingleisiger Betriebsführung, bzw. die Zusammenfassung der Zugtrassen von Zügen gleicher Geschwindigkeit. Gegebenenfalls können Betriebs- und Verkehrshalte entfallen.