

Lars Schnieder

# Communications- Based Train Control (CBTC)

Komponenten, Funktionen und Betrieb

---

# Communications-Based Train Control (CBTC)

---

Lars Schnieder

# Communications-Based Train Control (CBTC)

Komponenten, Funktionen und Betrieb

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

ISBN 978-3-662-61012-1                      ISBN 978-3-662-61013-8 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-61013-8>

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

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.

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

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 umfassende 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
- Huber + Suhner AG
- Lenord, Bauer & Co. GmbH
- PINTSCH GmbH

- Sitron Sensor GmbH
- VIA Consulting & Development GmbH

Ein persönlicher Dank gebührt Herrn Dr.-Ing. Thorsten Bükler (VIA Consulting und Development GmbH) für wertvolle Hinweise zum Manuskript. Darüber hinaus möchte ich mich bei den Mitarbeitern der Betreiber, insbesondere der Wiener Linien und der Stadtwerke Verkehrsgesellschaft Frankfurt am Main (VGF) bedanken, mit denen ich in vielen Diskussionen die betrieblichen Zusammenhänge eines automatisierten Bahnbetriebs erörtern konnte. Die in den Gesprächen gesammelten Erkenntnisse sind in diesem Buch für die Leser dokumentiert.

Braunschweig, Deutschland  
Februar 2020

Lars Schnieder

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Motivation und Hintergrund</b> .....	1
1.1	Entwicklung urbaner Mobilität .....	1
1.2	Vorteile automatisierter Schienenverkehrssysteme .....	4
	Literatur .....	7
<b>2</b>	<b>Systemkomponenten und Umssysteme automatischer Zugbeeinflussungssysteme</b> .....	9
2.1	Systemkomponenten automatischer Zugbeeinflussungssysteme .....	9
2.2	Umssysteme automatischer Zugbeeinflussungssysteme .....	19
	Literatur .....	23
<b>3</b>	<b>Automatisierungsgrade automatischer Zugbeeinflussungssysteme</b> .....	25
3.1	Grade of Automation 0: Zugbetrieb auf Sicht .....	25
3.2	Grade of Automation 1: Nicht automatisierter Zugbetrieb .....	28
3.3	Grade of Automation 2: Halbautomatischer Zugbetrieb .....	29
3.4	Grade of Automation 3: Begleiteter fahrerloser Zugbetrieb .....	29
3.5	Grade of Automation 4: Vollautomatischer fahrerloser Zugbetrieb .....	29
	Literatur .....	30
<b>4</b>	<b>Betriebsarten und Betriebsartenübergänge automatischer Zugbeeinflussungssysteme</b> .....	31
4.1	Wechsel zwischen nicht automatisiertem und halbautomatischem Betrieb .....	31
4.2	Wechsel zwischen halb automatischem und vollautomatischem Betrieb .....	32
4.3	Wechsel zwischen Störungsbetrieb und Regelbetrieb .....	34
	Literatur .....	36
<b>5</b>	<b>Hauptfunktionen automatischer Zugbeeinflussungssysteme</b> .....	37
5.1	Hauptfunktion Sichern der Zugbewegung .....	37
5.2	Hauptfunktion Fahren des Fahrzeugs .....	46
5.3	Hauptfunktion Überwachen des Fahrgastwechsels .....	52

5.4	Hauptfunktion Überwachen der Profilverfreiheit . . . . .	56
5.5	Hauptfunktion Automatischer Zugbetrieb . . . . .	58
5.6	Hauptfunktion Störfallerkennung und Störfallmanagement . . . . .	61
	Literatur . . . . .	63
<b>6</b>	<b>Verlässlichkeit automatischer Zugbeeinflussungssysteme . . . . .</b>	<b>65</b>
6.1	Sicherheit . . . . .	65
6.1.1	Funktionale Sicherheit (Safety) . . . . .	66
6.1.2	Angriffssicherheit (Security) . . . . .	68
6.2	Verfügbarkeit (Availability) . . . . .	70
6.2.1	Erhöhung der Zuverlässigkeit (Reliability) zur Steigerung der Verfügbarkeit . . . . .	70
6.2.2	Optimierung der Instandhaltbarkeit (Maintainability) zur Steigerung der Verfügbarkeit . . . . .	71
	Literatur . . . . .	73
<b>7</b>	<b>Abwägung von Kosten und Nutzen automatischer Zugbeeinflussungssysteme . . . . .</b>	<b>75</b>
7.1	Lebenszykluskostenrechnung . . . . .	75
7.1.1	Elemente der Lebenszykluskosten . . . . .	76
7.1.2	Ergebnisse der Analyse der Lebenszykluskosten . . . . .	77
7.2	Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit . . . . .	78
7.2.1	Vorbereitung des Simulationsmodells . . . . .	78
7.2.2	Validierung und Kalibrierung des Simulationsmodells . . . . .	80
7.2.3	Durchführung und Auswertung der Simulationsläufe . . . . .	81
	Literatur . . . . .	82
<b>8</b>	<b>Umbau, Test und Inbetriebnahme automatischer Zugbeeinflussungssysteme . . . . .</b>	<b>83</b>
8.1	Definition der Migrationsstrategie . . . . .	84
8.1.1	Doppelausrüstung der Fahrzeuge . . . . .	85
8.1.2	Doppelausrüstung der Streckeneinrichtungen . . . . .	86
8.2	Bestandspläne und Erfassung der Gleisgeometrie . . . . .	88
8.3	Definition der Teststrategie und Testdurchführung . . . . .	88
8.3.1	Umwelttests . . . . .	89
8.3.2	Fabriktests . . . . .	90
8.3.3	Fahrzeugtests . . . . .	91
8.3.4	Testgleis im Betriebshof . . . . .	91
8.3.5	Inbetriebnahmetests der Streckeneinrichtung . . . . .	92
8.4	Training des Betriebspersonals vor Betriebsaufnahme . . . . .	94
	Literatur . . . . .	96



---

<b>9 Perspektiven und zukünftige Herausforderungen</b> .....	97
9.1 Entwicklung der installierten Basis .....	97
9.2 Standardisierung von Systemlösungen .....	98
9.3 Integration der Straßenverkehrstechnik in Stadtbahnssystemen .....	99
Literatur .....	100
<b>Stichwortverzeichnis</b> .....	101

---

## 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
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
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:

- *Optimierung der Fahrzeugeigenschaften:* Die eingesetzten Fahrzeuge leisten einen Beitrag zur Steigerung der Leistungsfähigkeit einer Strecke. Die Distanz zwischen

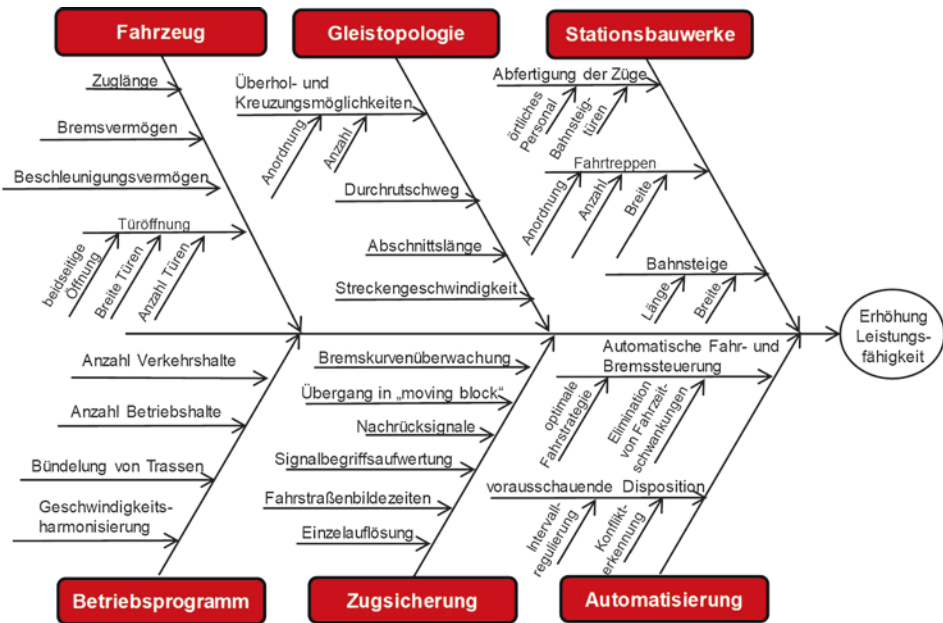


Abb. 1.1 Kapazitätserhöhung als ganzheitlicher Systemansatz. (Eigene Darstellung)