



## Diplomarbeit

# Auswirkungen des vollautomatischen Bahnbetriebs auf ETCS und weitere Umsysteme

eingereicht von Fabian Gaebler

geb. am 26.08.1996 in Böblingen

Prüfer:

- Dipl.-Ing. Richard Kahl
- PD Dr.-Ing. habil. Ulrich Maschek

Betreuer:

- Dipl.-Ing. Richard Kahl
- Dipl.-Ing. Michael Krahl (SIGNON Deutschland GmbH)

Dresden, den 01.06.2022

.....  
Unterschrift des  
Diplomanden

## **Autorenreferat**

Ziel dieser Diplomarbeit ist die Untersuchung der Auswirkungen des vollautomatischen Bahnbetriebs (GoA 4/UTO) auf ETCS und weitere ZSS-Umsysteme. Dafür werden die verschiedenen Rahmenbedingungen systematisch untersucht. Es werden Basisfunktionen und Umsysteme aufgestellt, um den GoA 4-Betrieb zu beschreiben. Es wird gezeigt, dass der GoA 4-Betrieb zum aktuellen Zeitpunkt in Deutschland nicht rechtssicher durchführbar ist und die aktuellen betrieblichen Regelwerke nicht geeignet sind. Die Arbeit kommt zu dem Schluss, dass ETCS für den GoA 4-Betrieb geeignet und eine Weiterentwicklung der Spezifikation angebracht ist. Es entstehen neue Schnittstellen. Ein Vergleich der Automatisierungsgrade offenbart teils deutliche systemische Unterschiede. Die Fernsteuerung der Fahrzeuge und Fahrzeugbedienungen ist ein elementares System zur Anwendung in der Rückfallebene in niedrigeren Automatisierungsgraden. Insgesamt besteht ein hoher Anpassungsaufwand gegenüber den aktuell gültigen Anforderungen, was sich z. B. durch signifikant höhere Konnektivitätsanforderungen zeigt.

ATO, CCS, ETCS, GoA, LST, OCORA, RCA, Umsysteme, UTO, ZSS

## **Abstract**

The objective of this diploma thesis is to analyse the effects of fully automatic rail operations (GoA 4/UTO) on ETCS and further CCS systems. For this purpose, the various framework conditions are systematically investigated. Basic functions and further systems are defined in order to describe UTO. It is shown that UTO is not legally feasible in Germany at present and that the current operational regulations are not suitable. This thesis concludes that ETCS is suitable for application in GoA 4 and that the further development of the specification is reasonable. New interfaces are emerging. A comparison between the grades of automation partly reveals significant systemic differences. The remote control of vehicles and vehicle operations is a fundamental system for use in the fall-back level at lower grades of automation. Overall, there is a high need for adjustments compared to the currently existing requirements, which is shown, e. g., by significantly higher connectivity requirements.

## **Bibliografischer Nachweis**

Fabian Gaebler

Auswirkungen des vollautomatischen Bahnbetriebs auf ETCS und weitere Umsysteme

Diplomarbeit, Technische Universität Dresden

Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“, Institut für Bahnsysteme und Öffentlichen Verkehr, Professur Verkehrssicherungstechnik

96 Seiten, 23 Abbildungen, 20 Tabellen, 122 Quellen

Anhang: 10 Seiten, 4 Abbildungen, 0 Tabellen

# Vorwort

Diese Diplomarbeit entstand von Januar 2022 bis Juni 2022 an der Technischen Universität Dresden in Kooperation mit der SIGNON Deutschland GmbH. Für die stets konstruktive und vertrauensvolle Zusammenarbeit möchte ich mich bei meinem universitären Betreuer an der Professur für Verkehrssicherungstechnik

– Dipl.-Ing. Richard Kahl

herzlich bedanken.

Der SIGNON Deutschland GmbH danke ich für die Möglichkeit der Betreuung und Bearbeitung eines spannenden und komplexen Themas. Mein Praxisbetreuer

– Dipl.-Ing. Michael Krahl

unterstützte mich stets durch fachliche Hinweise und konstruktive Kritik zu meinen Gedanken und Überlegungen. Dafür möchte ich mich herzlich bedanken.

Einen weiteren Dank möchte ich meinen Eltern, insbesondere meiner Mutter Kirsten, für das intensive Korrekturlesen der Arbeit aussprechen.

Ich hoffe, dass diese Arbeit durch ihre systematischen Untersuchungen, den ganzheitlichen Betrachtungsansatz sowie den geäußerten Diskussionspunkten einen wichtigen Beitrag zur Modernisierung und Stärkung der Bahn liefert.

## Überarbeitungshinweis

Dieses Dokument entspricht nicht der zur Bewertung eingereichten Version der Diplomarbeit. Gegenüber dem Original sind einzelne formale Fehler korrigiert worden. Es wurden keine inhaltlichen Änderungen vorgenommen.

# Thesen zur wissenschaftlichen Arbeit

1. Die aktuell gültigen rechtlichen Rahmenbedingungen lassen einen vollautomatischen Bahnbetrieb (GoA 4) im deutschen Vollbahnnetz nicht zu.
2. Die aktuellen betrieblichen Regelwerke sind für den vollautomatischen Bahnbetrieb nicht geeignet. Es besteht Anpassungsbedarf.
3. Bei der Umsetzung des vollautomatischen Bahnbetriebs sind verschiedene Verkehrsarten und Marktsegmente zu berücksichtigen. Diese besitzen leicht unterschiedliche Basisfunktionen und schränken die Anwendung bestimmter Automatisierungsgrade ein.
4. Zur Beschreibung des vollautomatischen Bahnbetriebs eignet sich ein stufenbasiertes, literaturorientiertes Vorgehen mit Erstellung von Basisfunktionen. Funktionsallokationen ermöglichen weiterführende Untersuchungen und Vergleiche.
5. Im vollautomatischen Bahnbetrieb sind neue Umsysteme notwendig, um die bisher manuell vom Betriebspersonal durchgeführten Funktionen automatisch auszuführen.
6. ETCS ist als zukunftsicheres Kernsystem für den Einsatz im vollautomatischen Bahnbetrieb geeignet.
7. Der vollautomatische Bahnbetrieb stellt neue Anforderungen an ETCS, bei denen eine Weiterentwicklung der Spezifikation sinnvoll erscheint. Neue Schnittstellen sind notwendig, da weitere Eingangssignale vorliegen. Bestimmte Funktionalitäten werden nicht mehr benötigt.
8. Zwischen den Automatisierungsgraden existieren teils deutliche systemische Unterschiede. In der Rückfallebene ist mit Remote ein neues Umsystem notwendig. Bei der Systementwicklung sind neue Herausforderungen der Informationsübertragung und -visualisierung in der Rückfallebene zu berücksichtigen.
9. Die Fernsteuerung von Fahrzeug und Fahrzeugbedienungen (Remote) ist ein elementares System, um bei Abweichungen vom Regelbetrieb in einem niedrigeren Automatisierungsgrad eine Entstörung durch das Betriebspersonal durchführen zu können.
10. Es besteht ein hoher Anpassungsaufwand gegenüber den aktuell gültigen Anforderungen, was sich u. a. durch Änderungen an den betrieblichen Prozessen, der Entwicklung neuer Umsysteme sowie erhöhten Konnektivitätsanforderungen zeigt.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>VI</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>VII</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>VIII</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>XIII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation	1
1.2 Einordnung der Arbeit in das Gesamtsystem Bahn	2
1.3 Grundlagen	3
1.3.1 Nutzen des vollautomatischen Bahnbetriebs	3
1.3.2 Automatisierungsgrade	4
1.3.3 Grundbegriffe	5
1.3.4 Abgrenzung der Arbeit zu weiteren Themengebieten	7
1.4 Methodik und Struktur der Arbeit	8
<b>2 Rahmenbedingungen des vollautomatischen Bahnbetriebs</b>	<b>10</b>
2.1 Verkehrsarten und Marktsegmente	10
2.2 Rechtliche Rahmenbedingungen	12
2.2.1 Gesetzlicher Rahmen	12
2.2.2 Beispiel: Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung	12
2.2.3 Allgemeine rechtliche Aspekte: Haftung	13
2.2.4 Abgeleitete Anforderungen und Anpassungsbedarf	14
2.3 Betriebliche Rahmenbedingungen	14
2.3.1 Betriebsinterne Regelwerksstruktur	14
2.3.2 Automatisierungspotential der Personalaufgaben am Beispiel der Fahr- dienstvorschrift der Deutschen Bahn	15
2.3.3 Zwischenfazit	16
2.3.4 Abgeleitete Anforderungen an betriebliche Vorschriften	16
2.3.5 Betriebliches Zielbild der Deutschen Bahn	18
2.4 Technische Rahmenbedingungen	20
2.4.1 Einführung in ETCS	20
2.4.2 ETCS und Automatisierung	23
2.4.3 Digitale Schiene Deutschland	24
2.4.4 Reference CCS Architecture	25
2.4.5 Advanced Protection System	28
2.4.6 Open CCS On-board Reference Architecture	28

2.4.7	Weitere Initiativen	29
2.5	Sicherheit	29
2.6	Ausgangsbasis	30
2.7	Zusammenfassung	31
<b>3</b>	<b>Funktionen und Umsysteme des vollautomatischen Bahnbetriebs</b>	<b>32</b>
3.1	Systematisches Vorgehen	32
3.2	Übergeordnete Basisfunktionen	33
3.2.1	Vorüberlegungen	33
3.2.2	Mehrstufiger Ansatz zur Funktionsermittlung	34
3.2.3	Ergebnis	35
3.3	Wesentliche Umsysteme	37
3.4	Funktionsallokation	40
3.5	Zwischenfazit	42
3.6	Diskussion	42
3.7	Zusammenfassung	43
<b>4</b>	<b>Einfluss des vollautomatischen Bahnbetriebs auf ETCS</b>	<b>44</b>
4.1	Untersuchungsgegenstand	44
4.2	Betriebsarten	44
4.2.1	Vorüberlegungen und Methodik	44
4.2.2	Nicht relevante Betriebsarten	46
4.2.3	Relevante Betriebsarten	47
4.2.4	Fazit und weitere Überlegungen	50
4.3	Prozeduren	52
4.3.1	Vorüberlegungen	52
4.3.2	Bewertung	54
4.3.3	Beispiel: Beginn einer Zugfahrt (Prozedur Start of Mission)	55
4.3.4	Fazit und weitere Überlegungen	56
4.4	Weitere Aspekte	57
4.4.1	Streckenbedingungen	57
4.4.2	Gleisfreiprüfung	58
4.4.3	Neue Eingangssignale von Umsystemen	58
4.5	Zusammenfassung	59
<b>5</b>	<b>Systemische Unterschiede der Automatisierungsgrade</b>	<b>61</b>
5.1	Vorüberlegungen	61
5.1.1	Motivation	61
5.1.2	Notwendigkeit der Fernsteuerung im Vollbahnnetz	61
5.1.3	Vorgehensweise	62
5.1.4	Generelle Vorbemerkungen	63
5.2	Fahrerloser Bahnbetrieb (GoA 3)	63
5.3	Halbautomatischer Bahnbetrieb (GoA 2)	64
5.4	Manueller Bahnbetrieb (GoA 1)	65
5.5	Zusammenfassung und weitere Überlegungen	66

<b>6</b>	<b>Vertiefte Betrachtung ausgewählter Aspekte</b>	<b>72</b>
6.1	Fernsteuerung von Fahrzeug und Fahrzeugbedienungen . . . . .	72
6.1.1	Umsystem <i>Remote</i> . . . . .	72
6.1.2	Tätigkeiten des Train Operators . . . . .	73
6.1.3	Arbeitsumgebung . . . . .	73
6.1.4	Arbeitsplatzgestaltung . . . . .	74
6.1.5	Arbeitsbelastung . . . . .	75
6.2	Zukünftig benötigte Kommunikationsinfrastruktur . . . . .	75
6.2.1	Anwendungsfälle . . . . .	75
6.2.2	Nicht-funktionale Anforderungen (Konnektivitätsanforderungen) . . .	76
6.2.3	Herausforderungen . . . . .	76
6.2.4	Fazit und weitere Überlegungen . . . . .	79
6.3	Verkehrsarten und Automatisierungsgrade . . . . .	80
6.4	Zusammenfassung . . . . .	81
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>82</b>
7.1	Fazit . . . . .	82
7.2	Empfehlung zu weiteren Entwicklungsschritten . . . . .	83
7.3	Weiterer Untersuchungsbedarf . . . . .	85
7.4	Ausblick . . . . .	86
	<b>Literatur</b>	<b>87</b>
	<b>Anhang</b>	<b>97</b>

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Grundbegriffe der Automatisierung und ihre Verwendung	6
1.2	Einordnung von ATO in das Gesamtsystem	6
1.3	Unterschied zwischen automatischem und autonomen Schienenverkehr	7
1.4	Überblick über Methodik und Struktur der Arbeit	9
2.1	Klassifizierung der Verkehrsarten und Marktsegmente	11
2.2	Regelungspyramide	12
2.3	Entwicklungsstufen des BZB der DB	19
2.4	BZB als Basis eines Anforderungsmanagementprozesses	20
2.5	ERTMS-Architektur	21
2.6	AoE: ATO-Referenzarchitektur	23
2.7	AoE: Funktionale ATO-High-Level-Architektur	24
2.8	Übersicht über die logische Architektur von RCA	27
3.1	Vorgehensweise zur Erarbeitung der Funktionen und Umsysteme	32
3.2	Architektur der wesentlichen Umsysteme des vollautomatischen Bahnbetriebs	37
4.1	Entscheidungsbaum ETCS-Betriebsarten	46
4.2	Entscheidungsbaum ETCS-Prozeduren	54
4.3	Sequenzdiagramm Prozedur SoM im manuellen Bahnbetrieb	55
4.4	Mögliche Informationsflüsse bei neuen Eingangssignalen von Umsystemen	59
5.1	Vorgehensweise des Vergleichs zwischen den Automatisierungsgraden	62
5.2	Architektur der wesentlichen Umsysteme in GoA3, GoA2 und GoA1	67
6.1	Schematische Darstellung der Arbeitsumgebung des TO	74
6.2	Beispielhafte HMI-Anzeige: Ferngesteuerter Systemzustand nach manueller Übernahme eines Zuges durch den TO	74
6.3	Vergleich der Anforderungen an die Datenraten	81
C.1	EULYNX Systemdefinition/Systemarchitektur	104
C.2	Prozesslandschaft Bahnbetrieb	105
C.3	Flowchart der Prozedur Start of Mission	106
C.4	Seitenansicht der WSPG	107

# Tabellenverzeichnis

1.1	Automatisierungsgrade	5
2.1	Charakteristik und resultierende Probleme bisheriger betriebsinterner Regelwerke	15
2.2	Vergleich Fahrdienstvorschrift	18
3.1	Vor- und Nachteile verschiedener Varianten zur Funktionsermittlung	34
3.2	Funktionsblöcke und Basisfunktionen GoA 4	36
3.3	Funktionsallokation GoA 4	41
4.1	ETCS-Betriebsarten ohne GoA 4-Relevanz (Kategorie 1)	47
4.2	ETCS-Betriebsarten mit GoA 4-Relevanz (Kategorie 4)	47
4.3	ETCS-Betriebsarten mit GoA 4-Relevanz (Kategorie 2)	48
4.4	ETCS-Betriebsarten mit GoA 4-Relevanz (Kategorie 3)	49
4.5	Überblick über die in [ERA16] definierten Prozeduren	53
5.1	Funktionsallokation GoA 3	69
5.2	Funktionsallokation GoA 2	70
5.3	Funktionsallokation GoA 1	71
6.1	Annahmen zu nicht-funktionalen Anforderungen für ausgewählte Anwendungsfälle in GoA 4	77
6.2	GoA 4-Datenverkehr ohne kritische Videos	78
6.3	GoA 4-Datenverkehr einschließlich Videoübertragungen und Sensordaten	78
7.1	Zusammenfassung des GoA 4-Einflusses auf die Betriebsarten	83
7.2	Empfehlungen zu weiteren Entwicklungsschritten für den GoA 4-Betrieb mit Abschätzungen zur zeitlichen Umsetzbarkeit	84

# Abkürzungsverzeichnis

## A

AD	Automatic Driving (ETCS-Betriebsart)
AEG	Allgemeines Eisenbahngesetz
AFB	Automatische Fahr- und Bremssteuerung
AoE	ATO over ETCS
APS	Advanced Protection System
ATAF	Automatic Track Ahead Free (ETCS)
ATC	Automatic Train Control
ATO	Automatic Train Operation
ATP	Automatic Train Protection
ATS	Automatic Train Supervision

## B

BG	Balisengruppe
BOStrab	Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung
BSS	Bahnsteigsicherungssystem (Umsystem)
BTZ	Betrieblich-Technisches Zielbild
BÜ	Bahnübergang
BZB	Betriebliches Zielbild

## C

CBTC	Communications-based Train Control
CCS	Command, Control and Signalling (siehe auch ZZS)
CES	Conditional Emergency Stop (ETCS)
CMD	Cold Movement Detection (ETCS)

## D

DAC4EU	Digital Automatic Coupling for Europe
DAK	Digitale Automatische Kupplung
DAS	Driver Advisory System (Fahrerassistenzsystem)
DB	Deutsche Bahn
DBB	Digitaler Bahnbetrieb
DBS	Digitales Bahnsystem
DKS	Digitaler Knoten Stuttgart
DL	Downlink
DLST	Digitale Leit- und Sicherungstechnik
DSD	Digitale Schiene Deutschland
DSH	Digitale S-Bahn Hamburg
DSTW	Digitales Stellwerk
DTO	Driverless Train Operation

<b>E</b>	
EBO	Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung
ECC	Electronic Communications Committee
EIU	Eisenbahninfrastrukturunternehmen
EN	Europäische Norm
EoA	End of Authority (ETCS-Fahrterlaubnisende)
EoM	End of Mission (ETCS-Prozedur)
ERA	Europäische Eisenbahnagentur (European Union Agency for Railways)
ERTMS	European Rail Traffic Management System
ERJU	Europe's Rail Joint Undertaking
ESG	ETCS signalgeführt
ESTW	Elektronisches Stellwerk
ETCS	European Train Control System
ETCS-OB	ETCS-On-board (Fahrzeugseitiges ETCS-Teilsystem)
ETCS-TS	ETCS-Trackside (Streckenseitiges ETCS-Teilsystem)
ETML	European Traffic Management Layer
EU	Europäische Union
EUG	ERTMS Users Group
EULYNX	European Initiative Linking Interlocking Subsystems
EVU	Eisenbahnverkehrsunternehmen
E2E	Ende-zu-Ende
<b>F</b>	
Fdl	Fahrdienstleiter
FRMCS	Future Railway Mobile Communication System
FS	Full Supervision (ETCS-Betriebsart)
FV-NE	Fahrdienstvorschrift für Nichtbundeseigene Eisenbahnen
<b>G</b>	
GoA	Grade of Automation
GSM-R	Global System for Mobile Communications – Rail
5G	Fünfte Generation (Mobilfunkstandard)
<b>H</b>	
HGV	Hochgeschwindigkeitsverkehr
HMI	Human-Machine Interface
HL3	Hybrid Level 3 (ETCS)
<b>I</b>	
ID	Identifikationsnummer
IEC	International Electrotechnical Commission
IO	Generic IO (EULYNX-Teilsystem)
IS	Isolation (ETCS-Betriebsart)
ISM	Incident Solving Manager (RCA-System)
IT	Informationstechnik
<b>J</b>	
JP	Journey Profile (AoE)

<b>K</b>	
KI	Künstliche Intelligenz
KUSS	Kunden- und Systemservice
<b>L</b>	
LC	Level Crossing (EULYNX-Teilsystem)
LCC	Life-cycle Costs
Lkw	Lastkraftwagen
LRBG	Last Relevant Balise Group (ETCS)
LS	Limited Supervision (ETCS-Betriebsart)
LST	Leit- und Sicherungstechnik
L1	Level 1 (ETCS)
L2	Level 2 (ETCS, Umsetzungsvariante im Netz der DB)
L2 oS	Level 2 ohne Signale (ETCS, Umsetzungsvariante im Netz der DB)
L3	Level 3 (ETCS)
<b>M</b>	
MA	Movement Authority (ETCS-Fahrterlaubnis)
MBSE	Model-based Systems Engineering
MP	Movement Permission (APS-Fahrterlaubnis/Fahrstraße)
msg	Message
<b>N</b>	
NE	Nichtbundeseigene Eisenbahnen
NL	Non Leading (ETCS-Betriebsart)
NP	No Power (ETCS-Betriebsart)
NSB	Neue Sekundärbahn
NTO	Non-automated Train Operation
<b>O</b>	
OB	On-board (fahrzeugseitig)
OCC	Operation Control Center
OCORA	Open CCS On-board Reference Architecture
OS	On Sight (ETCS-Betriebsart)
<b>P</b>	
P	Point (EULYNX-Teilsystem)
p	Paket
PS	Passive Shunting (ETCS-Betriebsart)
PSD	Platform Screen Doors
PT	Post Trip (ETCS-Betriebsart)
<b>Q</b>	
QoS	Quality of Service
<b>R</b>	
RAMS	Reliability, Availability, Maintainability, Safety
RBC	Radio Block Centre (ETCS-Zentrale)
RCA	Reference CCS Architecture
Ril	Richtlinie
RV	Reversing (ETCS-Betriebsart)

<b>S</b>	
SB	Stand By (ETCS-Betriebsart)
SCI	Standard Communication Interface
SF	System Failure (ETCS-Betriebsart)
SH	Shunting (ETCS-Betriebsart)
SIL	Safety Integrity Level
SL	Safety Logic (RCA-System)
SL	Sleeping (ETCS-Betriebsart)
SM	Safety Manager (RCA-System)
SN	National System (ETCS-Betriebsart)
SNCF	Société nationale des chemins de fer français
SoM	Start of Mission (ETCS-Prozedur)
SP	Segment Profile (AoE)
SR	Staff Responsible (ETCS-Betriebsart)
SRS	System Requirements Specification
SS	SUBSET
STO	Semi-automated Train Operation
Stw	Stellwerk
S2R	Shift2Rail
<b>T</b>	
TAF	Track Ahead Free (ETCS)
TCMS	Train Control Management System
TDO	Train Door Operation (AoE)
TDS	Train Detection System (EULYNX-Teilsystem)
TEP	Technologie-Entwicklungsplan
Tf	Triebfahrzeugführer
TFM	Technisches Funktionsmanagement
TMS	Traffic Management System
TO	Train Operator
TR	Trip (ETCS-Betriebsart)
TRStrab FoF	Technische Regeln für Straßenbahnen – Fahrbetrieb ohne Fahrzeugführer
TS	Trackside (streckenseitig)
TSI	Technische Spezifikation für die Interoperabilität
TPR	Train Positioning Report (ETCS)
TZB	Technisches Zielbild
<b>U</b>	
UES	Unconditional Emergency Stop (ETCS)
UITP	International Association of Public Transport
UL	Uplink
UML	Unified Modeling Language
UN	Unfitted (ETCS-Betriebsart)
UNISIG	Union Industry of Signalling
URLLC	Ultra-Reliable and Low-Latency Communication
UTO	Unattended Train Operation

**V**

V2I Vehicle-to-Infrastructure

V2V Vehicle-to-Vehicle

**W**

WLAN Wireless Local Area Network

WSPG Wire-style Platform Gates

**Z**

ZZS Zugsteuerung, Zugsicherung und Signalgebung (siehe auch CCS)

# Symbolverzeichnis

Symbol	Bedeutung	Einheit
$C$	Datenübertragungsrate, Datenrate	kbit/s, Mbit/s
$\lambda$	(menschliche) Fehlerrate	Fehler/Handlung
$v$	Geschwindigkeit	km/h
$L$	Latenz	ms, s
$PR$	Paketzuverlässigkeit	[-]

Hinweis: Es sind ausschließlich die in der Arbeit verwendeten Einheiten angegeben.

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Der Verkehr im Allgemeinen, jedoch insbesondere der Bahnverkehr, steht vor großen Herausforderungen. Die neuen Anforderungen zum Erreichen der Klimaschutzziele, der Modernisierungsbedarf sowie der Innovationsdruck führen zur einmaligen Gelegenheit, in den nächsten Jahren weitreichende Schritte der Digitalisierung des Bahnsystems zu setzen und die Einführung des vollautomatischen Bahnbetriebs voranzutreiben.

### Klimaschutz

Politik und Gesellschaft stellen hohe Anforderungen an das Bahnsystem. Die Eisenbahn spielt als *grünes* Verkehrsmittel eine Schlüsselrolle bei der Erfüllung der Klimaschutzziele der Europäischen Union (EU) und der Bundesrepublik Deutschland. Gemäß dem Koalitionsvertrag der neuen deutschen Bundesregierung soll sich die Verkehrsleistung im Personenverkehr verdoppeln. Ebenfalls sollen die Investitionsmittel für die Infrastruktur der Deutschen Bahn (DB) erhöht werden (vgl. [Koa21]).

### Modernisierungsbedarf

Die Umsetzung der ehrgeizigen politischen Ziele kann jedoch nur mit einem leistungsfähigen Bahnsystem gelingen. Es ist Konsens, dass der Zustand des deutschen Eisenbahnnetzes suboptimal ist (vgl. [Alb20], [Ver19], [Wei20]). So erreichten beispielsweise 2021 lediglich 75,2 % aller Fernverkehrszüge pünktlich, d. h. mit weniger als sechs Minuten Verspätung, ihr Ziel (vgl. [Deu22c]).

Aktuell wird das deutsche Eisenbahnnetz am Rande seiner Leistungsfähigkeit betrieben, teilweise ist diese bereits überschritten. Wenngleich die Corona-Pandemie eine Zäsur darstellt, erholen sich die Fahrgastzahlen bereits deutlich. Ein weiteres Wachstum ist zu erwarten. Vor Beginn der Corona-Pandemie erzielte die DB Fernverkehr einen Fahrgastrekord von rund 151 Millionen Fahrgästen im Jahr 2019 (vgl. [Deu20]).

Durch die Sparpolitik vergangener Jahre und Jahrzehnte ist ein Investitionsstau entstanden. Erhebliche Investitionen sind notwendig, um *nur* den Status quo erhalten zu können. Zugleich muss auch in den Ausbau und in die Modernisierung investiert werden. Diese Modernisierungsprojekte eröffnen die Möglichkeit, neue Technologien und Innovationen zu entwickeln und einzusetzen. Die DB gibt dabei u. a. das Ziel aus, 30 % mehr Verkehr auf der Infrastruktur bewältigen zu können (vgl. [Deu22a]).

### **Innovationsdruck**

Die Eisenbahn steht in direkter Konkurrenz zum Straßen-, Schiffs- und Luftverkehr. Getrieben durch Innovationen entwickelt der Straßenverkehr aktuell Möglichkeiten des autonomen Fahrens. Was vor einigen Jahren noch als Zukunftsvision galt, ist inzwischen schon Realität: autonom fahrende Autos, Busse oder auch Lastkraftwagen (Lkw) können in den nächsten Jahren, sofern die rechtlichen Rahmenbedingungen dies ermöglichen, eingesetzt werden. Diese Entwicklung, insbesondere die Flexibilisierung der Verkehre in Zeiten des Fachkräftemangels, setzt die Eisenbahn unter Druck. So lag der Anteil der Bahn am Güterverkehr in 2019 lediglich bei 19 % (zum Vergleich: Lkw 71,2 %, vgl. [AI122b]). Damit die Bahn am Markt bestehen kann, müssen Innovationen vorangetrieben werden. Wenn auf der Straße mit ihren drei Freiheitsgraden autonomes Fahren möglich ist, so muss es im Vollbahnnetz ebenfalls möglich sein.

### **Konsequenz**

Die aktuelle Konstellation führt so zu der einmaligen Chance, den Bahnbetrieb neu zu denken und zu organisieren. Dies plant die DB mit der Sektorinitiative Digitale Schiene Deutschland (DSD) umzusetzen (vgl. [Büh21]). Durch den geplanten flächendeckenden Einsatz moderner digitaler Stellwerke<sup>1</sup> (DSTW) in Verbindung mit dem Zugbeeinflussungssystem ETCS (European Train Control System) und dem Einsatz des automatischen Fahrens mit ATO (Automatic Train Operation) werden erste weitreichende Schritte hin zu einem vollautomatischen Bahnbetrieb gesetzt.

Während es für ATO-Anwendungen bereits verschiedene Lösungsansätze gibt, stellt die Anwendung des vollautomatischen Betriebs Vollbahnen vor große Herausforderungen. Für die zahlreichen betroffenen Themenfelder, wie beispielsweise Technik, Betrieb, Sicherheit und rechtliche Rahmenbedingungen, gibt es erste Denkansätze und Untersuchungen. Es fehlen jedoch umfangreiche Analysen und Konzepte zum einen für den Regelbetrieb und zum anderen insbesondere für die Rückfallebenen beim Wechsel zwischen verschiedenen Automatisierungsgraden. Diese Lücke möchte die Diplomarbeit füllen und die Themen genauer untersuchen.

## **1.2 Einordnung der Arbeit in das Gesamtsystem Bahn**

Gegenstand dieser Arbeit ist die Betrachtung der Auswirkungen des vollautomatischen Bahnbetriebs auf ETCS und weitere Umsysteme. Das Bahnsystem kann in vier Teilsysteme aufgeteilt werden, die im Systemverbund zusammen wirken (vgl. [Mas18]):

- Fahrzeug
- Fahrweg

---

<sup>1</sup>Im Stellwerk (Stw) wurden schon immer digitale Zustände verarbeitet (vgl. [Bac18]). Somit ist auch die Vorgängergeneration des DSTW, das elektronische Stellwerk (ESTW), *digital*. Beim DSTW handelt es sich um die Weiterentwicklung des ESTW mit einer veränderten, standardisierten Anlagenstruktur. Insbesondere wird eine Trennung von Energie und Daten vorgenommen.

- Betrieb
- Leit- und Sicherungstechnik (LST)

Der vollautomatische Bahnbetrieb bezieht sich auf das Gesamtsystem Bahn. Schwerpunkt der Arbeit wird auf den Systemen der LST liegen. Aufgrund der Abhängigkeiten der Teilsysteme im Systemverbund untereinander ist eine isolierte Betrachtung nicht sinnvoll. Es ist somit erforderlich, ggf. die Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Teilsystemen zu berücksichtigen. Eine gute Einführung in das Gesamtsystem Bahn findet sich in [Pac21c].

## 1.3 Grundlagen

### 1.3.1 Nutzen des vollautomatischen Bahnbetriebs

Die aktuellen Programme und Initiativen zur Einführung des vollautomatischen Bahnbetriebs verfolgen mehrere Ziele. Der vollautomatische Bahnbetrieb ist dabei „viel mehr als fahrerloses Fahren“ [Rod19]. Der Nutzen kann grundsätzlich in wirtschaftliche und betriebliche Faktoren unterteilt werden. Letztlich werden sich auch die betrieblichen Faktoren in wirtschaftlichen Effekten niederschlagen, die sich jedoch in den einzelnen Marktsegmenten<sup>2</sup> unterscheiden können (vgl. [Pac17]). Im Wesentlichen werden folgende Ziele zur besseren Nutzung der Ressourcen verfolgt:

- Betriebskosten reduzieren
- Zugverkehr bedarfsorientiert gestalten
- Fahrkomfort verbessern
- Personalprobleme lösen (durch Reduzierung des Bedarfs an Fahr- und Betriebspersonal)
- Pünktlichkeit verbessern (vgl. [Mor21])
- Energie einsparen
- Betriebliche Leistungsfähigkeit erhöhen (vgl. [Pac17])

Die Einsparung von Personalkosten, z. B. durch Wegfall des Fahrpersonals, wird oftmals überschätzt und kann nur eintreten, wenn die technische Lösung nicht teurer ist (vgl. [Pac17]). Einige Ziele, wie z. B. die Einsparung von Energie oder die Erhöhung der betrieblichen Leistungsfähigkeit, können bereits ohne Vollautomatisierung des Bahnbetriebs erreicht werden (siehe z. B. [Tas18]). Es existieren somit verschiedene Stufen der Automatisierung, die im nächsten Abschnitt vorgestellt werden.

---

<sup>2</sup>Eine Klassifizierung wird in [Abschnitt 2.1](#) vorgenommen.

### 1.3.2 Automatisierungsgrade

Bedingt durch die Systemeigenschaften der Eisenbahn, insbesondere der Spurführung, sind Bahnsysteme automatisierungsfreundlich. So wird das System Bahn seit Beginn der Eisenbahn vor über 180 Jahren immer weiter automatisiert. Insbesondere im Nahverkehr finden sich bereits vollautomatische Bahnen ohne Fahrer<sup>3</sup>, sodass die Entwicklung einer einheitlichen Einteilung notwendig wurde. Es wird daher in verschiedene Automatisierungsgrade unterschieden.

Der Automatisierungsgrad (Grade of Automation, GoA) des Zugbetriebs ist in IEC 62290-1 (*Railway application – Urban guided transport management and command/control systems – Part 1: System principles and fundamental concepts*) definiert. Es werden dabei folgende Automatisierungsgrade unterschieden (vgl. [IEC06]):

**GoA0: On-sight Train Operation** Der Fahrer ist in vollem Umfang für die sichere Fahrzeugführung verantwortlich und kein System wird für die Überwachung seiner Handlungen benötigt. Allerdings können Weichen oder einzelne Streckenabschnitte teilweise von einem System überwacht werden.

**GoA 1: Non-automated Train Operation (NTO)** Das Fahrzeug wird auf technisch gesicherten Fahrwegen vom Fahrer geführt, dieser überwacht vom vorderen Führerstand aus den Fahrweg und beachtet die gültige Signalisierung. In gefährlichen Situationen bremst der Fahrer den Zug ab. Es findet eine technische Überwachung (punktförmig oder kontinuierlich) des Fahrers und der zulässigen Fahrweise statt. Die sichere Abfertigung am Bahnsteig ist Aufgabe des Personals.

**GoA2: Semi-automated Train Operation (STO)** Der Fahrer ist weiterhin für die Überwachung des Fahrwegs vom vorderen Führerstand aus verantwortlich, in gefährlichen Situation bremst er den Zug ab. Die Fahr- und Bremssteuerung wird vom System ausgeführt. Es findet eine kontinuierliche Überwachung der Geschwindigkeit statt. Die sichere Abfertigung am Bahnsteig ist Aufgabe des Personals.

**GoA3: Driverless Train Operation (DTO)** Zusätzliche Maßnahmen sind notwendig: Es befindet sich kein Fahrer mehr im Führerstand, der den Fahrweg überwacht und den Zug in gefährlichen Situationen abbremst. Ein Zugbegleiter auf dem Fahrzeug ist notwendig. Die sichere Abfertigung am Bahnsteig kann vom System oder vom Personal durchgeführt werden.

**GoA4: Unattended Train Operation (UTO)** Es sind zusätzliche Maßnahmen notwendig, da sich kein Zugbegleiter mehr auf dem Zug befindet. Die sichere Abfertigung am Bahnsteig muss automatisch geschehen. Im Speziellen unterstützt das System die Erkennung und Behandlung von gefährlichen und Not-Situationen, wie z. B. die Evakuierung von Passagieren. Bestimmte gefährliche oder Not-Situationen, wie Entgleisung oder Rauch- bzw. Feueralarm, können das Eingreifen von Personal erforderlich machen.

<sup>3</sup>Im Rahmen der Arbeit wird der in der Norm [IEC06] genutzte Begriff *Fahrer* (im Original *driver*) verwendet. Im Vollbahnbereich der DB wird aufgrund von Verordnungen der Begriff *Triebfahrzeugführer (Tf)* genutzt. Im Sinne einer einfachen und einheitlichen Lesbarkeit der Arbeit findet keine Unterscheidung zwischen den Begriffen statt (sofern nicht gesondert angegeben). Die Rolle *Tf* ist eine Teilmenge der Rolle *Fahrer*.

Zur besseren Übersicht zeigt [Tabelle 1.1](#) zusammenfassend die Automatisierungsgrade.

Automatisierungsgrad (Grade of Automation)	Fahrbetrieb	Anfahren	Bremsen	Türabfertigung	Betrieb im Störfall
GoA 0 	Fahrt auf Sicht	Fahrer	Fahrer	Fahrer	Fahrer
GoA 1 	Manuelle Fahrt mit Zugbeeinflussung (ATP)	Fahrer	Fahrer	Fahrer	Fahrer
GoA 2 	Halbautomatischer Zugbetrieb mit Fahrer (STO)	Automatik	Automatik	Fahrer	Fahrer
GoA 3 	Begleiteter, fahrerloser Zugbetrieb (DTO)	Automatik	Automatik	Zugbegleiter	Zugbegleiter
GoA 4 	Vollautomatischer, fahrerloser Zugbetrieb (UTO)	Automatik	Automatik	Automatik	Automatik

Tabelle 1.1: Automatisierungsgrade [[Sch20a](#)].

Abschließend sei angemerkt, dass diese Einteilung eher von akademischer und theoretischer Natur ist. So finden sich in der Praxis durchaus leicht unterschiedliche Umsetzungsarten und Bezeichnungen der Betriebsarten. Dies wird im nächsten Abschnitt thematisiert.

### 1.3.3 Grundbegriffe

Wie in [Unterabschnitt 1.3.2](#) bereits beschrieben, wird das System Bahn seit Anbeginn immer weiter automatisiert. Dabei kann der Zugbetrieb oder das gesamte Bahnsystem automatisiert werden. Aktuell befassen sich viele Publikationen mit dem Themenkomplex des (voll-)automatischen Bahnbetriebs. Die in der Norm IEC 62290-1 [[IEC06](#)] eingeführten und definierten Begriffe werden dabei nicht immer klar verwendet. Insbesondere die deutsche Übersetzung bietet einen gewissen Interpretationsspielraum. Zusätzlich kommt es zu Vermischungen mit Begrifflichkeiten aus dem Straßenverkehr.

An dieser Stelle sollen daher die verschiedenen Begriffe zusammengeführt und eingeordnet werden. Dafür wurden vier Publikationen und ein Vortrag herangezogen, die als qualitativ hochwertig eingestuft werden können und somit als Referenzdokumente dienen (vgl. [[Pac17](#)], [[Sch20a](#)], [[Hag21](#)], [[Nie17](#)], [[Nie19](#)]). Es wird explizit keine Bewertung der Begriffe in *geeignet* bzw. *ungeeignet* vorgenommen. Die Begriffe werden im entsprechendem Kontext verwendet, ihre Verwendung ist somit sinnvoll. Eine Übersicht über die verschiedenen Grundbegriffe in Bezug auf die Norm IEC 62290-1 und ihre Verwendung zeigt [Abbildung 1.1](#). Die in dieser Arbeit favorisierte deutsche Bezeichnung ist ebenfalls aufgeführt.

Beim *assistierten Fahren* unterstützen Assistenzsysteme den Fahrer, um Sicherheit, Leistungsfähigkeit sowie Energieverbrauch zu verbessern. Sie werden daher vorrangig beim *manuellen Bahnbetrieb* (GoA 1 bzw. NTO) eingesetzt (vgl. [[Nie17](#)]).

Der Begriff des *automatischen* bzw. *automatisierten Fahrens* wird als Schlag- oder Signalwort in vielen Publikationen verwendet und soll daher genauer betrachtet werden: Einer-

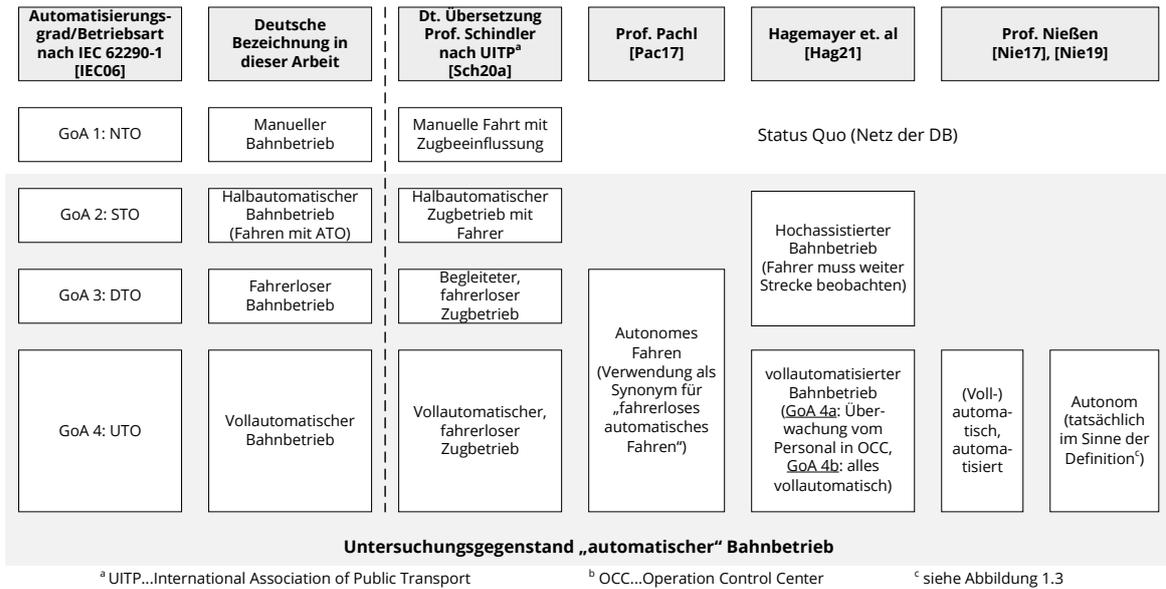


Abbildung 1.1: Grundbegriffe der Automatisierung und ihre Verwendung.

seits ist mit dem *automatischen* bzw. *automatisierten Fahren* der automatisch gesteuerte Zugbetrieb mit ATO gemeint. Im Projekt der Digitalen S-Bahn Hamburg (DSH) wird dies beispielsweise als *hochautomatisiertes Fahren* bezeichnet (vgl. [Sch21e]). Es handelt sich dabei um den *halbautomatischen Bahnbetrieb (Fahren mit ATO)*, also GoA2 bzw. STO. Gemäß [IEE04] ist ATO<sup>4</sup> das Subsystem innerhalb der ATC (Automatic Train Control), das eine oder alle Funktionen der Geschwindigkeitsregelung, des programmierten Anhaltens, der Türsteuerung, der Leistungsregelung oder andere Funktionen, die sonst dem Fahrer zugewiesen sind, ausführt. Somit ist ATO gemäß [IEE04] und [IEC06] ein Subsystem und streng genommen keine Betriebsart, auch wenn es hier oftmals zu einer Vermischung kommt. Die Einordnung von ATO in das Gesamtsystem ATC mit Zugbeeinflussung (Automatic Train Protection, ATP) und Leittechnik (Automatic Train Supervision, ATS) zeigt [Abbildung 1.2](#)<sup>5</sup>.

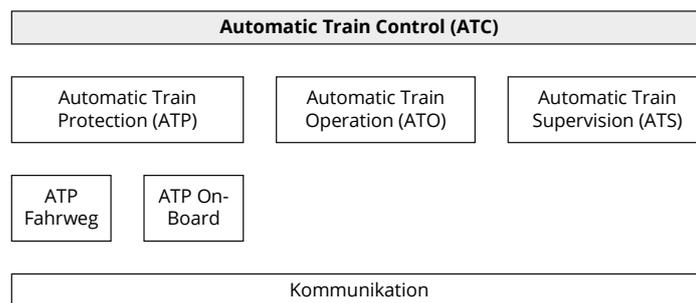


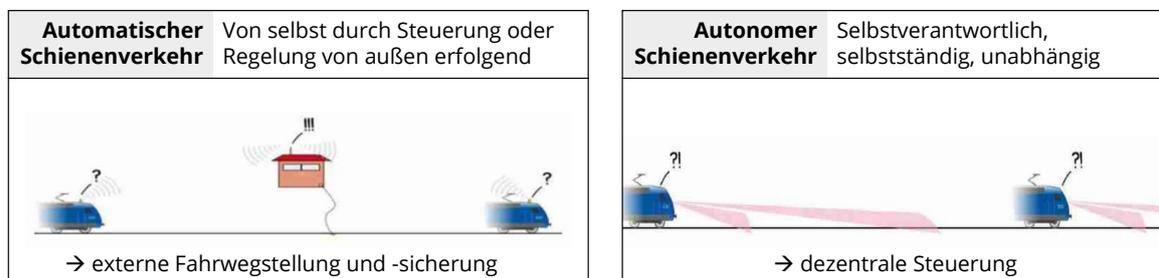
Abbildung 1.2: Einordnung von ATO in das Gesamtsystem (nach [Wic20]).

<sup>4</sup>Der nicht mehr gebräuchliche, analoge deutsche Begriff wäre AFB (Automatische Fahr- und Bremssteuerung).

<sup>5</sup>Begriffserläuterungen können bei Bedarf [Abschnitt B.2](#) entnommen werden.

Andererseits wird mit dem *automatischen* bzw. *automatisierten Fahren* der (voll-)automatische Zugbetrieb beschrieben, also das automatische Fahren eines Zuges ohne Fahrer. Dies entspricht dem *fahrerlosen Bahnbetrieb*, also GoA3 bzw. DTO. Sofern kein Zugbegleiter mehr auf dem Zug mitfährt, entspricht dies dem *vollautomatischen Bahnbetrieb* (GoA4 bzw. UTO). Die Aufgaben der Zugsteuerung übernimmt ATO, jedoch werden weitere Um Systeme, z. B. zur Entgleisungsdetektion, benötigt.

Für diese Stufe(n) hat sich aus dem Straßenverkehr der Begriff des *autonomen Fahrens* eingebürgert. Dieser ist zwar streng genommen nicht treffend, kann jedoch beibehalten werden (vgl. [Pac17]). Der Unterschied zwischen den Begriffen *automatisch* und *autonom* veranschaulicht [Abbildung 1.3](#). Für einzelne Verkehrsarten bzw. Marktsegmente, die in [Abbildung 2.1](#) klassifiziert sind, kann der Unterschied zwischen *automatisch* und *autonom* durchaus relevant werden (siehe dazu z. B. auch [Nie17]). Auf weitere Details soll hier nicht eingegangen werden.



**Abbildung 1.3:** Unterschied zwischen automatischem Schienenverkehr (links) und autonomen Schienenverkehr (rechts) (nach [Nie19]).

Es ist festzuhalten, dass bei den Begrifflichkeiten eine weiterführende Standardisierung sinnvoll erscheint. Eine Überarbeitung der IEC 62290-1, welche aus dem U-Bahn-Bereich stammt, erscheint im Hinblick auf die aktuellen Entwicklungen im Vollbahnsektor durchaus sinnvoll. Es wird empfohlen, weitergehende Untersuchungen durchzuführen.

### 1.3.4 Abgrenzung der Arbeit zu weiteren Themengebieten

Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem vollautomatischen Bahnbetrieb bei Vollbahnen in Deutschland. Das Zugbeeinflussungssystem ETCS ist dabei Kern der Betrachtungen, da dieses im Zuge des europäischen Interoperabilitätsgedankens gesetzt ist. Zudem ist es Basis mehrerer zukunftsweisender europäischer Standardisierungsinitiativen, wie RCA (Reference CCS Architecture) oder OCORA (Open CCS On-board Reference Architecture) (vgl. [Jan20b]). Diese werden in [Abschnitt 2.4](#) vorgestellt.

Im Gegensatz zum Vollbahnbereich besitzt der voll- oder halbautomatische Bahnbetrieb im Nahverkehr, insbesondere in U-Bahn-Systemen, eine jahrzehntelange Erfolgsgeschichte. Die ersten fahrer- und begleiterlosen U-Bahnen wurden bereits in den 1980er Jahren in Japan, Frankreich und Kanada in Betrieb genommen (vgl. [Rum10]). Durch den weltweiten Einsatz wird die technische, betriebliche und wirtschaftliche Machbarkeit des vollautomatischen Bahnbetriebs (im Nahverkehr) täglich bewiesen.

Moderne Systeme zur Zugsicherung und -steuerung von U-Bahnen (Communications-based Train Control, CBTC) sind geeignet, die gestellten Anforderungen der Gesellschaft an einen zukunftsfähigen Nahverkehr, insbesondere an Leistungsfähigkeit und Energieverbrauch, zu erfüllen (siehe z. B. [Brü17], [Rah11], [Dim21], [Sch18c]).

Der Einsatz von CBTC-Systemen wäre grundsätzlich auch im Vollbahnbereich denkbar. Die gesammelten Erkenntnisse und Erfahrungen aus dem Nahverkehrsbereich lassen sich ohne Weiteres nicht in den Vollbahnbereich übertragen. Es existieren wesentliche Unterschiede betreffend Fahrzeug, Infrastruktur, Umgebungsbedingungen, Betrieb, System und Betreiber (vgl. [Tas18]). Gemeinsamkeiten und Unterschiede bzgl. der Funktionalität, der Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit sowie den optimalen Einsatzfeldern von CBTC und ETCS können in [Sch20b] und [Sch19b] nachgelesen werden. Dass eine Kombination von ETCS und CBTC grundsätzlich möglich wäre, zeigt u. a. [Ste13]. Da CBTC-Systeme ausschließlich proprietär sind (vgl. [Sch21b]), erscheint der breite Einsatz im Vollbahnbereich unter den aktuellen Rahmenbedingungen weder politisch noch wirtschaftlich sinnvoll. In hochbelasteten Streckenabschnitten kann der Einsatz von CBTC in Kombination mit ETCS oder als Ersatz sinnvoll sein (siehe z. B. [Arp16], [Sie14]).

Aus den o. g. Gründen wird sich diese Arbeit im Weiteren ausschließlich mit dem europäischen und interoperablen Zugbeeinflussungssystem ETCS befassen. Es wird im Rahmen dieser Arbeit nicht auf die Anwendung von CBTC-Systemen bei Vollbahnen eingegangen.

## 1.4 Methodik und Struktur der Arbeit

Diese Arbeit untersucht systematisch die Auswirkungen des vollautomatischen Bahnbetriebs auf ETCS und weitere Umsysteme. Die gewonnenen Erkenntnisse bauen schrittweise aufeinander auf und beeinflussen die weiterführenden Analysen. Diese Methodik und die Struktur der Arbeit zeigt [Abbildung 1.4](#).

Nachdem in [Kapitel 1](#) die Motivation erläutert und relevante Grundlagen gelegt wurden, folgt in [Kapitel 2](#) eine Analyse der Rahmenbedingungen des vollautomatischen Bahnbetriebs. Es werden Anforderungen an den vollautomatischen Bahnbetrieb abgeleitet und der Anpassungsbedarf ermittelt. Die Ausgangsbasis für die weiteren Analysen wird definiert. Darauf aufbauend werden in [Kapitel 3](#) die für den vollautomatischen Bahnbetrieb notwendigen Funktionen und Umsysteme aufgestellt. Dafür wird ein mehrstufiges literaturorientiertes Verfahren angewendet. In einer Funktionsallokation werden den Systemen die entsprechenden Funktionen zugewiesen. Der Einfluss des vollautomatischen Bahnbetriebs auf ETCS wird in [Kapitel 4](#) näher analysiert. Insbesondere werden die Auswirkungen auf Prozeduren und Betriebsarten mittels Entscheidungsbäumen ermittelt und neue Anforderungen abgeleitet. Eine Analyse der systemischen Unterschiede zwischen den Automatisierungsgraden des vollautomatischen Bahnbetriebs und der Rückfallebene wird durch einen Vergleich auf Stufenebene unter Nutzung von Funktionsallokationen in [Kapitel 5](#) durchgeführt. Ausgehend von den Ergebnissen der bereits durchgeführten Untersuchungen werden in [Kapitel 6](#) ausgewählte Aspekte vertiefend betrachtet und analysiert sowie weiterführende (nicht-funktionale) Anforderungen ermittelt. Abschließend werden in [Kapitel 7](#) die relevanten Aussagen der Arbeit zusammengefasst und Empfehlungen zu weiteren Entwicklungsschritten formuliert.

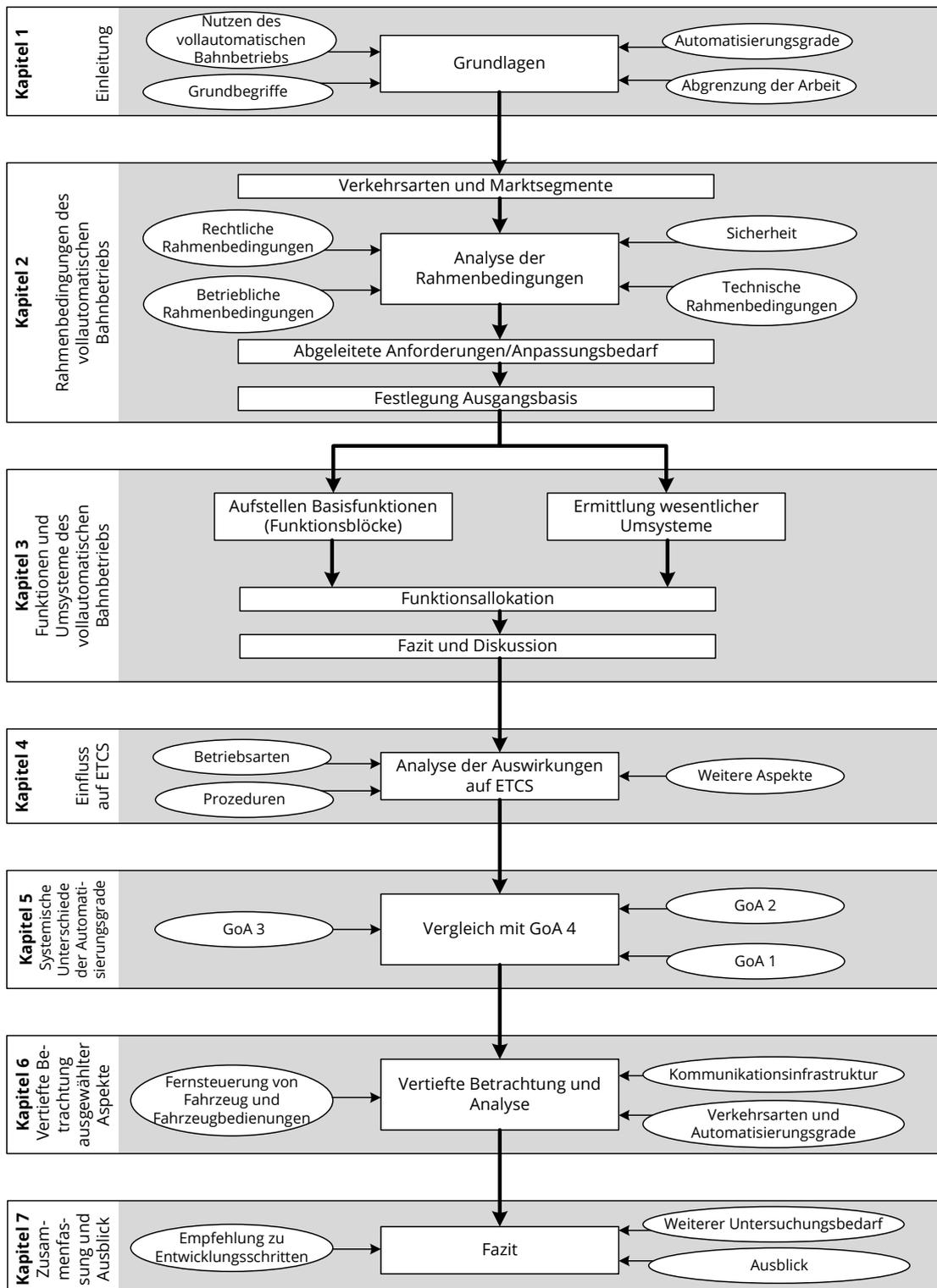


Abbildung 1.4: Überblick über Methodik und Struktur der Arbeit.

## 2 Rahmenbedingungen des vollautomatischen Bahnbetriebs

In diesem Kapitel werden die Rahmenbedingungen des vollautomatischen Bahnbetriebs analysiert. Zuerst werden unterschiedliche Verkehrsarten und Marktsegmente klassifiziert. Es folgt eine Einordnung und Untersuchung der rechtlichen und betrieblichen Rahmenbedingungen. Dabei werden Anforderungen abgeleitet und der erforderliche Anpassungsbedarf im Hinblick auf den vollautomatischen Bahnbetrieb ermittelt. Aufbauend darauf wird das betriebliche Zielbild der DB vorgestellt. Es folgt eine Untersuchung der für den vollautomatischen Bahnbetrieb wesentlichen technischen Rahmenbedingungen, insbesondere ETCS. Ein kurzer Einblick in das Themenfeld Sicherheit wird gegeben. Abschließend wird eine Ausgangsbasis für die weiteren Untersuchungen festgelegt, die Anforderungen an den vollautomatischen Bahnbetrieb definiert.

### 2.1 Verkehrsarten und Marktsegmente

Im Gegensatz zum Nahverkehr, bei dem es sich i. d. R. um geschlossene Systeme handelt, ist das deutsche Vollbahnnetz der DB *offen* und hat vielfältige Schnittstellen zu anderen Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU), z. B. an Landesgrenzen oder Industriebahnanschlüssen. Es wird von Personen- sowie Güterzügen verschiedener Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) genutzt. Daraus resultieren verschiedene Verkehrsarten und Marktsegmente, die sich u. a. im Hinblick auf Automatisierungsfähigkeit, Anforderungen sowie Nutzen des vollautomatischen Bahnbetriebs unterscheiden. Nachfolgend werden die für diese Arbeit relevanten Verkehrsarten/Marktsegmente herausgearbeitet und charakterisiert. Grundsätzlich können drei relevante Verkehrsarten identifiziert werden:

- Personenverkehr
- Güterverkehr
- Rangierbereiche und Werksbahnen

Eine weitere Unterteilung des Personenverkehrs in Hochgeschwindigkeitsverkehr (HGV), Regionalverkehr in der Fläche sowie Regionalverkehr in urbanen Gebieten (wie z. B. S-Bahnen) erscheint sinnvoll.

Beim Regionalverkehr ist eine weitere Unterscheidung angebracht: Der Flächenverkehr kann in stärker und schwächer belastete Strecken (wie z. B. Nebenbahnen) eingeteilt werden. Beim Regionalverkehr in urbanen Gebieten ergibt eine Unterteilung in offene Netze und U-Bahn-ähnliche, geschlossene Netze Sinn.

Somit können insgesamt sieben Verkehrsarten bzw. Marktsegmente mit jeweils unterschiedlichen Eigenschaften identifiziert werden. Als relevant für die Betrachtung des vollautomatischen Bahnbetriebs erscheinen in dieser Arbeit die Kenngrößen *Netz*, *Fahrzeugflotte*, *typische Geschwindigkeiten* sowie *Kernziele der Automatisierung*<sup>1</sup>. *Abbildung 2.1* fasst die Ergebnisse der Charakterisierung zusammen.

	Personenverkehr					Güterverkehr	Rangierbereiche und Werksbahnen
	Hochgeschwindigkeitsverkehr (HGV)	Regionalverkehr (Flächenverkehr)		Regionalverkehr (Urbane Gebiete, S-Bahn-Verkehr)			
		stärker belastete Strecken	schwächer belastete Strecken	offene Netze	U-Bahn ähnlich		
Netz (Betriebsanlagen)	offen	offen	offen	offen	geschlossen/räumlich begrenzt	offen	geschlossen/räumlich begrenzt
Fahrzeugflotte	einheitlich	vielfältig	vielfältig	vielfältig	einheitlich	vielfältig (Lok maßgeblich)	vielfältig (Lok maßgeblich)
Typische Geschwindigkeiten <sup>3</sup>	hoch bis sehr hoch	mittel bis hoch	mittel	mittel	mittel	mittel	gering
Kernziele Automatisierung	höhere Leistungsfähigkeit, Pünktlichkeit	Betriebsstabilität, Höhere Leistungsfähigkeit	Flexibilisierung, Bedarfsorientierung	höhere Leistungsfähigkeit	höhere Leistungsfähigkeit	Arbeitsbedingungen, Steigerung Wettbewerbsfähigkeit	Arbeitsbedingungen, Steigerung Wettbewerbsfähigkeit

<sup>3</sup> Qualitative Einschätzung, exakte Werte sind hier nicht von Bedeutung.

**Abbildung 2.1:** Klassifizierung der Verkehrsarten und Marktsegmente.

Die hier entwickelte Klassifizierung dient der Einordnung der Rahmenbedingungen für diese Arbeit. Dabei wurden verschiedene, bereits existierende Publikationen berücksichtigt (vgl. [Fla19a], [Tas18], [Rij17], [Nie17], [Jan12], [Fie12]). Für Untersuchungen mit einem anderen Schwerpunkt kann eine andere Klassifizierung zielführender sein. Es besteht somit kein Anspruch auf Vollständigkeit. In der Literatur finden sich ebenfalls ähnliche, aber im Detail unterschiedliche Klassifizierungen (siehe o. g. Quellen).

Durchaus relevante Unterschiede mit Einfluss auf den vollautomatischen Bahnbetrieb zwischen den Verkehrsarten und Marktsegmenten bei Vollbahnen werden deutlich. Weiterführende Betrachtungen finden sich in [Abschnitt 6.3](#). Obwohl die Verkehrsarten unterschiedlich sind, wird in den meisten Fällen die gleiche Infrastruktur genutzt. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit interoperabler Lösungen. Es gibt jedoch auch Gemeinsamkeiten: Der rechtliche Rahmen, z. B. die Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO), ist in Deutschland allgemeingültig. Im nächsten Abschnitt folgt daher eine Analyse der rechtlichen Rahmenbedingungen des vollautomatischen Bahnbetriebs.

<sup>1</sup> Der grundsätzliche Nutzen des vollautomatischen Bahnbetriebs ist in [Unterabschnitt 1.3.1](#) beschrieben.

## 2.2 Rechtliche Rahmenbedingungen

### 2.2.1 Gesetzlicher Rahmen

Der Bahnbetrieb ist auf europäischer und nationaler Ebene einem gesetzlichen Rahmen unterworfen. Einen grundsätzlichen Überblick des nationalen Regelwerksgefüge in Form einer Regelungspyramide zeigt [Abbildung 2.2](#). In diesem Abschnitt werden die rechtlichen Rahmenbedingungen und die Auswirkungen auf den vollautomatischen Bahnbetrieb analysiert.

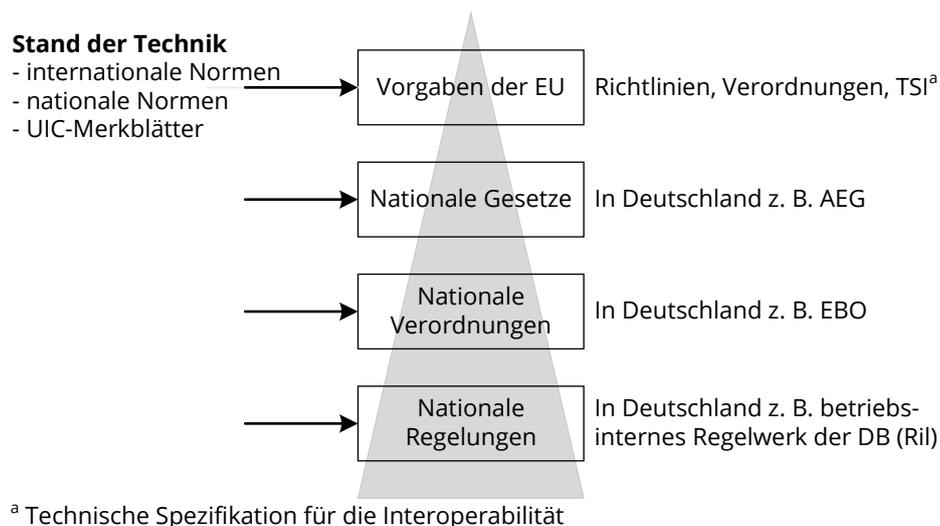


Abbildung 2.2: Regelungspyramide (nach [Jan20a]).

Die gesetzlichen Rahmenbedingungen regeln den heutigen Bahnbetrieb. Im Vollbahnnetz ist dies im Regelfall der manuelle Bahnbetrieb, also GoA 1 bzw. NTO. Der vollautomatische Bahnbetrieb muss ebenfalls diesem gesetzlichen Rahmen unterliegen. Es stellt sich dabei u. a. die Frage, welche Rolle das Personal, insbesondere der Fahrer, in den aktuell gültigen Gesetzen und Verordnungen spielt. Dies ist insofern von Bedeutung, da die aktuellen Gesetze und Verordnungen für einen Betrieb mit Personal, insbesondere mit Fahrer, verfasst sind (sie sind *historisch gewachsen*). Exemplarisch soll daher die EBO [EBO19] hinsichtlich kritischer Stellen in Bezug auf den vollautomatischen Bahnbetrieb analysiert werden.

### 2.2.2 Beispiel: Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung

In Deutschland regelt das Allgemeine Eisenbahngesetz (AEG, [AEG21]) den sicheren Bahnbetrieb. Die EBO sorgt dafür, dass Fahrzeuge und Infrastruktur den Anforderungen an Sicherheit und Ordnung genügen. Die EBO ist keine unmittelbare Betriebsvorschrift. Das betriebliche Regelwerk muss innerhalb des durch die EBO vorgegebenen Rahmens erstellt werden (vgl. [Mar18]).

Für den vollautomatischen Bahnbetrieb sind verschiedene Anforderungen der EBO potentiell kritisch. Dies soll beispielhaft anhand § 45 EBO (Besetzen der Triebfahrzeuge und

Züge) [EBO19] gezeigt werden.

In § 45 Abs. 1 EBO wird explizit gefordert, dass „arbeitende Triebfahrzeuge [...] während der Fahrt mit einem Triebfahrzeugführer<sup>2</sup> besetzt sein“ müssen. Es wird auch darauf hingewiesen, dass gesteuerte Triebfahrzeuge unbesetzt sein dürfen. § 18 Abs. 4 EBO erlaubt die Möglichkeit einer Fernsteuerung. Hier ist jedoch nicht genau definiert, ob die Fernsteuerung durch entsprechendes Personal oder automatisch durch ein technisches System durchgeführt werden kann. In § 45 Abs. 2 EBO ist jedoch beispielsweise exakt festgelegt, dass „ferngesteuerte Rangierfahrten [...] unbesetzt sein dürfen“. Da Rangierfahrten keine Zugfahrten sind, könnte im Umkehrschluss argumentiert werden, dass unbesetzte Zugfahrten nicht ferngesteuert sein dürfen. Unabhängig davon wird zudem gefordert, „das vorderste Fahrzeug geschobener Züge [...] mit einem Betriebsbeamten zu besetzen“ (§ 45 Abs. 6 EBO). Der Tf hat sich gemäß § 45 Abs. 2 EBO im vorderen Führerraum bzw. an der Zugspitze aufzuhalten.

In § 45 Abs. 7 EBO wird gefordert, dass Reisezüge mit mindestens einem Betriebsbeamten zu besetzen sind. Dies ist weniger kritisch, da die EBO hier die Möglichkeit vorgibt, die Aufgaben auch von technischen Einrichtungen durchführen lassen zu können.

Bereits für den fahrerlosen Bahnbetrieb (GoA3) müssen Teile des § 45 EBO angepasst werden. Für den vollautomatischen Bahnbetrieb sind weitere Überarbeitungen notwendig. Im Rahmen der Analyse wurden weitere kritische Stellen identifiziert, die eine Modifikation erfordern. Auf diese soll im Detail nicht weiter eingegangen werden, da hierzu bereits Untersuchungen existieren (siehe z. B. [Fla19b]).

### 2.2.3 Allgemeine rechtliche Aspekte: Haftung

Neben Fragen zu eisenbahnspezifischen rechtlichen Rahmenbedingungen besteht die Notwendigkeit, die Auswirkungen des vollautomatischen Bahnbetriebs auf allgemeine rechtliche Aspekte, wie z. B. Haftungsfragen, zu untersuchen. Dabei sind Aspekte des Straf- und Zivilrechts zu beachten. Beim Zivilrecht müssen die Auswirkungen des vollautomatischen Bahnbetriebs betreffend folgender Aspekte untersucht werden (vgl. [Hag21]):

- Verschuldensunabhängige Haftung → unabhängig vom Automatisierungsgrad
- Deliktsrecht: zielt immer auf ein menschliches Verschulden → beim vollautomatischen Bahnbetrieb kann es zu Haftungsverschiebungen kommen
- Auswahl- und Überwachungsverschulden → beim vollautomatischen Bahnbetrieb findet die Haftung keinen Anknüpfungspunkt

Eine Hürde beim fahrerlosen Fahren ist der fehlende Bezugspunkt. Im Regelfall adressiert das Recht immer natürliche, in der Verantwortung stehende Personen. So trägt im manuellen und halbautomatischen Bahnbetrieb der Fahrer<sup>3</sup> Verantwortung für sein ordnungsgemäßes Verhalten.

---

<sup>2</sup>An dieser Stelle wird der Begriff *Tf* anstelle von *Fahrer* verwendet, da die EBO dies explizit vorgibt.

<sup>3</sup>im Gültigkeitsbereich der EBO: *Tf*.

Durch die Automatisierung kommt es zu Verschiebungen der Haftungsstrukturen vom Personal (in den meisten Fällen vom Fahrer) in Richtung der Zulassungsbehörden, Hersteller und Betreiber. Es kann daher von einem Paradigmenwechsel gesprochen werden (vgl. [Hag21]).

### 2.2.4 Abgeleitete Anforderungen und Anpassungsbedarf

Generell lässt sich folgendes Fazit betreffend des rechtlichen Rahmens ziehen: Der vollautomatische Betrieb für Vollbahnen ist zum aktuellen Zeitpunkt in Deutschland nicht rechtsicher durchführbar. Die nähere Betrachtung eines Paragraphen der EBO zeigte die Notwendigkeit von Anpassungen (siehe [Unterabschnitt 2.2.2](#)). Vor allem sind explizit auf verantwortliches Personal verweisende Stellen zu ändern. Auch das AEG muss angepasst werden (vgl. [Hag21]).

Im Zuge der Einführung des vollautomatischen Bahnbetriebs sind in einer vollständigen Betrachtung alle relevanten Gesetze und Verordnungen auf kritische Stellen hin zu untersuchen. Dies betrifft auch die europäische Ebene (wie in [Abbildung 2.2](#) dargestellt). Da es sich um Gesetze und Verordnungen handelt, kann eine Überarbeitung vergleichsweise einfach durchgeführt werden. Mit entsprechendem politischen Willen können diese Änderungen innerhalb weniger Jahre durchgeführt werden. Weiterhin müssen Fragen der Haftung geklärt werden.

Abschließend sei angemerkt, dass die rechtlichen Rahmenbedingungen des Schienenverkehrs im Vergleich zum Straßenverkehr erheblich besser sind (vgl. [Hag21]). Sofern der rechtliche Rahmen das autonome Fahren im Straßenverkehr ermöglicht, so muss er auch einen vollautomatischen Bahnbetrieb ermöglichen. Diese Regulierungen liegen im Aufgabenfeld von Behörden und der Politik.

Zu beachten ist außerdem, dass der vollautomatische Bahnbetrieb im Nahverkehr rechtlich möglich ist und seit mehreren Jahren in Deutschland bei der U-Bahn Nürnberg angewendet wird. Im Gegensatz zu Vollbahnen unterliegen U-Bahnen in Deutschland der Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung (BOStrab, [BOS19]) und nicht der EBO. Die *Technischen Regeln für Straßenbahnen – Fahrbetrieb ohne Fahrzeugführer* (TRStrab FoF, [TRS14]) konkretisieren als anerkannte Regel der Technik die Grundforderungen der BOStrab bezüglich des vollautomatischen Betriebs. Ein ähnliches Vorgehen wäre auch für die EBO denkbar.

## 2.3 Betriebliche Rahmenbedingungen

### 2.3.1 Betriebsinterne Regelwerksstruktur

Die Organisation des Bahnbetriebs obliegt im Regelfall den jeweiligen Vorschriften der EIU. Neben den Betriebsregelwerken der EVU ist dies im Wesentlichen die Fahrdienstvorschrift im Netz der DB (Richtlinie (Ril) 408) sowie die FV-NE (Fahrdienstvorschrift für Nichtbundes-eigene Eisenbahnen). Im Folgenden werden einzelne Aspekte der Fahrdienstvorschrift der DB (Ril 408, [DB 21]) analysiert<sup>4</sup>. Grundlegende Erkenntnisse können aber auch auf andere

---

<sup>4</sup>Auf über 95 % der Strecken findet die Ril 408 Anwendung (vgl. [Mor20]).

Bestandsregelwerke bzw. -richtlinien übertragen werden.

Bei der Fahrdienstvorschrift der DB handelt es sich um ein funktionsorientiertes Regelwerk mit handlungsorientierten Regeln. Die Grundstruktur orientiert sich dabei an Funktionen, z. B. der Zugfolgesicherung. Zu jeder Funktion sind in Abhängigkeit der konkreten Sicherungstechnik Regeln aufgestellt. Für obiges Beispiel sind dies beispielsweise Regeln für Strecken ohne Streckenblock oder Strecken mit selbsttätigen Streckenblock. Diese Struktur soll zu einer kompakten Darstellung führen, allerdings findet keine Beschreibung des eigentlichen Prozesses, z. B. *Zugfahrt durchführen*, statt. Nachteilig ist ebenfalls eine geringe Offenheit für neue Innovationen, da sich diese der historisch gewachsenen Struktur und den existierenden Definitionen unterordnen müssen (vgl. [Pac21a]). Die wesentlichen Charakteristika und resultierenden Probleme bisheriger betriebsinterner Regelwerke fasst [Tabelle 2.1](#) zusammen.

Funktionsorientiertes Regelwerk	Handlungsorientierte Regeln
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Funktionen mit Regeln für jeweiligen Sicherungstechniken</li> <li>- benötigte Regeln können über gesamtes Dokument verteilt sein</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- sicherer Handlungspfad für handelnde Person</li> <li>- durch Unfälle/Ereignisse und Weiterentwicklung der LST Einführung weiterer Regeln</li> </ul>
<p>→ geringe Technikoffenheit, eigentlicher Prozess nicht dargestellt</p>	<p>→ großer Umfang, inzwischen erreichte Komplexität widerspricht ursprünglicher Intention</p>

**Tabelle 2.1:** Charakteristik und resultierende Probleme bisheriger betriebsinterner Regelwerke (auf Basis von [Pac21a]).

### 2.3.2 Automatisierungspotential der Personalaufgaben am Beispiel der Fahrdienstvorschrift der Deutschen Bahn

Sofern die jetzigen Regelwerke und Richtlinien für den vollautomatischen Bahnbetrieb angewendet werden sollen, stellt sich die Frage, wie die einzelnen Aufgaben des Personals durch die Technik übernommen werden können. Die einzelnen Personalaufgaben können grundsätzlich wie folgt eingeteilt werden (vgl. [Hag21]):

- leicht automatisierbar
- komplex, aber automatisierbar
- nur manuell durchführbar

Anhand der Ril 408 [DB 21] kann eine derartige Analyse beispielhaft vorgenommen werden. Für das Automatisierungspotential der Personalaufgaben im vollautomatischen Bahnbetrieb lassen sich zusammenfassend folgende Aussagen treffen (vgl. [Hag21]):

- Züge fahren (Regelbetrieb): Im Regelbetrieb gibt es Aufgaben, die mit Sicherheitsverantwortung verbunden sind, wie z. B. das „Fahren auf Befehl“. Eine technische Lösung dieser Aufgaben ist komplex und aufwendig.
- Züge fahren (Störungsbetrieb): Die Störungsbehandlung durch Technik umfassend (automatisch) zu lösen ist sehr komplex und mit Sicherheitsrelevanz verbunden.
- Züge fahren (Meldungen): Die Nachbildung menschlicher Kommunikation ist selbst in stark formalisierten Prozessen sehr komplex.
- Züge fahren (Ausrüstung): Andere Systeme müssten die genannten Ausrüstungsgegenstände ersetzen. Teilweise ist dies mit Sicherheitsverantwortung verbunden.
- Rangieren: Das vollautomatische Rangieren ist technisch sehr anspruchsvoll und eine Realisierung ist aufgrund der Kosten unwahrscheinlich.

### 2.3.3 Zwischenfazit

Die Analyse der internen Regelwerksstruktur in [Unterabschnitt 2.3.1](#) zeigt, dass die bisherige funktionsorientierte Struktur mit handlungsorientierten Regeln den Anforderungen des vollautomatischen Bahnbetriebs nicht genügt. Dies macht sich insbesondere durch die geringe Offenheit für Innovation bemerkbar und dem Fokus auf den Menschen als handelnde Person. Es besteht Anpassungsbedarf.

Des Weiteren zeigt eine beispielhafte Analyse der Personalaufgaben hinsichtlich deren Automatisierungspotential, dass die Erfüllung der Ril 408 den vollautomatischen Bahnbetrieb vor große Herausforderungen stellt. Dies trifft im Besonderen auf die sicherheitsrelevanten Punkte zu. Diese sind im Zweifel durchaus mit hohem Aufwand technisch lösbar, was jedoch zu hohen Kosten führt und einer praktischen Umsetzung nicht förderlich ist.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die aktuellen betrieblichen Regelwerke nicht für den vollautomatischen Bahnbetrieb geeignet sind. Eine Änderung wäre mit erheblichen Aufwand verbunden. Die Ausrichtung der technischen Systeme zur Erfüllung der Richtlinien ist aufgrund des enormen Aufwands ebenfalls nicht zielführend. Es sind neue Lösungen zu finden.

### 2.3.4 Abgeleitete Anforderungen an betriebliche Vorschriften

In [Abschnitt 1.1](#) wurde bereits herausgearbeitet, dass die aktuelle Situation die einmalige Gelegenheit bietet, den Bahnbetrieb neu zu denken. Dies schließt die betriebsinternen Regelwerke, insbesondere die Fahrdienstvorschrift, mit ein. Aufgrund der „Probleme“ der bisherigen Fahrdienstvorschrift<sup>5</sup> ist die Entwicklung einer komplett neuen Fahrdienstvorschrift, anstelle der Anpassung und Überarbeitung der aktuell gültigen, sinnvoller. Insbesondere sollten dabei folgende Anforderungen berücksichtigt werden:

---

<sup>5</sup>siehe Zusammenfassung in [Tabelle 2.1](#).

### 1. Prozessorientierte Regelwerksstruktur

Eine prozessorientierte Regelwerksstruktur beschreibt die Prozesse zur Durchführung von Fahrten direkt. Dies führt u. a. zu einer klaren Prozessbeschreibung für die Nutzer (vgl. [Pac21a]). Ein gewisser Einfluss der Sicherungstechnik auf die Prozesse lässt sich nicht vermeiden. Da die technische Basis des vollautomatischen Bahnbetriebs genau eine Sicherungstechnik sein soll (siehe auch [Abschnitt 2.6](#)), kann das Regelwerk deutlich vereinfacht werden.

### 2. Schutzzielorientierte Regeln

Die Prämisse schutzzielorientierter Regeln ist das Verstehen der Prozesse und der dahinterstehenden Schutzziele durch die Nutzer. Im Vordergrund steht Prozesswissen und nicht formales Vorschriftenwissen (vgl. [Pac21a]). Dies passt gut zu einer prozessorientierten Regelwerksstruktur.

### 3. Hinterfragen grundlegender, historisch gewachsener Begriffe des Bahnbetriebs<sup>6</sup>

- Ist eine betriebliche Unterscheidung zwischen freier Strecke und Bahnhof noch zeitgemäß und notwendig?
  - Ist eine Unterscheidung zwischen Zugfahrt und Rangierfahrt im anzeigegeführten Betrieb unter Nutzung von ETCS weiterhin sinnvoll?
  - Sollte das Fahren auf dem Gegengleis betrieblich gesondert betrachtet werden oder im anzeigegeführten Betrieb als *normal* (also wie das Regelgleis) betrachtet werden?
- Die Erarbeitung eines (neuen) Zielbilds für den vollautomatischen Bahnbetrieb erscheint angebracht. Damit können diese grundlegenden Fragen geklärt und Anforderungen aufgestellt werden.

Die Unterschiede und Anwendungsgebiete zwischen der bisherigen Fahrdienstvorschrift und einer zukünftigen Fahrdienstvorschrift sind in [Tabelle 2.2](#) zusammengefasst. Einen beispielhaften Vorschlag zur Struktur einer neuen Fahrdienstvorschrift findet sich in [Abschnitt C.1](#).

Die hier aufgezeigten Anforderungen des vollautomatischen Bahnbetriebs zeigen die Notwendigkeit der Weiterentwicklung der betrieblichen Vorschriften. Dies hat die DB erkannt und plant eine neue Fahrdienstvorschrift für den Digitalen Bahnbetrieb (DBB). Diese soll als Ril 434 bezeichnet werden. Das Anwendungsgebiet erstreckt sich dabei nur auf mit ETCS L2 oS<sup>7</sup> ausgerüsteten Strecken, um die Komplexität des Regelwerks zu verringern. Erstmals soll die Ril 434 im Digitalen Knoten Stuttgart (DKS) angewendet werden (vgl. [Kop21]).

Abschließend soll auf einen weiteren Punkt hingewiesen werden: Die hier genannten Vorschläge sind betrieblicher Natur. Beispielsweise ist der Bahnhofsbegriff in der EBO gesetzlich definiert. Ob eine gesetzliche Änderung (und damit die Änderung jahrzehntelang bewährter Begriffe) oder nur eine Änderung der Begriffe im Betrieb (und darauf aufbauend in der LST) sinnvoll ist, soll nicht bewertet werden. Es besteht weiterer Forschungsbedarf.

---

<sup>6</sup>Eine Definition der im Folgenden genutzten Begriffe findet sich in [Abschnitt B.1](#).

<sup>7</sup>wird in [Unterabschnitt 2.4.1](#) eingeführt.

Bisherige Fahrdienstvorschrift	Zukünftige Fahrdienstvorschrift
Funktionsorientiertes Regelwerk mit handlungsorientierten Regeln:	Prozessorientierte Regelwerkstruktur mit schutzzielorientierten Regeln:
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Handlungen, die zu einem Unfall führen können, werden ausgeschlossen</li> <li>- Regelungen werden in Abläufe aufgeteilt und detailliert beschrieben</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Unfälle werden durch Einhaltung der vorgegebenen Schutzziele ausgeschlossen</li> <li>- Prozessorientierte Zusammenfassung der Regelungen</li> </ul>
→ Regelwerk für den Betrieb im historisch gewachsenen Gesamtnetz (Berücksichtigung der technischen Vielfalt)	→ Regelwerk für den Betrieb bei standardisierten Rahmenbedingungen

**Tabelle 2.2:** Vergleich zwischen der bisherigen Fahrdienstvorschrift und einer zukünftigen Fahrdienstvorschrift (auf Basis von [Kop21]).

Ein weiterer interessanter Aspekt wäre die Untersuchung der Auswirkungen des fahrerlosen Bahnbetriebs anstelle des vollautomatischen Bahnbetriebs auf die betrieblichen Regelwerke. Hierzu existieren bereits erste Veröffentlichungen, siehe z. B. [Hag21].

### 2.3.5 Betriebliches Zielbild der Deutschen Bahn

Wie in [Unterabschnitt 2.3.4](#) herausgearbeitet wurde, eignen sich die aktuellen betrieblichen Regelwerke der DB nur unzureichend für den vollautomatischen Bahnbetrieb, weshalb die Erarbeitung eines Zielbilds empfehlenswert ist. Erste Veröffentlichungen der DB sollen nun vorgestellt werden.

Damit der Bahnbetrieb unter den neuen technischen Bedingungen (ETCS und DSTW) durchgeführt werden kann, muss das Bahnsystem zunächst betrieblich beschrieben werden und entsprechende Anforderungen definiert werden. Dies geschieht bei der DB im Rahmen des betrieblichen Zielbilds (BZB). Auf Basis des BZB kann eine funktionale technische Lösung abgeleitet werden. Dies entspricht einem Paradigmenwechsel, da früher die technischen Lösungen den Betrieb beeinflusst haben. Der Zeitpunkt dafür ist, wie bereits mehrfach erläutert, günstig: Durch ETCS L2 oS wird es keine klassisch signalgeführte Fahrt mehr geben, es existieren einheitliche technische Rahmenbedingungen (keine Sonderlösungen) und die Stellwerkscharakteristik muss nicht gesondert in den Regelwerken berücksichtigt werden. Es ist somit eine starke Vereinfachung der Prozesse möglich (vgl. [Men21]).

Gemäß [Men21] werden mit dem BZB „visionäre“ Ziele verfolgt. Diese ähneln den in [Unterabschnitt 2.3.4](#) aufgestellten wesentlichen Anforderungen an den vollautomatischen Bahnbetrieb. Im Detail sind dies (vgl. [Men21]):

- Aufhebung Unterscheidung Zugfahrt/Rangierfahrt
- Aufhebung Unterscheidung Bahnhof/freie Strecke

- Abschaffung Gegengleis
- Festlegung betrieblicher Grundlagen und Betriebsverfahren für ETCS Level 3
- Schaffung betrieblicher Grundlagen für zukünftige Technologien (ATO, GoA 3, GoA 4)

Für das BZB sind verschiedene, in [Abbildung 2.3](#) dargestellte, Entwicklungsstufen geplant.

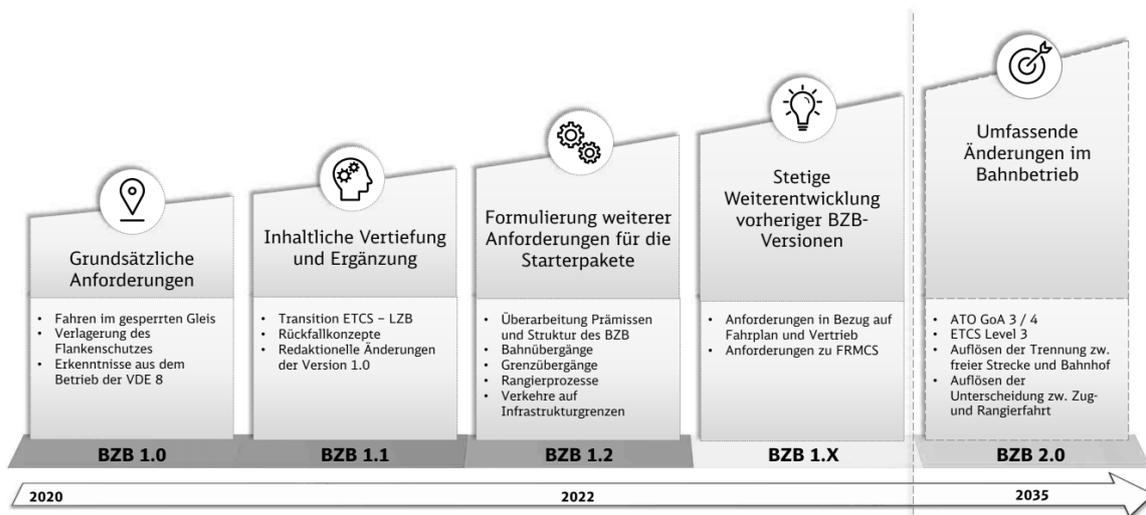


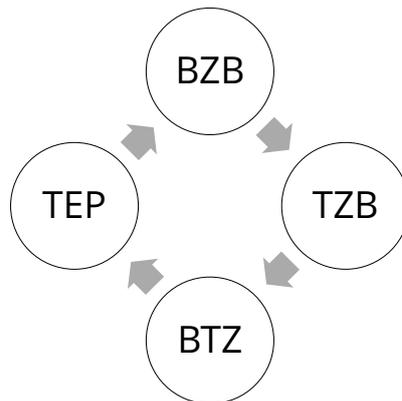
Abbildung 2.3: Entwicklungsstufen des BZB der DB [Kop21].

Wie aus [Abbildung 2.3](#) hervorgeht, sind die für diese Arbeit relevanten betrieblichen Änderungen erst in mehreren Jahren geplant (BZB 2.0). Es existiert somit kein umfangreiches Zielbild für den vollautomatischen Bahnbetrieb und es kann zu Änderungen kommen. Im weiteren Verlauf der Arbeit muss daher mit Annahmen gearbeitet werden, die in [Abschnitt 2.6](#) aufgestellt werden. Das BZB wird dennoch als geeignet bewertet, da es eine wichtige Basis darstellt.

Um das Ziel des BZB – die Steigerung der Leistungsfähigkeit im Netz – zu erreichen, werden u. a. folgende, teils recht allgemein formulierte, Prämissen an das BZB gestellt:

- Leistungsfähige Technik als Grundlage für effizientere Betriebsprozesse
- Kompatibilität und Interoperabilität
- Unzulässigkeit betrieblicher Einschränkungen
- Ganzheitliches IT-System
- ETCS L2 oS als Grundlage des Betriebs (vgl. [Kop21])
- Bestandsschutz für bewährte technische Funktionalitäten
- Generische Zulassung: keine projektspezifischen ETCS-Ausrüstungen, kein release-abhängiges betriebliches Regelwerk (vgl. [Men21])

Das BZB ist Basis eines konsequenten Anforderungsmanagementprozesses, welcher in [Abbildung 2.4](#) dargestellt ist. Auf Basis des BZB wird ein technisches Zielbild (TZB) erstellt. Das betrieblich-technische Zielbild (BTZ) definiert funktionale Anforderungen an den Betrieb und die dafür notwendigen Systeme. Aufbauend auf dem BTZ wird ein Technologie-Entwicklungsplan (TEP) erstellt, der u. a. das Releasemanagement regelt. Das BTZ und TEP sollen konform mit Zielbild von RCA<sup>8</sup> sein (vgl. [\[Fri21\]](#)).



**Abbildung 2.4:** BZB als Basis eines Anforderungsmanagementprozesses (nach [\[Men21\]](#)).

Dieser Prozess verdeutlicht die Hauptaufgabe der Technik: die Realisierung der betrieblichen Anforderungen. Im nächsten Abschnitt werden daher die verschiedenen Initiativen sowie ETCS näher vorgestellt, um den technischen Rahmen des vollautomatischen Bahnbetriebs definieren zu können.

## 2.4 Technische Rahmenbedingungen

### 2.4.1 Einführung in ETCS

Das europäische und interoperable Zugbeeinflussungssystem ETCS (European Train Control System) stellt die Ausgangsbasis für die Modernisierung und Digitalisierung der LST dar (Digitale LST, DLST). Das ETCS-Konzept wird als zukunftssicher eingeschätzt (vgl. [\[Jan20b\]](#)).

ETCS soll ein Kernsystem des vollautomatischen Bahnbetriebs sein. Es existieren zahlreiche hochwertige Publikationen, welche die Funktionsweise und Besonderheiten von ETCS beschreiben. Eine umfangreiche Übersicht über die Anwendung von ETCS in Deutschland gibt [\[Tri20b\]](#), eine allgemeine und kürzere Einführung [\[Sch21c\]](#). Die nachfolgenden Ausführungen sollen daher nur einen Überblick geben und konzentrieren sich auf ausgewählte Aspekte, die für das bessere Verständnis der Arbeit benötigt werden.

#### Grundlagen

Wie aus [Abbildung 2.5](#) hervorgeht, ist ETCS als sicherheitsrelevantes Zugbeeinflussungssystem Teil des European Rail Traffic Management System (ERTMS). Weitere Bestandteile

---

<sup>8</sup>RCA wird in [Unterabschnitt 2.4.4](#) vorgestellt.

von ERTMS sind der Bahnfunk zur Kommunikation (Global System for Mobile Communications – Rail, GSM-R) sowie das bisher nicht umgesetzte europäische Verkehrsleitsystem (European Traffic Management Layer, ETML).

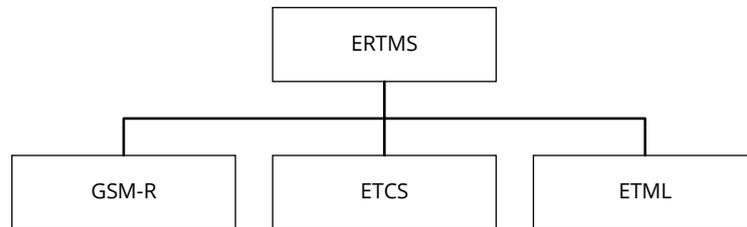


Abbildung 2.5: ERTMS-Architektur.

Die Systemverantwortung für ERTMS besitzt die Europäische Eisenbahnagentur (European Union Agency for Railways, ERA) (vgl. [Dop15]). Die ERTMS/ETCS-Spezifikation wurde von der ERTMS Users Group (EUG) sowie UNISIG (Union Industry of Signalling) erarbeitet. Die ERTMS-Spezifikation, inkl. der Schnittstellen, ist in verschiedene Dokumente aufgeteilt. Diese werden als SUBSET (SS) bezeichnet. ETCS ist beispielsweise in SUBSET-026 [ERA16] funktional spezifiziert (System Requirements Specification, SRS).

ETCS wird in ein fahrzeugseitiges (ETCS-On-board, ETCS-OB) und ein streckenseitiges Teilsystem unterteilt (ETCS-Trackside, ETCS-TS), die jeweils aus weiteren Teilsystemen bestehen. Es ist dennoch als Gesamtsystem zu verstehen.

Vereinfacht ist ETCS mit einem Baukastenprinzip vergleichbar: Es gibt verschiedene Funktionalitäten bzw. Funktionsblöcke, von denen ein Teil einen Kern an verpflichtenden Basisfunktionen bildet. In Abhängigkeit der betrieblichen Anforderungen kann jedes EIU ETCS an die entsprechenden Bedürfnisse anpassen und weitere in [ERA16] spezifizierte Funktionalitäten anwenden. So haben beispielsweise Nichtbundeseigene Eisenbahnen (NE) andere Anforderungen als die DB (siehe z. B. [Müc21]). Die Interoperabilität ist trotz unterschiedlicher Ausgestaltungen der EIU aufgrund der Anwendung der SUBSETS gesichert. Damit ETCS erfolgreich angewendet werden kann, sollten somit zuerst die betrieblichen Anforderungen geklärt werden.

### Funktionsweise

ETCS ist für fünf Anwendungsstufen (Level) spezifiziert. Die ETCS-Level beziehen sich auf die streckenseitige Ausrüstung, die Informationsübertragung zwischen Fahrzeug und Strecke sowie die Unterscheidung zwischen Funktionen, die strecken- oder fahrzeugseitig ausgeführt werden. Die Strecke gibt dabei das Level vor und die ETCS-Fahrzeugausrüstung wechselt entsprechend.

Gemäß [ERA16] besitzt ETCS 17 Modes. Dies sind Betriebsarten des ETCS-Fahrzeuggeräts. Nicht in jedem Level sind alle Betriebsarten verfügbar. Die ETCS-Betriebsarten stellen verschiedene Überwachungsniveaus bereit. Im manuellen Bahnbetrieb wird im Regelfall die Betriebsart FS (Full Supervision) genutzt, im halbautomatischen Bahnbetrieb AD<sup>9</sup> (Automatic Driving).

---

<sup>9</sup>Nicht in [ERA16] spezifiziert, siehe dazu [Unterabschnitt 2.4.2](#).

Die SRS definiert verschiedene Prozeduren, z. B. für den Beginn einer Zugfahrt (Start of Mission, SoM). Auf diese wird in [Abschnitt 4.3](#) genauer eingegangen.

Die Kernfunktionalität zur Sicherung der Zugbewegungen ist die ETCS-Fahrterlaubnis (Movement Authority, MA). Dafür werden von der Strecke/Infrastruktur relevante Informationen an das Fahrzeug (ETCS-OB) übermittelt, u. a. Zielangabe und Geschwindigkeitsprofil. Auf Basis dieser Informationen werden im Fahrzeug Bremskurven ermittelt. Damit wird das sichere Anhalten des Fahrzeugs vor Ende der Fahrerlaubnis (End of Authority, EoA) gewährleistet. Aktuell ist in Level 2 und 3 die ETCS-Zentrale (Radio Block Centre, RBC) für das Generieren und Senden der MAs sowie das Verfolgen der Züge verantwortlich.

Die Fahrzeuge werden mittels im Gleis verbauten Eurobalisen geortet, welche bei Überfahrt ebenfalls Informationen, wie die MA, an das Fahrzeug übertragen können. Balisengruppen (BG) werden als Referenzpunkt genutzt. Mittels Linking können die BG als Kette aufeinander verweisen. Durch diese Informationen kann sich der Zug orten und sein Vertrauensintervall zurücksetzen. Die Position des Zuges wird relativ zu einer BG angegeben. Die zuletzt gelesene BG wird in Level 2 und 3 als Last Relevant Balise Group (LRBG) bezeichnet. Mittels des Train Positioning Report (TPR) sendet das Fahrzeug seine Position an das RBC. Hierfür wird eine Funkverbindung benötigt, weshalb diese Funktion nur in Level 2 und 3 existiert.

### **Umsetzung von ETCS im Netz der Deutschen Bahn**

Im Anwendungsbereich der DB Netz existieren zwei Umsetzungsarten:

- ETCS Level 2 (L2)
- ETCS L1 LS (ETCS signalgeführt, ESG)

ESG ist als Übergangslösung bis zur vollständigen Ausrüstung mit L2 (oder höher) anzusehen. Es existiert aktuell keine Strecke, die im Regelbetrieb mit ESG befahren wird. Für die Betrachtung im Rahmen der Arbeit kann ESG daher vernachlässigt werden. Für L2 gibt es zwei Umsetzungsvarianten:

- L2
- L2 oS<sup>10</sup> (Level 2 „ohne Signale“)

Wie durch das BZB vorgegeben, ist für den vollautomatischen Bahnbetrieb ausschließlich L2 oS relevant (siehe [Unterabschnitt 2.3.5](#)). In der Betriebsart FS werden die Züge unabhängig vom Level vollüberwacht bzw. anzeigegeführt, weshalb Lichtsignale, sofern vorhanden, dunkelgeschaltet werden.

---

<sup>10</sup>Bei der Umsetzung von ETCS L2 oS werden weiterhin Signale verwendet (beispielsweise „Blechtafeln“ wie ETCS-Blockkennzeichen), teilweise sogar Lichtsignale (im DKS beispielsweise Sperrsignale, vgl. [[Dre22](#)]).



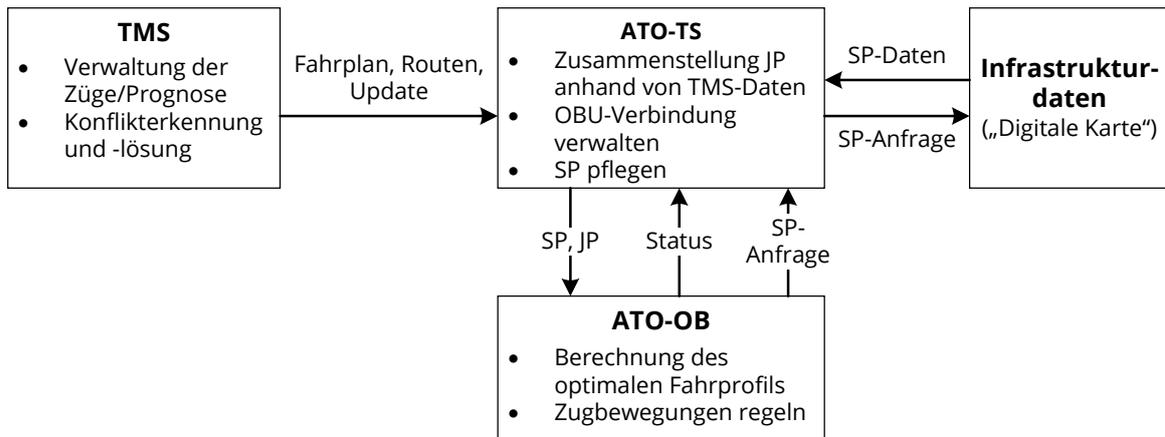


Abbildung 2.7: AoE: Funktionale ATO-High-Level-Architektur (nach [Tas18]).

### Diskussion der Auswirkungen von ETCS und ATO

Bereits für den halbautomatischen Bahnbetrieb (GoA2) wird in den meisten Publikationen eine kontinuierliche, bidirektionale Funkübertragung vorausgesetzt (analog zu CBTC-Systemen). Für den vollautomatischen Betrieb sind daher die ETCS Level 2, 3 oder Hybrid Level 3 (HL3) relevant. Es existieren jedoch auch Publikationen, welche die Machbarkeit des Fahrens mit ATO in Level 1 in der Betriebsart Limited Supervision (L1 LS) zeigen (vgl. [Vet21]).

Wie im BZB beschrieben, werden mit der netzweiten Einführung von ETCS hohe Erwartungen an die Verbesserung der Leistungsfähigkeit verbunden (siehe auch [Unterabschnitt 2.3.5](#) oder [Abschnitt 1.1](#)). Eine Untersuchung zeigte, dass die publizierten Zielwerte nicht erreicht werden (vgl. [Tri20a]). Gemäß [Sch21a] können die Vorteile, neben der erhöhten Leistungsfähigkeit vor allem die Reduktion der streckenseitigen Ausrüstung, scheinbar nur in Level 3 und dem Fahren im wandernden Raumabstand (Moving Block) erreicht werden. Es wird kontrovers diskutiert, ob die Spezifikation von ETCS L3 abgeschlossen ist (vgl. [Kre19], [Kut21]). Unbestritten ist die Steigerung der Leistungsfähigkeit durch den Einsatz von ATO bei U-Bahn-Systemen, weshalb ähnliche Effekte auch mit AoE im Vollbahnbereich zu erwarten sind (siehe z. B. [Bey19], [Sch21d]).

In Deutschland sind bislang vergleichsweise wenig Streckenkilometer mit ETCS L2 ausgerüstet. AoE wird im Netz der DB nicht im Regelbetrieb eingesetzt. Durch praktische Erfahrungswerte muss sich zeigen, welche Steigerung der Leistungsfähigkeit möglich und welche ETCS-Ausrüstung *optimal*<sup>11</sup> ist. Der Digitale Knoten Stuttgart (DKS) spielt dabei eine besonders wichtige Rolle. Unterschiede zwischen den Verkehrsarten und Marktsegmenten sind zu erwarten. Es besteht weiterer Forschungsbedarf.

### 2.4.3 Digitale Schiene Deutschland

Mit der Sektorinitiative Digitale Schiene Deutschland (DSD) bündelt die DB die Aktivitäten zur Modernisierung des Bahnsystems. Es sollen damit die Chancen der Digitalisierung für

<sup>11</sup> *Optimal* berücksichtigt neben der Leistungsfähigkeit (*Nutzen*) viele weitere Faktoren, so z. B. auch die Kosten.

die Eisenbahn konsequent genutzt werden (vgl. [Wei20]).

Mit der ersten Stufe wird die Basis der grundlegenden Modernisierung und Digitalisierung der Infrastruktur gelegt. Dafür wird ETCS L2 oS in Verbindung mit DSTW eingeführt. Hier existieren bereits erste Projekte, wie z. B. DKS. Darauf aufbauend soll der flächendeckende Roll-out der DLST beginnen (vgl. [Büh22]).

Als zweite Stufe ist der Digitale Bahnbetrieb (DBB) bzw. das Digitale Bahnsystem (DBS) vorgesehen. Dieses geht weit über die technologische Basis von ETCS und DSTW hinaus. Der in der ersten Stufe geschaffene Ausrüstungsstand soll für die Einführung weiterer digitaler Technologien genutzt werden. Das Zielbild des DBB/DBS wird wie folgt angegeben (vgl. [Wei20]):

- Ein intelligentes, hoch automatisches Verkehrsmanagementsystem steuert die Züge in Echtzeit, Störungen werden in hohem Maße automatisch bearbeitet
- Züge fahren vollautomatisch
- Züge werden hochgenau geortet und fahren in minimalen Abständen
- Durch Sensorik werden relevante Teile der Umwelt erkannt

Die DLST soll zu einem ETCS L3-Moving-Block-Ansatz weiterentwickelt werden (vgl. [Büh22]). Für die Erfüllung des Zielbilds sind im Rahmen der DSD folgende wesentliche Zukunftstechnologien von Bedeutung (vgl. [Wei20]):

- Künstliche Intelligenz im Verkehrs- und Störfallmanagement
- ATO: als Basis für den vollautomatischen Bahnbetrieb
- DLST: Weiterentwicklung der LST soll Funktionen von ETCS und Stw zusammenführen, den Sicherungskern abkapseln und die Modularisierung fördern (wird in [Unterabschnitt 2.4.4](#) und [Unterabschnitt 2.4.5](#) näher beschrieben)
- Sensorik für Ortung und Digitale Karte
- Future Railway Mobile Communication System (FRMCS), in Verbindung mit 5G-Datenkommunikation und Cloud-Technologien

### 2.4.4 Reference CCS Architecture

Eine wichtige europäische Initiative zur Definition einer einheitlichen infrastrukturseitigen Architektur der LST ist RCA (Reference CCS Architecture). CCS steht für Control, Command und Signalling. Dies entspricht dem deutschen ZZS (Zugsteuerung, Zugsicherung und Signalegebung). Die aktuell vorliegende Architekturspezifikation findet sich in [RCA21b]<sup>12</sup>. RCA

---

<sup>12</sup>RCA befindet sich im laufenden Entwicklungsprozess. Die hier zugrunde liegenden Dokumente können Fehler enthalten. Änderungen sind wahrscheinlich. Ein formales Anforderungs- und Änderungsmanagement wird zu einem späteren Zeitpunkt eingeführt.

ist eine Initiative der EUG sowie dem EULYNX<sup>13</sup>-Konsortium. Mit RCA wird das Ziel verfolgt, harmonisierte Produkte und Schnittstellen zu schaffen, um den Wettbewerb auf dem Markt zu vergrößern. Insbesondere sind dies folgende Ziele (vgl. [Mis21]):

- Lebenszykluskosten (Life-cycle Costs, LCC) verringern
- Schaffung eines einheitlichen modularen Rahmens, der von den EIU für den Bau ihrer eigenen ZZS-Systeme verwendet werden kann
- Leichtere und kostengünstigere Migrationslösungen
- Berücksichtigung verschiedener Anforderungen an Faktoren wie Verfügbarkeit, Sicherheit usw.
- Investitionssicherheit

Eingangsdokumente von RCA sind u. a. die ERTMS-Spezifikation gemäß TSI ZZS (Technische Spezifikation für die Interoperabilität), die EULYNX-Spezifikation sowie (Arbeits-)Ergebnisse weiterer Initiativen, wie z. B. S2R. Des Weiteren setzt RCA u. a. folgende Prämissen voraus, die denen der DSD ähneln (vgl. [Tre21]):

- Anzeigegeführte Fahrt mit Funkübertragung
- Berücksichtigung der sog. *Game Changer*: ATO, ETCS L3, FRMCS, Lokalisierung mit alternativen Technologien

Ein Schwerpunkt von RCA ist die Entwicklung von Anforderungen eines standardisierten *Advanced Protection System* (APS) unter Berücksichtigung der Sicherung und Überwachung der Fahrten auch für den vollautomatischen Bahnbetrieb. Weitere Schwerpunkte liegen auf dem Aspekt einer einheitliche Topologie und Datensatz für alle Systeme sowie der Entwicklungsprozessgestaltung, Migration und betrieblichen Harmonisierung (vgl. [Tre21]).

Abbildung 2.8 zeigt die aktuell vorliegende RCA-Architektur. Das RCA-System besteht aus mehreren Teilsystemen. Über verschiedene Schnittstellen wird es mit anderen Systemen und menschlichen Akteuren verbunden sein (vgl. [RCA21b]).

Wie aus Abbildung 2.8 hervorgeht, berücksichtigt RCA Erweiterungen für den vollautomatischen Bahnbetrieb inkl. Störungsbehandlung (*Incident Solving Manager, ISM*). Es existieren fünf verschiedene Schichten (*Layer*) sowie eine generische Funktionsschicht. Es findet eine Trennung zwischen der Sicherung der Fahrten (generische *Safety Logic, SL*) und der Überwachung von Abweichungen von Soll-Werten (*Safety Manager, SM*) statt. Die Fahrzeugausrüstung (*CCS On-board*) wird von OCORA spezifiziert. Bevor OCORA in Abschnitt [Unterabschnitt 2.4.6](#) vorgestellt wird, sollen zunächst die wesentlichen Merkmale des Sicherungssystems APS beschrieben werden.

---

<sup>13</sup>EULYNX ist eine Initiative europäischer EIU zur Entwicklung eines einheitlichen Standards für eine neue modulare Stellwerksarchitektur. Einen Systemüberblick liefert [Abbildung C.1](#) in [Abschnitt C.2](#).

## 2 Rahmenbedingungen des vollautomatischen Bahnbetriebs

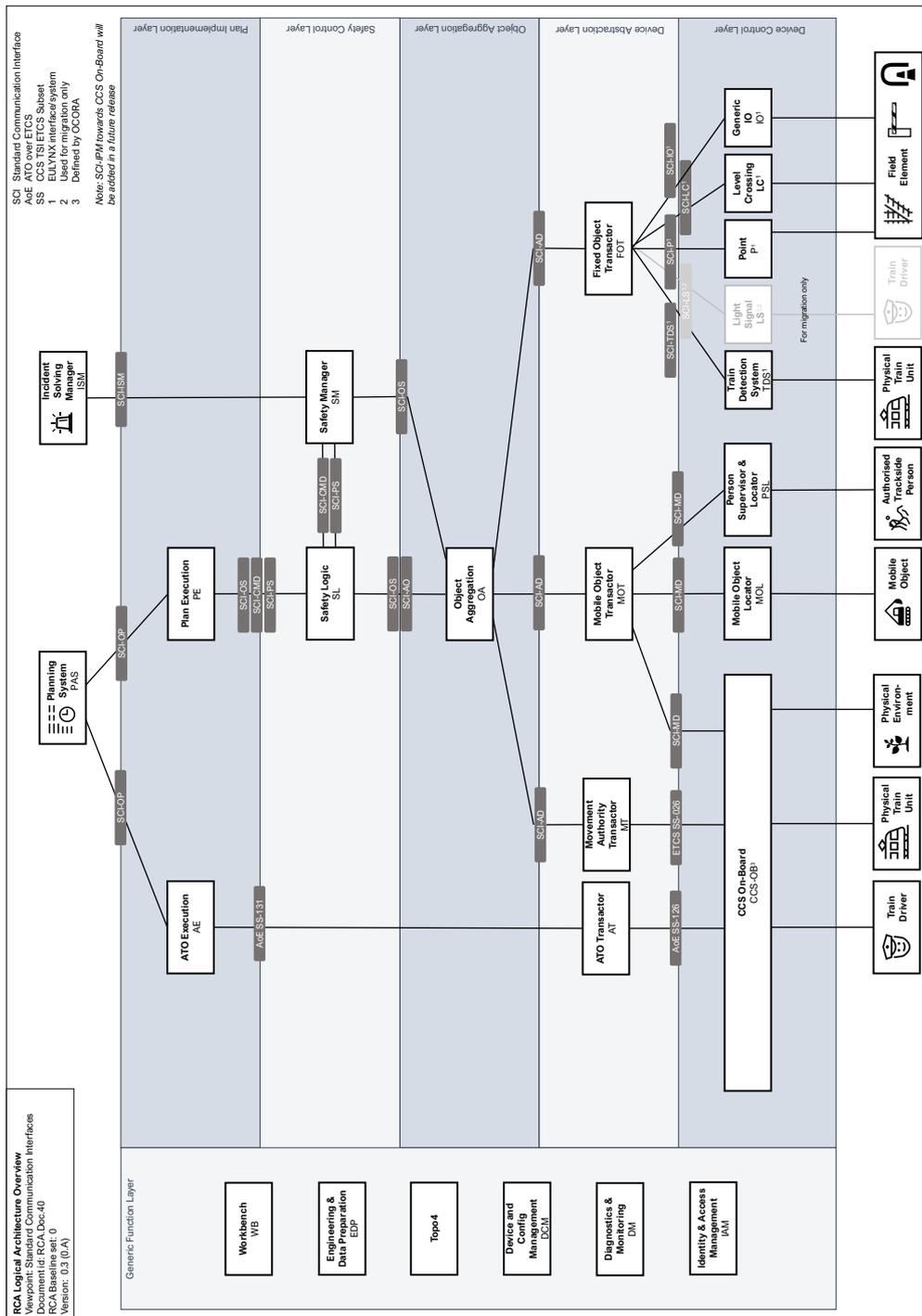


Abbildung 2.8: Übersicht über die logische Architektur von RCA (Ansichtspunkt: Standard-Kommunikationsschnittstellen SCI) [RCA21a].

### 2.4.5 Advanced Protection System

Für die weiteren Betrachtungen in [Kapitel 3](#) ist das Sicherungssystem APS von Bedeutung. Die Funktionsweise sowie Vor- und Nachteile in Bezug auf die herkömmliche Stellwerkstechnik sollen hier nicht diskutiert werden. Da die geplante Funktionalität des APS in gewisser Weise eine Revolution darstellt, ist es für das Verständnis der Arbeit hilfreich, die maßgeblichen Eigenschaften zu kennen. Im Wesentlichen ist APS durch folgende Punkte gekennzeichnet:

- Beseitigung der Dualität der Verwaltung von *Fahrstraßen* im Stw und *Movement Authorities* im RBC (vgl. [\[Sch18b\]](#)) durch Etablierung von nur noch einem Sicherungssystem und Verschmelzung zu einer einzigen geometrischen *Movement Permission* (MP) (vgl. [\[Sch19a\]](#)).
- Konzipierung speziell für ETCS-Führerstandssignalisierung, um die Stärken voll auszunutzen (vgl. [\[Sch19a\]](#)).
- APS führt primär nur generische Prüffunktionen auf Anfragen aus der Leittechnik/TMS aus. Führen diese Anfragen zu einem sicheren Folgezustand, werden sie vom APS zugelassen. Die Sicherheit wird dabei durch eine generische Risikobewertungsfunktion bestimmt (vgl. [\[Sch18b\]](#)).

Vereinfacht vorstellbar ist APS als ein ETCS L3-taugliches RBC, welches zusätzlich die Weichen für die MP stellt (vgl. [\[Sch19a\]](#)). Weitere Informationen, insbesondere auch zum Business Case, finden sich in [\[Sch18b\]](#) und [\[Sch19a\]](#). Zu beachten ist, dass sich APS mitten im Entwicklungsprozess durch RCA befindet (Konzeptphase).

### 2.4.6 Open CCS On-board Reference Architecture

Um Architektur und Schnittstellen für die nächste Generation der ETCS-Fahrzeugausrüstung zu definieren, haben mehrere EVU die Initiative OCORA (Open CCS On-board Reference Architecture) gegründet (vgl. [\[Müh20\]](#)). OCORA ist das fahrzeugseitige Pendant zu RCA. OCORA verfolgt das Ziel, die LCC zu reduzieren und die Einführung von Innovationen sowie digitalen Technologien über die derzeitigen proprietären Schnittstellen hinaus zu erleichtern, indem eine modulare, aufrüstbare, zuverlässige und sichere CCS-Bordarchitektur geschaffen wird (vgl. [\[OCO21a\]](#)). Durch die Spezifikation soll eine *Plug-and-Play*-Austauschbarkeit für die CCS-On-board *Building Blocks* entstehen (vgl. [\[OCO21b\]](#)).

Wie beispielhaft aus [Abbildung 2.8](#) der RCA-Spezifikation hervorgeht, soll das Teilsystem *CCS On-board* von OCORA spezifiziert werden. Da der Fokus der Arbeit nicht auf der fahrzeugseitigen Ausrüstung liegt, wird für weitere Einzelheiten auf die Architekturbeschreibung [\[OCO21b\]](#) des kürzlich veröffentlichten Release 1 verwiesen. Analog zu RCA befindet sich OCORA im laufenden Entwicklungsprozess. Es wird wahrscheinlich zu Änderungen kommen, ebenfalls können Fehler enthalten sein.

### 2.4.7 Weitere Initiativen

Es existieren noch viele weitere (europäische) Standardisierungsinitiativen und Forschungsprojekte, die sich mit der Weiterentwicklung des Systems Bahn beschäftigen. Eine Vorstellung aller Projekte kann unmöglich im Rahmen der Arbeit erfolgen. Abschließend soll noch auf folgendes Projekt hingewiesen werden: Europe's Rail Joint Undertaking (ERJU).

Ende 2021 startete ERJU als institutionalisierte Partnerschaft im neuen EU-Forschungsrahmenprogramm Horizon Europe. Es beerbt damit S2R. Ziel ist eine Stärkung der Eisenbahn durch ergebnisorientierten und systemischen Innovationsfokus. Durch einen *Innovationspfeiler* (Innovation Pillar) und einen *Systempfeiler* (System Pillar) soll die Harmonisierung des europäischen Bahnsystems und die flächendeckende Anwendbarkeit von Innovationen sichergestellt werden (vgl. [Mob21]).

## 2.5 Sicherheit

Die Eisenbahn ist ein äußerst sicheres Verkehrsmittel (vgl. [All21]). Gemäß [DIN18] ist Sicherheit die „Freiheit von inakzeptablem Risiko“. Unter dem allgemeinen Begriff Sicherheit werden die folgenden zwei Aspekte verstanden (vgl. [Hua16], [Bra20]):

- Safety (funktionale Sicherheit): Schutz vor unbeabsichtigten zufälligen Fehlfunktionen bzw. Funktionsversagen
- Security: Schutz vor unberechtigtem Zutritt oder absichtlichen Angriffen (durch Digitalisierung zunehmend IT- bzw. Cyber-Sicherheit)

Die funktionale Sicherheit spielt auch beim vollautomatischen Bahnbetrieb eine wichtige Rolle. In sicherheitstheoretischen Betrachtungen wird insbesondere der Mensch als Sicherheitsrisiko angesehen. Auf Basis von [Hin93] wird im Mittel eine menschliche Fehlerate von  $\lambda = 10^{-3}$  Fehlern pro Handlung angenommen.

Beim vollautomatischen Bahnbetrieb ersetzt die Technik den Menschen auf dem Fahrzeug vollständig. Die Leitstelle wird vermutlich als letzte Instanz verbleiben, von der aus der Mensch überwacht und eingreifen kann. Es ist davon auszugehen, dass die Sicherheit im vollautomatischen Bahnbetrieb größer als im manuellen Bahnbetrieb ist, da der Mensch in weniger (sicherheitsrelevante) Prozesse involviert ist.

Beim Ausfall der Technik ist eine Übernahme sicherheitsrelevanter Handlungen durch den Mensch bzw. geschultes Personal zu erwarten. Dies unterscheidet sich grundsätzlich nicht vom heutigen Bahnbetrieb. In welchem Umfang diese menschliche Handlungen nötig werden, entscheidet u. a. die System- und Prozessgestaltung. Betrachtungen zum Ausfall einzelner Systeme in der Rückfallebene finden sich in [Kapitel 5](#).

Der Themenkomplex Sicherheit (im Sinne von Safety und Security) ist für den vollautomatischen Bahnbetrieb von großer Bedeutung, wird jedoch im Weiteren nicht in dieser Arbeit betrachtet. Es besteht noch erheblicher Forschungsbedarf, insbesondere zum Einsatz innovativer Technologien, wie z. B. künstlicher Intelligenz (KI). Hierzu existieren bereits erste Überlegungen (siehe z. B. [Bra21a]).

Abschließend soll auf folgende Aspekte, die für den Einsatz des vollautomatischen Bahnbetriebs in der Fläche von großer Bedeutung sind, hingewiesen werden:

1. Das Sicherheitsniveau des vollautomatischen Bahnbetriebs muss mindestens dem des manuellen Bahnbetriebs entsprechen. Dies ist entsprechend nachzuweisen (vgl. [Mey17a], [Mey17b]).
2. Für die Bestimmung von Einsatzgrenzen technischer Hinderniserkennungen sind Risikobetrachtungen notwendig. Diese dienen als Vorgabe für Akzeptanz und Entwicklung der technischen Systeme (vgl. [Tri19]).

### 2.6 Ausgangsbasis

Anhand der Betrachtung der Rahmenbedingungen zeigt sich, dass weder eine vollständige betriebliche noch technische Grundlage des vollautomatischen Bahnbetriebs existiert. Viele Prämissen wurden in den vorangegangenen Abschnitten herausgearbeitet.

Damit eine weitergehende Untersuchung möglich ist, müssen einige wesentliche Annahmen an das System *vollautomatischer Bahnbetrieb* gestellt werden. Zusammenfassend stellen insbesondere folgende, funktional-technische Anforderungen den Systemansatz bzw. die Basis für die weiteren Untersuchungen dar:

- Kontinuierlicher, bidirektionaler Datenaustausch zwischen Zug und Infrastruktur mittels Funkübertragung
- Vollüberwachte („anzeigegeführte“) Fahrt unter ETCS L2 oder höher, Verzicht auf Lichtsignale
- Implementierung von AoE
- Nutzung von einem Sicherungssystem (durch Zusammenführen von RBC und Stw)
- Sämtliche Zugbewegungen finden unter Deckung einer Fahrterlaubnis statt (MP im APS). Auf dem Fahrzeug findet eine Überwachung mittels der bekannten ETCS-MA statt.
- Digitale Karte/Streckenatlas (aktuell und hochverfügbar)
- Leistungsfähige Leittechnik (TMS mit automatischer Konfliktlösung, Störfallmanagement)
- Sicheres (und zuverlässiges) fahrzeugseitiges Feststellen der Zugintegrität, um ETCS L3 zu ermöglichen

Folgende betriebliche Voraussetzungen bzw. Anforderungen besitzen eine große Relevanz für die weiteren Untersuchungen:

- Sämtliche Zugbewegungen besitzen einen Fahrauftrag („Zugmission“). Dieser umfasst mindestens das in [S2R18] spezifizierte JP und SP. Ob und in welchem Umfang Erweiterungen für den vollautomatischen Betrieb notwendig sind, kann an dieser Stelle nicht beurteilt werden.

- Die Gültigkeit einer Fahrerlaubnis/eines Fahrtauftrags kann ein x-beliebiger Ort auf dem Fahrweg sein. (Es soll beispielsweise keine Beschränkung auf ein Signal als EoA geben.)
- Damit eine Zugbewegung im vollautomatischen Bahnbetrieb regulär stattfinden kann, muss ein Fahrtauftrag für den entsprechenden Zug vorliegen. Aufbauend darauf kann dann die Fahrerlaubnis erstellt und erteilt werden, unter dieser der Zug/das Fahrzeug fahren kann.
- Es wird nicht zwischen Zug- und Rangierfahrten unterschieden.

Der aktuelle Stand von Forschung und Technik ändert sich stetig. Dieses Jahr wird die Veröffentlichung einer neuen TSI ZZS erwartet. Ebenfalls publizieren die Initiativen regelmäßig neue Dokumente bzw. Spezifikationen. Dies kann die Aktualität und Relevanz bestimmter hier getroffener Aussagen und Anforderungen beeinflussen. Diese Limitationen sind zu beachten.

### 2.7 Zusammenfassung

Der vollautomatische Bahnbetrieb unterliegt einem Spannungsfeld verschiedener Rahmenbedingungen. Es existieren verschiedene Verkehrsarten bzw. Marktsegmente, die sich u. a. im Hinblick auf Automatisierungsfähigkeit, Anforderungen sowie Nutzen des vollautomatischen Bahnbetriebs unterscheiden.

Der vollautomatische Betrieb bei Vollbahnen ist in Deutschland zum aktuellen Zeitpunkt nicht rechtssicher durchführbar. Es sind Änderungen an Gesetzen (z. B. AEG) und Verordnungen (z. B. EBO) notwendig, des Weiteren sind Haftungsfragen zu klären.

Die aktuellen betrieblichen Regelwerke sind für den vollautomatischen Bahnbetrieb nicht geeignet. Sie weisen eine ungünstige Struktur auf und sind auf die Rolle des Menschen fokussiert, was Probleme bei einer Automatisierung der Personalaufgaben mit sich bringt. Eine Neugestaltung der betrieblichen Regelwerke (insbesondere der Fahrdienstvorschrift) ist angebracht, dabei sollten grundlegende Begriffe hinterfragt werden, wie z. B. die betriebliche Unterscheidung zwischen Zug- und Rangierfahrten.

Die DB entwickelt ein betriebliches Zielbild, das allerdings noch nicht den vollautomatischen Bahnbetrieb beschreibt. Ausgehend von den im Zielbild definierten betrieblichen Anforderungen können technische Lösungen entwickelt werden.

Basis der technischen Rahmenbedingungen ist ETCS, das mit AoE den halbautomatischen Bahnbetrieb ermöglicht. In der Sektorinitiative DSD bündelt die DB die Aktivitäten zur Modernisierung des Bahnsystems, um die Chancen der Digitalisierung für die Eisenbahn zu nutzen. RCA ist eine wichtige europäische Initiative zur Definition einer einheitlichen infrastrukturseitigen Architektur der LST. Ein wichtiges Ziel ist die Verschmelzung von RBC und bisherigem Stw zu einem Sicherheitssystem (APS). Das fahrzeugseitige Pendant zu RCA ist OCORA.

Abschließend wird auf Basis der Rahmenbedingungen eine Ausgangsbasis mit wesentlichen Anforderungen an das zukünftige System *vollautomatischer Bahnbetrieb* für die weiteren Untersuchungen definiert.

# 3 Funktionen und Umsysteme des vollautomatischen Bahnverkehrs

In diesem Kapitel werden die für den vollautomatischen Bahnverkehr übergeordneten Basisfunktionen definiert. Unter Berücksichtigung der technischen Rahmenbedingungen werden die wesentlichen Umsysteme entwickelt, die zur Erfüllung der Funktionen notwendig sind. Darauf aufbauend werden in einer Allokation die Funktionen den entsprechenden Systemen zugeordnet. Abschließend wird die Aussagekraft der durchgeführten Ermittlung diskutiert.

## 3.1 Systematisches Vorgehen

Um die Auswirkungen des vollautomatischen Bahnverkehrs auf ETCS und weitere Umsysteme analysieren zu können, müssen die für den vollautomatischen Bahnverkehr notwendigen übergeordneten Basisfunktionen und wesentlichen Umsysteme definiert sowie entsprechend zugeordnet werden. Dafür wird systematisch gemäß des in [Abbildung 3.1](#) entwickelten Ablaufs vorgegangen.

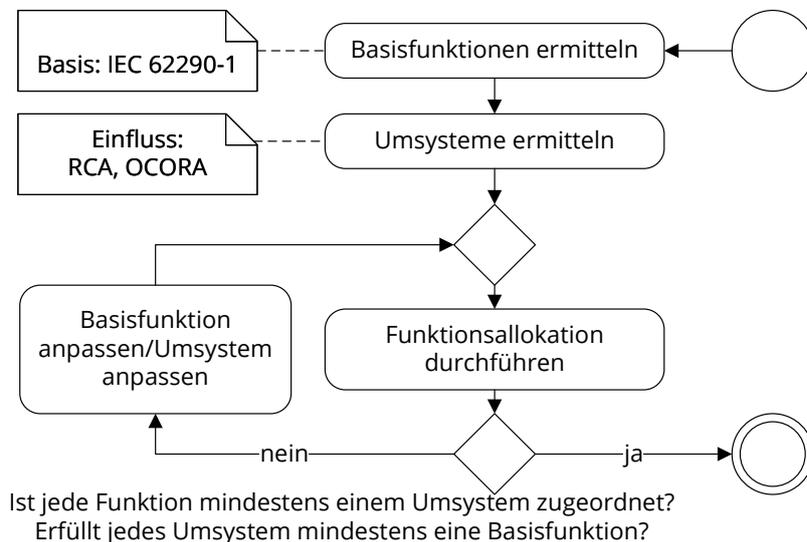


Abbildung 3.1: Vorgehensweise zur Erarbeitung der Funktionen und Umsysteme (vereinfacht schematisch dargestellt als UML-Aktivitätsdiagramm).

In den nachfolgenden Abschnitten werden die einzelnen Arbeitsschritte und Ergebnisse erläutert. Auf die Angabe von Zwischenergebnissen der einzelnen Iterationen wird aus Gründen der besseren Lesbarkeit verzichtet.

## 3.2 Übergeordnete Basisfunktionen

### 3.2.1 Vorüberlegungen

Der Bahnbetrieb umfasst eine Vielzahl von Funktionen. Damit in [Kapitel 4](#) und [Kapitel 5](#) weitergehende Analysen durchgeführt werden können, müssen wesentliche Basisfunktionen des vollautomatischen Bahnbetriebs ermittelt werden. Diese sollten möglichst allgemeingültig sein, um eine gute Verständlichkeit zu gewährleisten. Grundsätzlich sind für die Ermittlung der Basisfunktionen folgende Vorgehensweisen denkbar:

1. **Szenariorientiert:** Ausgehend von betrieblichen Szenarien können wesentliche Funktionen des vollautomatischen Bahnbetriebs aufgestellt werden.
2. **Zustandsorientiert:** Ausgehend von möglichen Zuständen des Systems (z. B. des Fahrzeugs) können wesentliche Funktionen aufgestellt werden.
3. **Erfahrungsorientiert:** Ausgehend von Erfahrungen und vorhandenem Wissen können Funktionen aufgestellt werden.
4. **Literaturorientiert:** Nutzung von anerkannten Regeln der Technik und ausgewählter Literatur zur Ermittlung der Funktionen.

Weiterhin ist zu beachten, dass die Basisfunktionen insofern vollständig sein sollen, als dass sie die für die weiteren Arbeitsschritte relevanten Aspekte abdecken. Es ist nicht Ziel dieser Arbeit, eine vollständige, detaillierte Funktionsliste des vollautomatischen Bahnbetriebs zu erarbeiten.

Auf Basis der in [Tabelle 3.1](#) aufgeführten wesentlichen Vor- und Nachteile der jeweiligen Varianten kann eine Entscheidung zur weiteren Vorgehensweise getroffen werden.

Für die Ermittlung der Basisfunktionen wird Variante 4 gewählt. Die Nutzung von anerkannten Regeln der Technik ist im Bahnwesen eine bewährte Praxis. Wie bereits in [Abschnitt 2.3](#) herausgearbeitet wurde, existieren keine betrieblichen Grundlagen des vollautomatischen Betriebs<sup>1</sup> von Vollbahnen. Somit existieren auch keine Szenarien oder Prozesse, die als Eingangsdokumente herangezogen werden können. Die Nutzung vorhandener betrieblicher Prozesse ist nicht zielführend (siehe dazu auch Ausführungen in [Unterabschnitt 2.3.4](#)).

---

<sup>1</sup> Diese werden im Rahmen des BZB in den nächsten Jahren erarbeitet. Das aktuelle BZB (für GoA 1) umfasst 70 Szenarien, die den Betriebsablauf des DBB oder dessen Rahmenbedingungen beschreiben (vgl. [\[Men21\]](#)).

Variante	Vorteil	Nachteil
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>- nachvollziehbar</li> <li>- vollständig bzw. umfassend</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ressourcenintensiv</li> <li>- benötigt (vollständige) Kenntnis der betrieblichen Szenarien</li> </ul>
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>- siehe Variante 1</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- siehe Variante 1, zzgl. Probleme mit Darstellung des Detaillierungsgrads</li> </ul>
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aufwand überschaubar</li> <li>- benötigt keine weiteren Eingangsdokumente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vollständigkeit und Korrektheit schwer nachvollziehbar bzw. überprüfbar</li> </ul>
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aufwand beherrschbar</li> <li>- Aufsetzen auf bereits erfolgten Arbeiten möglich</li> <li>- Vollständigkeit durch systematisches Vorgehen auf Basis der Eingangsdokumente gegeben</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- abhängig von der Qualität der Eingangsdokumente</li> </ul>

Tabelle 3.1: Vor- und Nachteile verschiedener Varianten zur Funktionsermittlung.

### 3.2.2 Mehrstufiger Ansatz zur Funktionsermittlung

Nach Festlegung der grundsätzlichen Vorgehensweise zur Funktionsermittlung stellt sich die Frage, wie die Funktionen strukturiert werden können. Es wird ein mehrstufiger Ansatz verfolgt. Es werden drei Stufen festgelegt, die wie folgt charakterisiert sind:

- Stufe 1: Funktionsblöcke
- Stufe 2: Basisfunktionen
- Stufe 3: weitere Funktionen

Die Funktionsblöcke sowie die Basisfunktionen beschreiben den vollautomatischen Bahnbetrieb allgemeingültig. Die untere Stufe kann zur Detaillierung und zur Verdeutlichung ausgewählter Zusammenhänge genutzt werden und ist somit nicht vollständig.

Die Funktionsblöcke werden auf Basis von [IEC06] aufgestellt. Die dort definierten Funktionsgruppen können herangezogen werden. Da sich die Norm auf den Zugbetrieb im

Nahverkehr bezieht, müssen für die Anwendung im Vollbahnbetrieb Erweiterungen vorgenommen werden.

Die Basisfunktionen werden unter Berücksichtigung von [IEC06], der *Prozesslandschaft Bahnbetrieb*<sup>2</sup> der TU Braunschweig [Bos19] und [Sch21b] erstellt. Zu beachten ist, dass die Funktionen den vollautomatischen Betrieb mit APS und ETCS abbilden sollen (siehe dazu auch Definition der Ausgangsbasis in [Abschnitt 2.6](#)).

Zur Verdeutlichung bestimmter Sachverhalte können in einer dritten Stufe weitere Funktionen zur Detaillierung der Basisfunktionen aufgestellt werden. Hierfür können grundsätzlich verschiedene Eingangsdokumente ausgewählt werden. Dies ist abhängig vom konkreten Kontext und gewählten Detaillierungsgrad.

### 3.2.3 Ergebnis

Die resultierenden Funktionsblöcke und übergeordneten Basisfunktionen zeigt [Tabelle 3.2](#). Diese sind Basis für die weiteren Untersuchungen.

Erläuterungen der Begriffe können in [Abschnitt 2.6](#) nachgelesen werden. Im Fokus stehen explizit keine Komfortfunktionen, wie z. B. *Klimaanlage steuern*, wenngleich sie in den Basisfunktionen E.1 und E.2 enthalten wären.

Während der Erstellung zeigte sich kein signifikanter Vorteil einer sehr feinen Detaillierung der Funktionen. Der hier ermittelte und in [Tabelle 3.2](#) dargestellte Detaillierungsgrad ist für die weiteren Analysen ausreichend. Daher wird die dritte Stufe im weiteren Verlauf nicht näher betrachtet. In [Abschnitt 3.6](#) werden die gewählte Vorgehensweise und Grenzen der Aussagekraft kurz diskutiert. Für weitere Untersuchungen können, sofern nötig, Funktionen der dritten Stufe hinzugefügt werden. Zur Veranschaulichung soll dies exemplarisch an dieser Stelle anhand der Basisfunktion B.1 (*Fahrweg und Abstandshaltung sichern*) gezeigt werden:

- B Sichere Zugbewegungen gewährleisten
  - B.1 Fahrweg und Abstandshaltung sichern
    - B.1.1 Flankenschutz gewährleisten
    - B.1.2 Gegenfahrerschutz gewährleisten
    - B.1.3 Folgefahrerschutz gewährleisten
    - B.1.4 Schutz an niveaugleichen Kreuzungen gewährleisten
    - B.1.5 Bewegliche Fahrwegelemente/Feldelemente sichern

---

<sup>2</sup>Die *Prozesslandschaft Bahnbetrieb* kann [Abbildung C.2](#) in [Abschnitt C.3](#) entnommen werden.

### 3 Funktionen und Umsysteme des vollautomatischen Bahnbetriebs

<b>Funktionsblock</b>	<b>Basisfunktionen</b>
A Fahrzeug fahren	A.1 Fahrprofil ermitteln (auf Basis Fahrauftrag) A.2 Beschleunigung und Bremsung steuern A.3 Beschleunigung und Bremsung überwachen
B Sichere Zugbewegungen gewährleisten	B.1 Fahrweg und Abstandshaltung sichern B.2 Fahrterlaubnis (MP, MA) sichern B.3 Zugposition sicher bestimmen
C Bahnbetrieb organisieren	C.1 Verkehrsablauf überwachen („ist“, Prognose) C.2 Verkehrsablauf regeln (inkl. „einfache“ Konfliktlösung) C.3 Fahraufträge erteilen C.4 Züge verwalten (z. B. Zugposition, ID, Status)
D Fahrweg/Umgebung überwachen	D.1 Fahrweg beobachten D.2 Relevante Umgebung überwachen D.3 Hindernisse erkennen D.4 Kollision (Zusammenprall/Aufprall) mit Objekten/Personen im Gleis verhindern
E Züge betreiben	E.1 Zugstatus steuern E.2 Zugstatus überwachen E.3 Fahrzeug/Zug in Betrieb setzen (z. B. SoM) E.4 Fahrzeug/Zug außer Betrieb setzen (z.B. EoM) E.5 Fahraufträge umsetzen
F Erkennung und Management von Störungen gewährleisten	F.1 Zugdiagnose durchführen F.2 Feuer/Rauch/Brand erkennen F.3 Entgleisung erkennen F.4 Verlust der Zugintegrität erkennen F.5 Störung behandeln F.6 Notsituation bewältigen (Ruf, Evakuierung, Überwachung)
G Fahrgastwechsel überwachen	G.1 Fahrgastraumtüren steuern G.2 Fahrgastraumtüren überwachen G.3 Sichere Anfahrbedingungen gewährleisten/Zug abfertigen G.4 Bahnsteigkante sichern
H Bahnbetrieb technisch verwalten	H.1 Digitale Karte verwalten/Streckenatlas sicher führen H.2 Technische Systeme verwalten H.3 Relevante Zustandsdaten überwachen H.4 Weitere technische Funktionen durchführen

**Tabelle 3.2:** Funktionsblöcke und Basisfunktionen des vollautomatischen Bahnbetriebs (GoA 4).

### 3.3 Wesentliche Umsysteme

Nach Abschluss der Funktionsermittlung werden gemäß der in [Abbildung 3.1](#) dargestellten Vorgehensweise die für den vollautomatischen Bahnbetrieb wesentlichen Umsysteme aufgestellt. Hierbei werden die in [Abschnitt 2.4](#) beschriebenen technischen Rahmenbedingungen berücksichtigt. Einen großen Einfluss haben die aktuellen Arbeitsstände der europäischen Standardisierungsinitiativen RCA [[RCA21b](#)] und OCORA [[OCO21b](#)]. Die entwickelte Systemarchitektur zeigt [Abbildung 3.2](#).

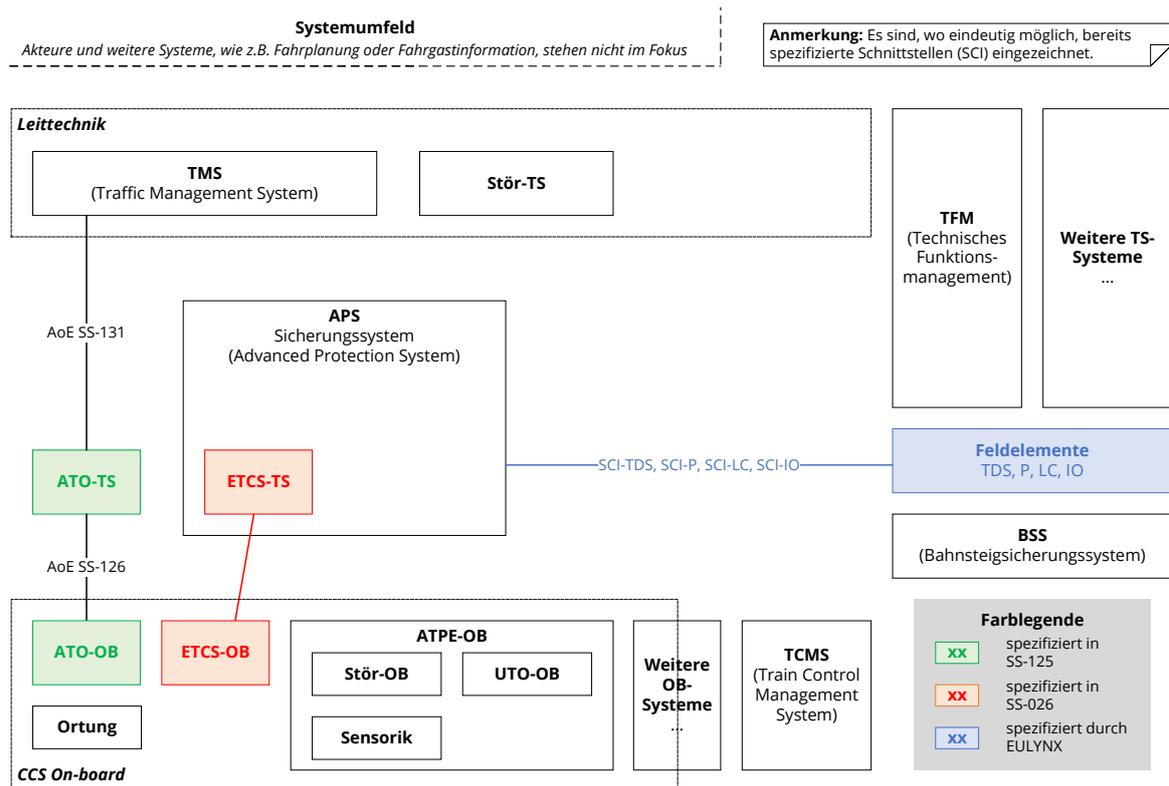


Abbildung 3.2: Architektur der wesentlichen Umsysteme des vollautomatischen Bahnbetriebs.

Es werden ausschließlich EIU-Systeme betrachtet<sup>3</sup>. Es wird ein bewusst höherer Abstraktionsgrad gewählt, um die Lesbarkeit zu verbessern. Die einzelnen Systeme sind wie folgt charakterisiert (in alphabetischer Reihenfolge):

**APS** Das Sicherungssystem umfasst die bisherigen Systeme *Stw* und *RBC*. Es enthält die Sicherungslogik und gewährleistet die sicheren Zugbewegungen. Weitere Details von *APS* können in [Unterabschnitt 2.4.5](#) nachgelesen werden.

<sup>3</sup>Es wird damit vorausgesetzt, dass die EVU die entsprechenden Systeme der EIU nutzen. In der Realität kann es hier durchaus zu Unterschieden kommen. Für weitere Details bzgl. der Systeme siehe z. B. [[OCO21b](#)].

**ATO-OB** In diesem System sind alle Funktionen enthalten, die für den halbautomatischen Bahnbetrieb (GoA 2) notwendig sind. *ATO-OB* beinhaltet die in [OCO21b] beschriebene AV-Funktionalität. Diese wird in [S2R18] als *ATO-OB* bezeichnet. Es wird das Fahrprofil anhand der Infrastrukturdaten und Fahrplaninformationen berechnet und entsprechend die Antriebs- und Bremsvorrichtungen des Fahrzeugs kontrolliert. Ebenfalls können Befehle zur Türsteuerung kontrolliert werden. *ATO-OB* ist nicht sicher. Die sichere Erweiterung für den vollautomatischen Betrieb wird fahrzeugseitig durch *ATPE-OB* bereitgestellt.

**ATO-TS** Sammelt die Fahraufträge (statische und dynamische Infrastruktur- und Fahrplandaten) von *TMS* und überträgt diese über die standardisierte Schnittstelle (SS-126) an die entsprechenden *ATO-OB* der Fahrzeuge. Im vollautomatischen Bahnbetrieb entspricht *ATO-TS* der in [OCO21b] beschriebenen *AT*-Komponente.

**ATPE-OB** Es handelt sich um eine automatische Zugsicherungserweiterung, die alle Funktionen bereitstellt, die für den vollautomatischen Bahnbetrieb benötigt werden und nicht von *ATO-OB* abgedeckt sind. *ATPE-OB* ersetzt das Betriebspersonal im Regelbetrieb. Die Bezeichnung ist analog [OCO21b], wenngleich die Aufteilung der Systeme und Funktionen innerhalb *ATPE-OB* angepasst und teilweise neu entwickelt sind. *ATPE-OB* soll keine Funktionen direkt ausführen, sondern enthält weitere Subsysteme. Damit wird ein modularer Austausch ermöglicht.

**BSS** Das Bahnsteigsicherungssystem umfasst Funktionen zur Sicherung der Bahnsteigkante. Weitere zusätzliche Informationen finden sich in [Abschnitt C.5](#).

**CCS-On-board** Umfasst alle fahrzeugseitigen CCS-Systeme. *CCS-On-board* führt keine Funktionen direkt aus, sondern dient der besseren Lesbarkeit der Arbeit.

**ETCS-OB** Ist eine sichere ETCS-Anwendung, welche die in SS-026 spezifizierten Anforderungen erfüllt. *ETCS-OB* empfängt die Fahrerlaubnis (MA) von *ETCS-TS* und meldet die Zugposition (TPR, siehe [Unterabschnitt 2.4.1](#)) unabhängig von der verwendeten Kommunikationstechnologie (z. B. GSM-R oder FRMCS). *ETCS-OB* unterstützt alle in der TSI ZZS definierten ETCS-Betriebsarten und ETCS-Level. Diese Funktionalitäten entsprechen im Wesentlichen dem in [OCO21b] spezifizierten VS-Teilsystem.

**ETCS-TS** Kommuniziert mit den registrierten ETCS-fähigen Fahrzeugen. Es übersetzt u. a. die Bewegungserlaubnisse (MP) des APS in eine ETCS-Fahrerlaubnis (MA) und sendet diese über die definierte Schnittstelle ans Fahrzeug. In Anlehnung an [OCO21b] wird nur funkbasiertes ETCS unterstützt. In gegenläufiger Richtung empfängt *ETCS-TS* die Zugpositionsmeldungen des Fahrzeugs und leitet diese weiter. Vereinfacht kann *ETCS-TS* als Übersetzer zwischen Fahrzeug und Sicherungssystem verstanden werden. *ETCS-TS* ist ein Teil von *APS*.

**Feldelemente** Enthält die in EULYNX spezifizierten Teilsysteme *TDS* (Train Detection System, Gleisfreimeldung), *P* (Point, Weiche), *LC* (Level Crossing, Bahnübergang (BÜ)) und *IO* (Generic IO). Die EULYNX Systemübersicht findet sich in [Abschnitt C.2](#), [Abbildung C.1](#).

**Leittechnik** Die *Leittechnik* überwacht und optimiert den Bahnbetrieb. Sie dient in der Arbeit als zusammenfassender Begriff, um die Lesbarkeit zu verbessern und führt keine Funktionen direkt aus.

**Ortung** Ist eine sichere fahrzeugseitige Komponente, die Sensordaten und unterstützende Informationen nutzt, um sicher und zuverlässig Informationen zur Zugposition zu liefern. Die *Ortung* umfasst ebenfalls die Funktionalitäten der Ortungssensoren. Die Odometriemessung ist eine von weiteren Funktionalitäten der *Ortung*.

**Sensorik** Mittels der *Sensorik* wird die physische Umgebung der Eisenbahn, inkl. des Fahrwegs, erfasst. Dabei wird zwischen Aufprallerkennung, Innenraum- sowie Umgebungsüberwachung unterschieden. Ebenfalls kann eine Entgleisung detektiert werden. Die *Sensorik* umfasst mindestens Funktionalitäten der in [OCO21b] spezifizierten *PER-OB*.

**Stör-OB** Gemäß [OCO21b]: Diese logische Komponente befindet sich im Zug und soll die Verantwortlichkeiten des Fahrers und des Zugbegleiters für die Reaktion im Falle eines Zwischenfalls ersetzen. *Stör-OB* verwaltet sichere reflexive Reaktionen, berechnete Reaktionen und Sicherheitsverfahren in Zusammenarbeit mit *Stör-TS*.

**Stör-TS** Gemäß [OCO21b]: Prognostiziert die geografischen, zeitlichen und ressourcenbezogenen Auswirkungen von Ereignissen auf den planmäßigen Bahnbetrieb. Die Lösungsprozesse werden abgestimmt und priorisiert. Spezifizierte Routinen werden erstellt, um nicht-reguläre Situationen mit minimalen Auswirkungen auf den Bahnbetrieb zu lösen. Geplante Routinen werden ausgeführt und unterstützende Stellen koordiniert. Ein Vorfall wird während seines gesamten Lebenszyklus von der ersten Erkennung bis zur Auflösung überwacht und verwaltet. Die „einfache“ Konflikterkennung und -lösung kann *TMS* ausführen.

**TCMS** Die Fahrzeugsteuerung enthält verschiedene Funktionalitäten. *TCMS* ist nicht Teil von *CCS-On-board*. Für die *CCS-On-board*-Systeme sind insbesondere Funktionen wie Türsteuerung, Bremssteuerung oder das Zugintegritätsmonitoring<sup>4</sup> von Bedeutung. Die Verbindung zwischen *TCMS* und *CCS-On-board* wird in [OCO21b] spezifiziert. Dies ist im Rahmen der Arbeit nicht weiter relevant.

**TFM** Das *Technische Funktionsmanagement* umfasst weitere Funktionen, die für die Durchführung des vollautomatischen Bahnbetriebs notwendig sind und von verschiedenen Systemen sowohl strecken- als auch fahrzeugseitig benötigt werden, aber nicht unmittelbar den Betriebsprozess betreffen (Querschnittsfunktionen). Beispielsweise beinhaltet *TFM* die Funktionalität der Verwaltung der Digitalen Karte.

**TMS** Das *Traffic Management System* ist ein Teil der *Leittechnik*. Es überwacht den Bahnbetrieb und kann automatisch „einfache“ Konflikte erkennen und lösen. Umfangreiche Konflikte/Störungen werden von *Störfallmanagement* behandelt. *TMS* umfasst nicht sicherheitsrelevante Handlungen sowie Nutzerbedienungen, verwaltet die Fahrtaufträge und kann den nicht-sicheren Fernzugriff auf *TCMS* ermöglichen. Zur Vereinfachung wird nicht zwischen Systemen von EIU und EVU unterschieden.

---

<sup>4</sup>Vereinfachende Annahme. Möglich wäre auch ein separates System.

**UTO-OB** Ersetzt das Betriebspersonal im Regelbetrieb und dient der Automatisierung der Fahrzeugbedienung. Umfasst u. a. sichere Funktionen zum Fahrgastwechsel (Zug abfertigen), dem Zugtürmanagement (Empfang Befehle von *ATO-OB*) oder Funktionen betreffend des Zugstatus. *UTO-OB* führt sicherheitsrelevante Funktionen aus.

**Weitere OB-Systeme** Weitere fahrzeugseitige Systeme, die nicht im Fokus der Arbeit stehen. Diese können *CCS-On-board* zugeordnet werden. Weitere Details können beispielsweise [OCO21b] entnommen werden.

**Weitere TS-Systeme** Weitere streckenseitige CCS-Systeme, die nicht im Fokus der Arbeit stehen. [OCO21b] können beispielsweise weitere Details entnommen werden.

### 3.4 Funktionsallokation

Die zuvor ermittelten Basisfunktionen können den wesentlichen Umsystemen zugeordnet werden. Jede übergeordnete Basisfunktion wird somit von mindestens einem System ausgeführt. Im Umkehrschluss muss jedes System mindestens eine Funktion ausführen. Gemäß der in [Abbildung 3.1](#) dargestellten Vorgehensweise wird iterativ vorgegangen. Sollten Funktionen/Umsysteme nicht zugeordnet werden können, findet eine entsprechende Überarbeitung statt, bis das Abbruchkriterium erfüllt ist. Die Funktionsallokation kann übersichtlich in einer Tabelle dargestellt werden. Das Gesamtergebnis zeigt [Tabelle 3.3](#).

Funktionen der unteren Stufe sind in der Darüberliegenden enthalten. Einige Umsysteme werden den Basisfunktionen implizit zugeordnet. Beispielsweise liefert *ETCS-OB* bei Ausführung der Basisfunktion B.3 (*Zugposition sicher bestimmen*) die Fahrzeugposition. Die eigentliche Bestimmung erfolgt durch *APS*.

Ausgehend von der entwickelten Zuordnung können in weiteren Schritten der Einfluss auf ETCS untersucht und systemische Vergleiche zwischen den verschiedenen Automatisierungsgraden durchgeführt werden (siehe [Kapitel 4](#) und [Kapitel 5](#)).

### 3 Funktionen und Umsysteme des vollautomatischen Bahnbetriebs

Legende:  
*x*...Basisfunktion wird vom System ausgeführt  
*(x)*...Basisfunktion kann in Teilen vom System ausgeführt werden

Funktionsblöcke und Basisfunktionen	APS	ATO-OB	ATO-TS	BSS	ETCS-OB	ETCS-TS	Feldelemente	Ortung	Sensorik	Stör-OB	Stör-TS	TCMS	TFM	TMS	UTO-OB	Weitere OB-Systeme	Weitere TS-Systeme
<b>A Fahrzeug fahren</b>																	
A.1 Fahrprofil ermitteln (auf Basis Fahrtauftrag)		x															
A.2 Beschleunigung und Bremsung steuern		x										x					
A.3 Beschleunigung und Bremsung überwachen		x										x					
<b>B Sichere Zugsbewegungen gewährleisten</b>																	
B.1 Fahrweg und Abstandshaltung sichern	x						x										
B.2 Fahrerlaubnis (MP, MA) sichern	x				x	x											
B.3 Zugposition sicher bestimmen	x				x	x	x <sup>c</sup>	x									
<b>C Bahnbetrieb organisieren</b>																	
C.1 Verkehrsablauf überwachen („ist“, Prognose)															x		
C.2 Verkehrsablauf regeln (inkl. „einfache“ Konfliktlg.)				x <sup>a</sup>											x		
C.3 Fahrtaufträge erteilen															x		
C.4 Züge verwalten (z. B. Zugposition, ID, Status)															x		
<b>D Fahrweg/Umgebung überwachen</b>																	
D.1 Fahrweg beobachten									x								
D.2 Relevante Umgebung überwachen									x								
D.3 Hindernisse erkennen									x								
D.4 Kollision (Zusammenprall/Aufprall) mit Objekten/Personen im Gleis verhindern										x	(x) <sup>b</sup>						
<b>E Züge betreiben</b>																	
E.1 Zugstatus steuern												x		(x) <sup>e</sup>	x		
E.2 Zugstatus überwachen												x	x	(x) <sup>e</sup>	x		
E.3 Fahrzeug/Zug in Betrieb setzen (z. B. SoM)	x				x	x								x <sup>g</sup>	x <sup>f</sup>		
E.4 Fahrzeug/Zug außer Betrieb setzen (z. B. EoM)	x				x	x								x <sup>g</sup>			
E.5 Fahrtaufträge umsetzen		x	x <sup>a</sup>									x			x		
<b>F Erkennung und Management von Störungen gewährleisten</b>																	
F.1 Zugdiagnose durchführen									(x)	x		x					
F.2 Feuer/Rauch/Brand erkennen									x								
F.3 Entgleisung erkennen									x								
F.4 Verlust der Zugintegrität erkennen	x <sup>c</sup>				x <sup>d</sup>		x <sup>c</sup>					x					
F.5 Störung bewältigen/lösen										x	x						
F.6 Notsituation bewältigen (Ruf, Evakuierung, Überwachung)										x	x						
<b>G Fahrgastwechsel überwachen</b>																	
G.1 Fahrgastraumtüren steuern		x <sup>h</sup>										x				x	
G.2 Fahrgastraumtüren überwachen												x				x	
G.3 Sichere Anfahrbedingungen gewährleisten/Zug abfertigen																x	
G.4 Bahnsteigkante sichern				x													
<b>H Bahnbetrieb technisch verwalten</b>																	
H.1 Digitale Karte verwalten/Streckenatlas sicher führen														x			
H.2 Technische Systeme verwalten														x			
H.3 Relevante Zustandsdaten überwachen														x			
H.4 Weitere technische Funktionen durchführen																x	x

<sup>a</sup> Übertragung nach ATO-OB.

<sup>b</sup> Mitwirkung denkbar. Abhängig von konkreten Situationen und entsprechender Systemspezifikation (siehe Abschnitt 4.4.3).

<sup>c</sup> unabhängig vom Automatisierungsgrad, nur in ETCS L2 und HL3 notwendig.

<sup>d</sup> unabhängig vom Automatisierungsgrad, zwingend notwendig für ETCS L3, Übermittlung an ETCS-TS.

<sup>e</sup> Hintergelagertes System zur Anzeige, kann nicht-sicheren Fernzugriff auf TCMS ermöglichen. (Ähnlich TM-Funktionalität gemäß [OCO21b]).

<sup>f</sup> UTO-OB ersetzt Eingabe von Fahrer-/Zugdaten (Details zur Prozedur SoM: siehe Abschnitt 4.3.3).

<sup>g</sup> TMS gibt Kommando.

<sup>h</sup> Gibt Türsteuerungskommando gemäß JP (vgl. [S2R18], ID 7.2.2.2-7.2.2.4).

Tabelle 3.3: Funktionsallokation vollautomatischer Bahnbetrieb (GoA 4).

### 3.5 Zwischenfazit

Auf Basis der Umsysteme und Funktionsallokation soll an dieser Stelle ein kurzes Zwischenfazit gezogen werden. Folgende erste wesentliche Erkenntnisse können festgehalten werden:

- Detaillierte Funktionen bringen im Rahmen der Arbeit keinen signifikanten Mehrwert für die Funktionsallokation. Sie werden nicht näher betrachtet und sind daher nicht aufgeführt.
- Im vollautomatischen Bahnbetrieb sind weitere Umsysteme, wie beispielsweise *Sensorik* oder *UTO-OB* nötig, um die Funktionen des Betriebspersonals zu ersetzen.
- Es findet eine Verlagerung der streckenseitigen Technik auf das Fahrzeug statt.
- Eine Verlagerung von Funktionen/Intelligenz findet nur in geringem Umfang statt. Die Technik ersetzt den Menschen an „gleicher Stelle“, z. B. Basisfunktion A.1 (*Fahrprofil ermitteln*).
- Es sind neue und vielfältige Schnittstellen nötig (siehe dazu auch Ausführungen in [Abschnitt 3.6](#)). Eine detaillierte Analyse der Schnittstellen wird nicht weiter durchgeführt. Beispielfähig muss eine Schnittstelle zwischen *UTO-OB* und *ETCS-OB* geschaffen werden, um die Basisfunktion E.3 (*Fahrzeug/Zug in Betrieb setzen*) zu erfüllen. Auf weitere Details bzgl. der Prozedur SoM wird in [Unterabschnitt 4.3.3](#) eingegangen. Ein weiteres Beispiel betreffend der Schnittstellenthematik findet sich in [Unterabschnitt 4.4.3](#).
- Die in diesem Kapitel aufgestellten Funktionen und Umsysteme können als Anforderungen an den vollautomatischen Bahnbetrieb verstanden werden.

### 3.6 Diskussion

In den vorangegangenen Abschnitten wurde die Vorgehensweise bereits erläutert und ein kurzes Zwischenfazit gezogen. Die Vorgehensweise besitzt gewisse Vor- und Nachteile, insbesondere existieren Grenzen bzgl. der Aussagekraft:

1. Es ist nicht der Anspruch, dass die Funktionen den Bahnbetrieb vollständig im Detail beschreiben. Hierfür wären umfassende betriebliche Kenntnisse notwendig. Die dafür notwendigen Dokumente existieren bislang nicht für den Vollbahnbereich oder sind nicht öffentlich zugänglich. Dies trifft im Besonderen auf Konzepte der Rückfallebene zu. Durch die Verwendung des mehrstufigen Ansatzes kann jedoch eine Vollständigkeit<sup>5</sup> der Funktionen der oberen Stufe(n) gewährleistet werden.
2. Der Schwerpunkt der Umsysteme liegt zur Abgrenzung in der Untersuchung des Einflusses auf ETCS und der Identifikation systemischer Unterschiede zwischen den Automatisierungsgraden. Das Systemumfeld der Betrachtungen (z. B. die Akteure) und

---

<sup>5</sup>im Sinne des Fokus der Arbeit.

die Vollständigkeit der Systeme wird durch die Berücksichtigung von RCA und OCORA (*weitere OB-/TS-Systeme*) abgesichert. In diesem abgesteckten Rahmen bewegen sich die weiteren Untersuchungen dieser Arbeit.

3. In [Abbildung 3.2](#) sind ausschließlich an eindeutigen Stellen bereits spezifizierte Schnittstellen eingezeichnet. Die Ermittlung und Spezifikation weiterer Schnittstellen erfolgt beispielsweise im Rahmen von RCA und OCORA. Dies ist nicht trivial. Im Rahmen der Arbeit soll die Schnittstellenthematik nicht näher behandelt werden. In [Unterabschnitt 4.4.3](#) wird die Problematik anhand eines Beispiels deutlich. Es besteht noch erheblicher Untersuchungsbedarf.
4. Es ist bewusst eine gewisse Unschärfe in der Funktionsallokation vorhanden, da diese zum Teil ausgearbeitete betriebliche Prozesse voraussetzt. Diese können für die weiteren Analysen als vorerst nicht problematisch eingeordnet werden. Im Einzelfall kann in detaillierten Betrachtungen darauf eingegangen werden.

Insgesamt stellt das Vorgehen der Ermittlung in diesem Kapitel einen Kompromiss zwischen Genauigkeit, Verständlichkeit sowie Verfügbarkeit begrenzter Ressourcen dar. Durch den mehrstufigen Ansatz der Funktionsermittlung besteht die Möglichkeit, in weiterführenden Arbeiten auf dem hier ermittelten Kenntnisstand aufzubauen. Dies trifft ebenfalls auf die modularen Umsysteme zu.

### 3.7 Zusammenfassung

Für die Beschreibung des vollautomatischen Bahnbetriebs wurden acht Funktionsblöcke sowie 33 übergeordnete Basisfunktionen aufgestellt und wesentliche Umsysteme definiert. Darauf aufbauend wurden die Funktionen den Systemen zugeordnet (Funktionsallokation). Dies stellt eine wichtige Grundlage für weitergehende Untersuchungen dar. Erste Erkenntnisse konnten in einem kurzen Zwischenfazit gewonnen werden. Eine wesentliche Erkenntnis ist die Notwendigkeit weiterer Umsysteme, die das Betriebspersonal im vollautomatischen Bahnbetrieb ersetzen. Abschließend wurden Interpretationsgrenzen diskutiert.

## 4 Einfluss des vollautomatischen Bahnbetriebs auf ETCS

In diesem Kapitel wird eine erste Einschätzung der Auswirkungen des vollautomatischen Bahnbetriebs auf ETCS vorgenommen. Dafür werden die Betriebsarten, Prozeduren und weitere ausgewählte Aspekte analysiert und der Einfluss des vollautomatischen Bahnbetriebs bewertet. Aufbauend darauf können die Auswirkungen abgeschätzt und weiterer Untersuchungsbedarf ermittelt werden.

### 4.1 Untersuchungsgegenstand

Der vollautomatische Bahnbetrieb kann sich unterschiedlich auf die verschiedenen Funktionalitäten und Eigenschaften von ETCS auswirken. Daher werden in den nachfolgenden Abschnitten ausgewählte zweckmäßige Aspekte untersucht. Der Schwerpunkt liegt auf der Betrachtung der Betriebsarten und Prozeduren. Im Rahmen der Analyse ist es nicht möglich, den Einfluss bis ins kleinste Detail zu bestimmen. Aufbauend auf den Erkenntnissen kann abgeschätzt werden, an welchen Punkten weitergehender Untersuchungsbedarf besteht. Die Betrachtung fokussiert sich auf übergeordnete und systemische funktionale Auswirkungen. Gegenstand der Analyse sind keine konkreten Auswirkungen auf ETCS-Planungs- und Projektierungsregeln oder betriebliche Prozesse der EIU und EVU.

Grundlegend gilt die in [Abschnitt 2.6](#) aufgestellte Ausgangsbasis. Die nachfolgenden Untersuchungen nutzen die SRS (SS-026) gemäß [\[ERA16\]](#) und konzentrieren sich auf den Regelbetrieb. Die Betriebsart AD ist bislang nicht in der SRS spezifiziert, sodass keine detaillierten Betrachtungen diesbezüglich möglich sind. Da AD auf FS aufsetzt (vgl. [\[Tri20b\]](#)), werden als vereinfachende Annahme die beiden Betriebsarten gleichgesetzt.

Da SS-125 [\[S2R18\]](#) eine vorläufige Ausgabe ist, wird nicht näher auf die jeweiligen Rollen eingegangen. AoE ist bislang für STO (GoA 2) spezifiziert. Im vollautomatischen Bahnbetrieb können sich weitere Anforderungen und Änderungen ergeben.

Mit dem Ziel, eine möglichst übersichtliche und verständliche Spezifikation zu schaffen, ist zusätzlich eine Untersuchung zur Komplexitätsreduzierung sinnvoll.

### 4.2 Betriebsarten

#### 4.2.1 Vorüberlegungen und Methodik

Die Betriebsarten des ETCS-Fahrzeuggeräts bestimmen maßgeblich das Systemverhalten. Die in [\[ERA16\]](#) spezifizierten Betriebsarten können wie folgt klassifiziert werden (vgl. auch [\[Tri20b\]](#)):

- Regelbetrieb: Full Supervision (FS), Limited Supervision (LS), On Sight (OS), Shunting (SH)
- Rückfallebene: Staff Responsible (SR)
- Gefahrensituationen: Trip (TR), Post Trip (PT), Reversing (RV)
- Doppeltraktion: Non Leading (NL), Sleeping (SL), Passive Shunting (PS)
- Strecken ohne ETCS-Ausrüstung: National System (SN), Unfitted (UN)
- Ausschalt- und Stöorzustände: Stand By (SB), Isolation (IS), No Power (NP), System Failure (SF)

ETCS ist ein System, bei dem der Fahrer wesentliche Funktionen ausführt und entsprechend von ETCS überwacht wird. Um den Einfluss des vollautomatischen Bahnbetriebs auf die Betriebsarten abschätzen zu können, werden die in SS-026 spezifizierten Betriebsarten zzgl. AD näher charakterisiert und die Rolle des Fahrers auf Basis der SRS genauer analysiert. Darauf aufbauend kann, als erste Betrachtung, der Einfluss des vollautomatischen Bahnbetriebs auf die jeweiligen Betriebsarten abgeschätzt werden, indem jede Betriebsart einer der folgenden vier Kategorien zugeordnet wird:

1. Betriebsart besitzt keine Relevanz für den vollautomatischen Bahnbetrieb (aufgrund der in [Abschnitt 2.6](#) definierten Ausgangsbasis)
  - muss nicht näher betrachtet werden
2. Betriebsart kann im vollautomatischen Bahnbetrieb relevant sein, der Fahrer übernimmt wichtige Funktionen der Funktionsblöcke A und D
  - genauere Betrachtung notwendig
3. Betriebsart kann im vollautomatischen Bahnbetrieb relevant sein, der Fahrer übernimmt weitere Funktionen bzw. Einzelbedienungen
  - genauere Betrachtung notwendig
4. Betriebsart kann im vollautomatischen Bahnbetrieb relevant sein, der Fahrer übernimmt keine Funktionen
  - muss nicht näher betrachtet werden, Einfluss auf Betriebsart vernachlässigbar

Die Einteilung der Betriebsarten in die entsprechenden Kategorien wird systematisch durchgeführt. Mittels eines Entscheidungsbaums können die Betriebsarten den entsprechenden Kategorien nachvollziehbar zugeteilt werden. Die Methodik zeigt [Abbildung 4.1](#). Zu beachten ist, dass im Detail weitere Herausforderungen auftreten können. Diese können zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht abgeschätzt werden.

In den folgenden Abschnitten wird die Einordnung der Betriebsarten in die entsprechenden Kategorien erläutert und der Einfluss des vollautomatischen Bahnbetriebs entsprechend bewertet.

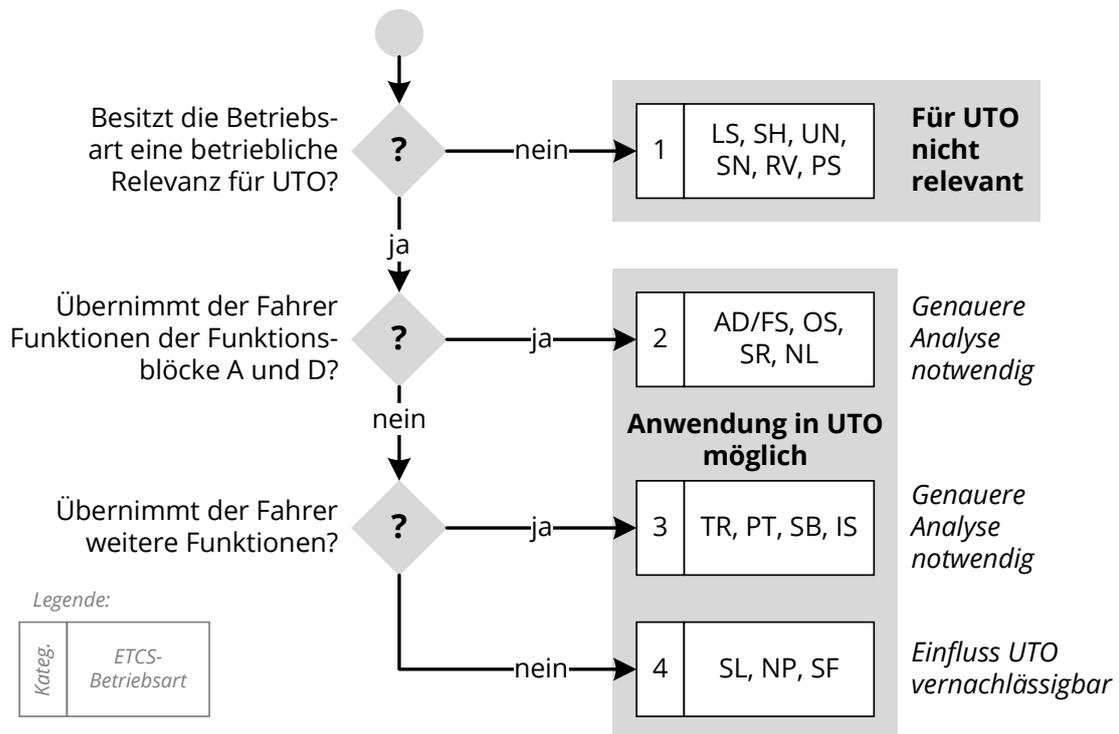


Abbildung 4.1: Entscheidungsbaum zur Kategorisierung der ETCS-Betriebsarten.

#### 4.2.2 Nicht relevante Betriebsarten

Die Betriebsarten der Kategorie 1 werden als nicht relevant für den vollautomatischen Bahnbetrieb eingeschätzt und sind in [Tabelle 4.1](#) aufgeführt. Erläuterungen und Anmerkungen dazu sind ebenfalls in [Tabelle 4.1](#) zu finden.

Der Verzicht auf **SH** kann die Komplexität der Spezifikation verringern. Es sollte allerdings näher untersucht werden, wie Rangierbewegungen vollautomatisch (betrieblich) durchgeführt werden können. Dies ist abhängig von der konkreten System- und Prozessgestaltung und sollte beispielsweise im BZB geklärt werden. Technisch sind verschiedene Varianten denkbar, z. B. in AD/FS oder OS. Weitere Überlegungen zum Umgang mit den variablen Zugdaten finden sich in [Unterabschnitt 4.2.4](#).

Bei **RV** handelt es sich um einen Spezialfall (Rückwärtsfahren im Evakuierungsfall). Im vollautomatischen Bahnbetrieb wird es keinen „Führerstand“ mehr geben, da kein Personal auf dem Zug ist. Die Funktionalität kann beispielsweise (1) automatisch durch das Fahrzeug oder (2) mittels Fernsteuerung (Remote) aus der Leitstelle durchgeführt werden. Für die Fernsteuerung wäre ein neues Umsystem notwendig. Die Nutzung der Betriebsart RV ist nicht mehr notwendig.

Es könnten theoretisch Situationen konstruiert werden, in denen beispielsweise UN angewendet werden kann. Diese Spezialfälle sollen hier nicht betrachtet werden.

Betriebsart	Erläuterungen/Anmerkungen, weshalb nicht relevant
LS	Alle Zugbewegungen finden vollüberwacht bzw. anzeigegeführt unter Deckung einer Fahrerlaubnis statt.
SH	Alle Zugbewegungen finden vollüberwacht bzw. anzeigegeführt unter Deckung einer Fahrerlaubnis statt. – Siehe Ausführungen im Text.
SN	Alle Strecken sind mit ETCS ausgerüstet.
UN	Alle Strecken sind mit ETCS ausgerüstet.
RV	Es ist kein Fahrer mehr auf dem Zug, somit gibt es keinen „Führerstand“. RV wird nicht benötigt. – Siehe Ausführungen im Text.
PS	Da SH nicht genutzt wird, ist auch PS irrelevant. Ein möglicher Ersatz könnte NL sein.

**Tabelle 4.1:** ETCS-Betriebsarten ohne Relevanz für den vollautomatischen Bahnbetrieb (Kategorie 1).

### 4.2.3 Relevante Betriebsarten

Die für den vollautomatischen Bahnbetrieb relevanten Betriebsarten sind in drei weitere Kategorien unterteilt (siehe auch [Abbildung 4.1](#)). Eine nähere Betrachtung der Betriebsarten der Kategorien 2 und 3 ist notwendig, der Einfluss des vollautomatischen Bahnbetriebs auf die Betriebsarten der Kategorie 4 kann als vernachlässigbar eingeschätzt werden.

#### Vernachlässigbarer Einfluss auf die Betriebsarten (Kategorie 4)

Die Betriebsarten, in denen der Fahrer keine weiteren Funktionen übernimmt, sind in [Tabelle 4.2](#) aufgeführt. Da der Fahrer auf ETCS bezogen keine Verantwortung trägt und keine Funktionen ausführt, besitzt die Automatisierung auf diese Betriebsarten einen vernachlässigbaren Einfluss. Die Betriebsarten können im vollautomatischen Bahnbetrieb weiterhin auftreten.

Betriebsart	Erläuterungen/Anmerkungen
SL	Kann unabhängig vom Automatisierungsgrad auftreten. Könnte als Alternative zu SB angesehen werden, siehe dazu auch Ausführungen in <a href="#">Unterabschnitt 4.2.4</a> .
NP	Kann unabhängig vom Automatisierungsgrad auftreten. Bei Abstellungen mit begrenzter Zeitdauer ist SB vorzuziehen. – Siehe Ausführungen im Text.
SF	Kann unabhängig vom Automatisierungsgrad auftreten. Für den Regelbetrieb ist SF nicht von Bedeutung. Für die Rückfallebene sind Konzepte zu entwickeln.

**Tabelle 4.2:** ETCS-Betriebsarten, die im vollautomatischen Bahnbetrieb angewendet werden können – Einfluss UTO vernachlässigbar (Kategorie 4).

Um in der Betriebsart **NP** eine Cold Movement Detection (CMD) zu ermöglichen, muss eine separate Stromversorgung vorhanden sein. Gemäß [ERA16], Kapitel 3.15.8, muss die fahrzeugseitige ERTMS/ETCS-Ausrüstung nach dem Abschalten (d. h. in NP) in der Lage sein zu erkennen und aufzuzeichnen, ob das Fahrzeug während eines Zeitraums (von mindestens 72 Stunden) bewegt wurde oder nicht. Beim erneuten Einschalten muss die fahrzeugseitige ERTMS/ETCS-Ausrüstung die gespeicherten Informationen über das „Cold Movement“ verwenden, um den Status der von der fahrzeugseitigen Ausrüstung gespeicherten Informationen zu aktualisieren.

### Einfluss auf Betriebsart vorhanden (Kategorie 2)

Die Betriebsarten, in denen der Fahrer Funktionen der Funktionsblöcke A und D ausführt, sind in [Tabelle 4.3](#) aufgeführt. Der Einfluss des vollautomatischen Bahnbetriebs ist entsprechend hoch, da diese Funktionen mit einer großen Verantwortung verbunden sind.

Betriebsart	Erläuterungen zum GoA4-Einfluss
AD	Regelbetriebsart für UTO, Annahme: Gleichsetzen mit FS. Es ist kein Fahrer mehr vorhanden. Für UTO müssen weitere Eingangssignale vorliegen, z. B. die Funktionsfähigkeit des Umsystems <i>Sensorik</i> . – Siehe Ausführungen im Text.
FS	Ist die Basis von AD, Annahme: Gleichsetzen mit AD. Es ist kein Fahrer mehr vorhanden. Eine Anwendung ist weiterhin denkbar. – Siehe Ausführungen im Text.
OS	Es befindet sich kein Personal mehr auf dem Zug, somit wird OS in der jetzigen Form nicht mehr vorkommen. Eine Anwendung ist denkbar. – Siehe Ausführungen im Text.
SR	Die Anwendung von SR in der jetzigen Form wird nicht mehr vorkommen, der Einsatz wäre angepasst denkbar. – Siehe Ausführungen im Text.
NL	Kann unabhängig vom Automatisierungsgrad auftreten. Die Steuerung könnte – im Gegensatz zu SL – von ATO-OB übernommen werden (als Fahrerersatz).

**Tabelle 4.3:** ETCS-Betriebsarten, die im vollautomatischen Bahnbetrieb angewendet werden können – Einfluss UTO vorhanden (Kategorie 2).

Der jeweilige Einsatz der in [Tabelle 4.3](#) aufgeführten Betriebsarten kann sich in Abhängigkeit des betrieblichen Anwendungsfalls ändern. Die folgenden Überlegungen sind als Diskussionsgrundlage zu verstehen. Für die einzelnen Aspekte sind jeweils detaillierte Konzepte zu erarbeiten und zu untersuchen.

Es ist zu klären, ob **AD** als Standardbetriebsart für den vollautomatischen Bahnbetrieb ausreicht oder eine neue Betriebsart notwendig ist. Für AD muss der Fahrerschlüssel vorhanden sein, für UTO ist dies nicht notwendig. Zudem müssen in UTO weitere Eingangssignale der verschiedenen, neuen Umsysteme vorliegen (z. B. *Sensorik*). Es muss (durch ETCS) sichergestellt werden, dass diese Systeme funktionsfähig sind. Andernfalls darf keine Zug-

fahrt zugelassen werden. Dies kann als eine Art Ersatz des Totmannschalters verstanden werden, der die Anwesenheit und Handlungsfähigkeit des Fahrers prüft. Sobald die neue TSI ZZS und eine stabile, öffentlich zugängliche Spezifikation von AD vorliegt, wird eine Untersuchung dieser Fragen empfohlen.

FS wird automatisch beim Vorliegen aller Daten von der Strecke ausgewählt. Im vollautomatischen Bahnbetrieb wird FS als Betriebsart für Fahrzeugbewegungen im Regelbetrieb nicht mehr benötigt. Allerdings kann FS als „Vorzustand“ für AD verwendet werden (Verfügbarkeit aller Daten). Der Einsatz in der Rückfallebene bei einer ATO-Störung wäre möglich. Der Unterschied zu einer möglichen Anwendung von OS oder SR ist das Vorliegen einer MA sowie ein freier Fahrweg. Falls die Steuerung mittels Fernzugriff (Remote) durchgeführt wird, ist ein weiteres Umsystem notwendig. Siehe dazu auch Ausführungen in [Abschnitt 6.1](#).

Die Anwendung von OS ist im Regelbetrieb denkbar, z. B. beim Stärken. Folgende Varianten sind denkbar: (1) *Sensorik* und *Stör-OB* handeln automatisch, (2) Aufschaltung der Kame-rabilder und Überwachung des Fahrwegs durch Personal oder (3) Fernsteuerung (Remote) aus der Leitstelle. Das Stärken könnte auch automatisch mit entsprechendem Fahrauftrag in AD durchgeführt werden. Im Störbetrieb ist eine Anwendung ebenfalls möglich.

Denkbar ist die Anwendung SR im Störfall, wenn keine MA auf dem Fahrzeug vorliegt. Dies könnte automatisch mittels Intelligenz von *Stör-OB* und *Stör-TS* geschehen (der Zug bewegt sich langsam fort). Alternativ ist auch eine Fernsteuerung (Remote) durch die Leitstelle möglich, bei der ein neues System notwendig wäre. Hierfür könnte ggf. auch eine neue Betriebsart definiert werden, die SR ablöst. Falls eine MA vorliegt, sollte OS (oder AD/FS) genutzt werden.

### **Einfluss auf Betriebsart vorhanden (Kategorie 3)**

Die Betriebsarten, in denen der Fahrer andere oder weitere Funktionen ausführt, sind in [Tabelle 4.4](#) aufgeführt.

Betriebsart	Erläuterungen zum GoA 4-Einfluss
TR	Kann unabhängig vom Automatisierungsgrad auftreten. Problem: Fahrer muss quittieren, um Mode zu verlassen. – Siehe Ausführungen im Text.
PT	Kann unabhängig vom Automatisierungsgrad auftreten. Problem: Wie wird die darauf folgende Startroutine ausgewählt? – Siehe Ausführungen im Text.
SB	Kann unabhängig vom Automatisierungsgrad auftreten. Problem: Wie werden die Eingaben vom Fahrer ersetzt? – Siehe Ausführungen im Text.
IS	Eine <i>ETCS-OB</i> -Störung kann unabhängig vom Automatisierungsgrad auftreten. Problem: Wie kann ETCS überbrückt werden? – Siehe Ausführungen im Text.

**Tabelle 4.4:** ETCS-Betriebsarten, die im vollautomatischen Bahnbetrieb angewendet werden können – Einfluss UTO vorhanden (Kategorie 3).

Die Verantwortung des Fahrers ist in diesen Betriebsarten begrenzt, es handelt sich oftmals um Einzelbedienungen. Diese können sicherheitsrelevant sein. Der Einfluss des voll-

automatischen Bahnbetriebs auf diese Betriebsarten wird geringer eingeschätzt, wenngleich weiterhin potentiell kritisch in Bezug auf die Automatisierung.

In **TR** sind Anpassungen notwendig, da der Fahrer die Zwangsbremmung nicht quittieren kann. Denkbar wäre eine Quittierung (1) automatisch durch ein System (z. B. *Stör-OB/UTO-OB*), (2) per Kommando aus der Leitstelle (Einzelbedienung) oder (3) mittels Fernsteuerung (Remote). Möglich ist auch (4) der ersatzlose Entfall der Quittierung durch Anpassung der Spezifikation.

Die Startroutine in **PT** könnte beispielsweise durch einen Fahrtauftrag oder Fernsteuerung (Remote) ausgewählt werden. Eine gemeinsame Anpassung der Betriebsart – zusammen mit TR – sollte erwogen werden.

Die Fahrereingaben in **SB** in Verbindung mit der Prozedur SoM sind potentiell kritisch. Denkbar wäre (1) die Eingabe mittels Fernsteuerung (Remote), (2) der Ersatz der Funktionen durch *UTO-OB*, (3) eine entsprechende Anpassung der Betriebsart oder (4) die Entwicklung einer neuen Betriebsart für die Abstellung im vollautomatischen Bahnbetrieb (siehe hierzu auch Ausführungen in [Unterabschnitt 4.2.4](#)).

Bei **IS** handelt es sich um einen Spezialfall (vollständige *ETCS-OB*-Störung). Es werden im Folgenden die Auswirkungen auf ETCS betrachtet und nicht auf den weiterführenden betrieblichen Prozess. Es ist nicht mehr möglich, dass der Fahrer den ETCS-Störschalter auf dem Fahrzeug betätigt und die „Isolation“ durchführt. Für den Regelbetrieb ist IS nicht von Bedeutung. Es ist zu klären, wie ein Fahrzeug ohne funktionierendes ETCS-OB abgeschleppt werden kann. Denkbar wäre beispielsweise (1) die Fernsteuerung (Remote) aus der Leitstelle oder (2) die Übersteuerung der Signale durch weitere Systeme. Es müssen ggf. zusätzliche betrieblich-organisatorische Maßnahmen ergriffen werden, um Fehlbedienungen im Sinne von Safety und Security<sup>1</sup> zu verhindern.

### 4.2.4 Fazit und weitere Überlegungen

Die Auswirkungen des vollautomatischen Bahnbetriebs auf die einzelnen Betriebsarten wurden analysiert und abgeschätzt. Im Wesentlichen wird der Einfluss wie folgt bewertet:

- Die Betriebsarten LS, SH, SN, UN, RV und PS sind im vollautomatischen Bahnbetrieb nicht relevant (und könnten aus der Spezifikation entfallen).
- Alle anderen Betriebsarten können im vollautomatischen Bahnbetrieb – in Abhängigkeit vom betrieblichen Anwendungsfall – zum Einsatz kommen. Um die entsprechenden Funktionalitäten abdecken zu können, sind Änderungen an der ETCS-Spezifikation oder die Nutzung weiterer Umsysteme notwendig. Es werden Detailbetrachtungen empfohlen.
- Der Einfluss des vollautomatischen Bahnbetriebs auf die Betriebsarten SL, NP und SF wird als vernachlässigbar eingeschätzt.

Auf Basis dieser Abschätzung können weitere Überlegungen angestellt werden:

---

<sup>1</sup>Die Begriffe wurden in [Abschnitt 2.5](#) eingeführt.

- Die Betriebsarten AD, FS, OS, SR und NL können im vollautomatischen Bahnbetrieb benötigt werden. Eine Anwendung ist sowohl im Regel- als auch im Störbetrieb denkbar. Anpassungen oder Änderungen können zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht vollumfänglich abgeschätzt werden. Dies ist abhängig von der konkreten System- und Prozessgestaltung. In [Unterabschnitt 4.2.3](#) können weiterführende Überlegungen als Diskussionsgrundlage nachgelesen werden. Konzepte zur Betriebsführung sind zu erstellen, um den Betriebsarten betriebliche Anwendungsfälle zuordnen zu können. Insbesondere sollten aufbauend auf den betrieblichen Szenarien verschiedene technische Umsetzungsvarianten erarbeitet werden. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit der Erstellung betrieblicher Anforderungen, um in einem (ggf. iterativen Prozess) technische Lösungen abzuleiten (wie in [Unterabschnitt 2.3.5](#) eingeführt).
- Die Betriebsarten TR, PT, SB und IS treten unabhängig vom Automatisierungsgrad auf. Es besteht weiterer Untersuchungsbedarf, wie die bisherigen Bedienhandlungen ohne Fahrer auf dem Fahrzeug durchgeführt werden können. Die Betriebsart IS ist dabei ein Spezialfall, der gesondert untersucht werden sollte.
- ETCS überwacht im manuellen Bahnbetrieb neben der Fahrzeugbewegung im Wesentlichen den Fahrer. Aufgrund der Automatisierung werden die Funktionen des Fahrers von weiteren Systemen übernommen (insbesondere Funktionen der Funktionsblöcke A und D sind hier von Bedeutung). Dies hat zur Folge, dass neue Eingangssignale vorliegen, die ETCS anstelle des Fahrers überwachen muss. Es entstehen neue Schnittstellen.
- Da in UTO die Funktionsfähigkeit weiterer Umsysteme sichergestellt werden muss, kann eine neue Betriebsart für den vollautomatischen Bahnbetrieb notwendig sein. Diese Betriebsart könnte als *Unattended Driving* oder *Driverless Driving* bezeichnet werden. In der Betriebsart muss ETCS die Funktionsfähigkeit der Umsysteme, wie beispielsweise *Sensorik*, sicherstellen. Es müssen entsprechende Eingangssignale vorliegen. Im Gegensatz zu AD muss kein Fahrer auf dem Fahrzeug sein. Sobald die neue TSI ZZS und eine stabile, öffentlich zugängliche Spezifikation von AD vorliegt, wird eine Untersuchung dieser Fragen empfohlen.
- Es ist zu untersuchen, ob eine neue Betriebsart für die Fahrzeugabstellung sinnvoll ist, da in SB Bedienhandlungen durch den Fahrer notwendig sind. Hierzu sollte auch die entsprechende Prozedur SoM untersucht werden. Die neue Betriebsart könnte beispielsweise *UTO Stand By* sein. In *UTO Stand By* würde weiterhin eine ETCS-Verbindung zum APS und darüber hinaus zur Leitstelle bestehen. Alternativ kann auch nur eine Verbindung zur Leitstelle existieren, welche die automatische Inbetriebsetzung des Fahrzeugs ermöglicht.
- Zu überprüfen ist, ob SL eine Alternative zu SB ist. Bislang wird SL für ferngesteuerte Fahrzeuge genutzt. Die Eingangssignale wären entsprechend zu ändern, da es kein führendes Fahrzeug gäbe.
- Anhand der Analyse der verschiedenen Betriebsarten zeigt sich, dass ein weiteres Umsystem (*Remote-OB* und *Remote-TS*) sinnvoll erscheint. Mittels Remote können die

sichere Fernsteuerung des Fahrzeugs und ETCS-Bedienhandlungen ermöglicht werden. Im Regelbetrieb kann ein Einsatz möglich sein, wenn ETCS nicht entsprechend angepasst ist und die Bedienhandlungen des Fahrers nicht komplett ersetzt werden können. Bei Abweichungen vom Regelbetrieb kann die Entstörung erleichtert werden. Weitere Ausführungen hierzu finden sich in [Kapitel 5](#) und [Abschnitt 6.1](#).

- Grundsätzlich ist zu hinterfragen, ob das Quittieren im vollautomatischen Bahnbetrieb überhaupt noch notwendig ist, da sich kein Fahrer mehr auf dem Fahrzeug befindet. Ein Wegfall der Quittierpflicht könnte (betriebliche) Prozesse vereinfachen.
- Bei Entfall von SH als Betriebsart für den Rangierbetrieb ist zu klären, wie mit den variablen Zugdaten umzugehen ist. Für AD/FS werden diese vollständig benötigt. Für (gekuppelte) Triebzüge wird dies als nicht problematisch eingeschätzt. Im Güterverkehr werden die Wagen der Züge bislang per Schraubekupplung gekuppelt. Durch die Digitale Automatische Kupplung (DAK), welche vom europäischen Konsortium DAC4EU (Digital Automatic Coupling for Europe) entwickelt wird, ist zu erwarten, dass die Zustands- bzw. Zugdaten in Zukunft immer vorliegen (siehe hierzu auch [\[DAC21\]](#), [\[All22a\]](#), [\[Deu22b\]](#), [\[Bob18\]](#)). Gemäß [\[S2R22a\]](#) sollen durch die DAK u. a. die automatische Wagenregistrierung, die automatische Berechnung der Bremsleistung sowie Zugintegritätsfunktionen ermöglicht werden. Somit wird die Problematik der automatischen Bereitstellung der Zugdaten (für ETCS) lösbar sein und auf SH kann verzichtet werden.
- Die Rückfallebene, insbesondere der Ausfall kompletter Systeme, stellt einen Spezialfall dar und wird an dieser Stelle nicht vertieft untersucht.

Für die Übergänge zwischen den verschiedenen Betriebsarten existieren Prozeduren, die nachfolgend näher analysiert werden sollen, um den weiteren Einfluss des vollautomatischen Bahnbetriebs abschätzen zu können.

### 4.3 Prozeduren

#### 4.3.1 Vorüberlegungen

Gemäß [\[ERA16\]](#) definiert eine Prozedur die erforderliche Reaktion der ERTMS/ETCS-Einheiten (Teilsysteme und Komponenten) entweder auf Informationen, die zwischen diesen Einheiten ausgetauscht werden oder auf Ereignisse (ausgelöst durch externe Einheiten oder interne Ereignisse). Die Prozeduren konzentrieren sich auf die erforderliche Änderung des Zustands und der Betriebsart der beschriebenen ERTMS/ETCS-Einheiten.

Alle in [\[ERA16\]](#) definierten Prozeduren sind in [Tabelle 4.5](#) aufgelistet. Die entsprechende Kapitelnummer (#) dient der Identifikation in den folgenden Untersuchungen. Auf eine Beschreibung der Prozeduren wird verzichtet, diese kann beispielsweise [\[Tri20b\]](#) entnommen werden.

Um eine erste Abschätzung treffen zu können, wird im Folgenden der Einfluss des vollautomatischen Bahnbetriebs auf die in [\[ERA16\]](#) spezifizierten Prozeduren untersucht. Die

Kapitel (#)	Name der Prozedur
5.04	Beginn einer Zugfahrt (Start of Mission, SoM)
5.05	Ende einer Zugfahrt (End of Mission, EoM)
5.06	Beginn einer Rangierfahrt durch den Fahrer
5.07	Beginn einer Rangierfahrt durch Befehl der Infrastruktur
5.08	Vorbeifahrt EoA mit Override
5.09	Fahren auf Sicht
5.10	Leveltransitionen
5.11	ETCS-Zwangsbremmung
5.12	Fahrtrichtungswechsel
5.13	Rückwärtsfahrt zur Evakuierung
5.14.2	Schwächen
5.14.3	Stärken
5.15	RBC-RBC-Handover
5.16	Befahren eines ungesicherten Bahnübergangs
5.17	Übernahme von Zugdaten von externen Systemen
5.18	Anzeige von Streckenbedingungen
5.19	Limited Supervision
5.20	Übergabe von Informationen zu Streckenbedingungen an externe Systeme

**Tabelle 4.5:** Überblick über die in [ERA16] definierten Prozeduren (nach [Tri20b]).

Auswirkungen können sehr unterschiedlich sein. Grundsätzlich kann der Automatisierungsgrad folgende Auswirkungen auf die Durchführung einer Prozedur haben:

- Die Prozedur kann unabhängig vom Automatisierungsgrad durchgeführt werden.
- Die Prozedur kann im vollautomatischen Bahnbetrieb teilweise durchgeführt werden.
- Die Prozedur kann nicht im vollautomatischen Bahnbetrieb durchgeführt werden. (Es befindet sich kein Fahrer auf dem Zug, der wesentliche Funktionen ausführt oder die Prozedur ist irrelevant.)

Prozeduren sind ein elementarer Bestandteil von ETCS. Beispielsweise muss jeder Zug einen Startlauf durchführen (Prozedur SoM), um eine Funkverbindung aufzubauen und in einen entsprechenden Folgezustand zu wechseln (Ziel: AD/FS).

Damit die Prozeduren durchgeführt werden können, sind grundsätzlich folgende Anpassungen möglich:

- Die Rolle des Fahrers in einer Prozedur wird „eins zu eins“ von technischen Systemen übernommen. Es sind keine Anpassungen an der ETCS-Spezifikation notwendig.
- Die Prozedur wird in Bezug auf den vollautomatischen Bahnbetrieb angepasst. Dies kann zu umfangreichen Änderungen der ETCS-Spezifikation führen und die Komplexität erhöhen.

- Die Prozedur besitzt für den vollautomatischen Bahnbetrieb keine Relevanz bzw. der Automatisierungsgrad besitzt keinen Einfluss auf den Ablauf einer Prozedur. Eine Anpassung ist nicht notwendig.
- Es werden komplett neue Prozeduren für den vollautomatischen Bahnbetrieb geschaffen. Dies kann zu umfangreichen Änderungen der ETCS-Spezifikation führen. Es gibt keine Auswirkungen auf den manuellen Bahnbetrieb. Dies erhöht die Komplexität der Spezifikation.

### 4.3.2 Bewertung

Grundsätzlich ist es sinnvoll, alle Prozeduren detailliert zu betrachten. Das ist im Rahmen der Arbeit jedoch nicht möglich. Analog der Untersuchung der Betriebsarten in [Abschnitt 4.2](#) werden die Prozeduren charakterisiert und als erster Schritt die Rolle bzw. die Verantwortlichkeiten des Fahrers bei Ablauf einer Prozedur auf Basis der SRS [ERA16] analysiert. Damit können die Auswirkungen des vollautomatischen Bahnbetriebs abgeschätzt werden und mittels des in [Abbildung 4.2](#) dargestellten Entscheidungsbaums den entsprechenden Kategorien zugeteilt werden.

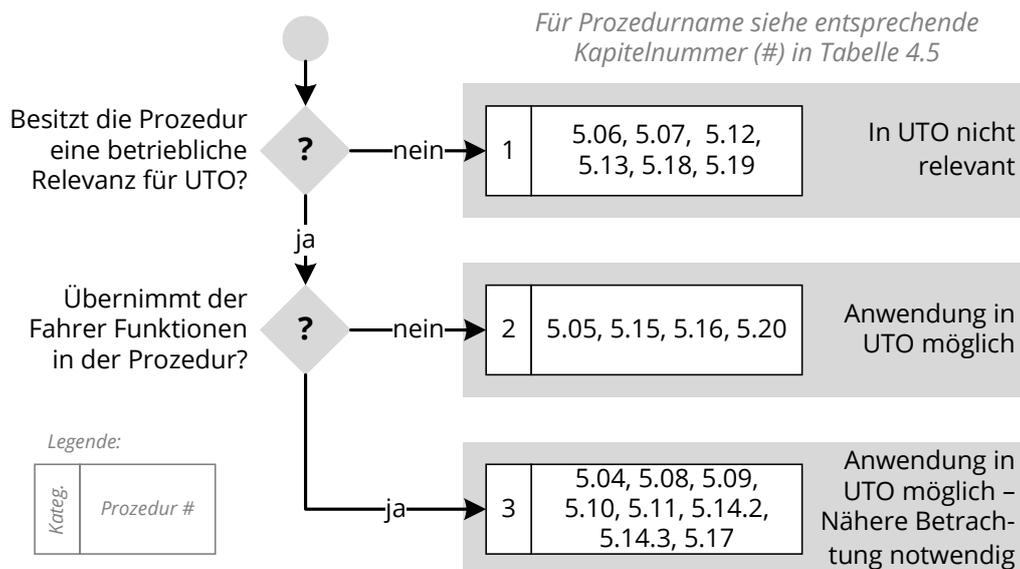


Abbildung 4.2: Entscheidungsbaum zur Kategorisierung der ETCS-Prozeduren.

Die Kategorien werden wie folgt definiert:

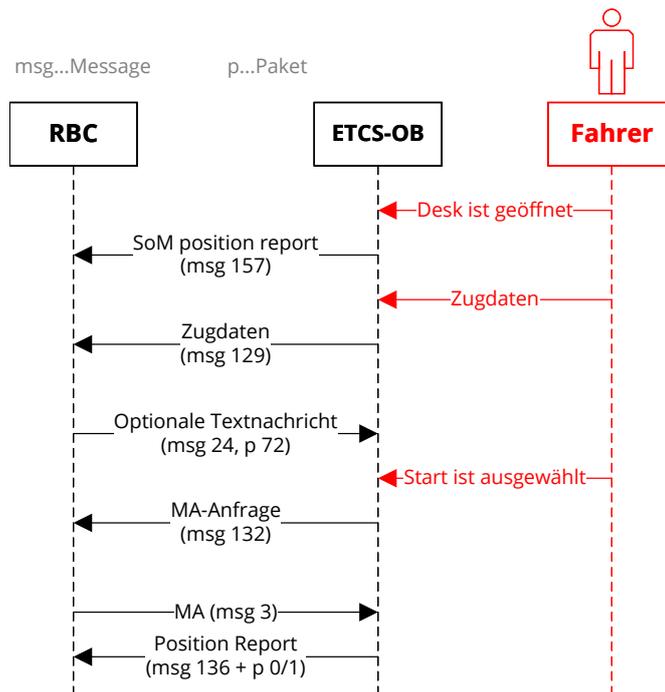
1. Prozedur besitzt keine betriebliche Relevanz im vollautomatischen Bahnbetrieb  
→ Prozedur muss nicht näher betrachtet werden, keine Anwendung der Prozedur

2. Fahrer übernimmt keine Funktionen bei Ablauf der Prozedur, Anwendung der Prozedur im vollautomatischen Bahnbetrieb möglich
  - Prozedur muss nicht näher betrachtet werden, da kein wesentlicher Einfluss des vollautomatischen Bahnbetriebs
3. Fahrer übernimmt Funktionen bei Ablauf der Prozedur, Anwendung der Prozedur im vollautomatischen Bahnbetrieb möglich
  - Nähere Untersuchung sinnvoll

Als Beispiel der Kategorie 3 wird im nächsten Abschnitt die Prozedur SoM genauer untersucht.

### 4.3.3 Beispiel: Beginn einer Zugfahrt (Prozedur Start of Mission)

Mit der Prozedur Start of Mission (#5.04) wird das Ziel verfolgt, ein Fahrzeug aufzurüsten, um eine Zugfahrt beginnen zu können. Die wesentlichen Ablaufschritte zeigt das Interaktionsdiagramm in [Abbildung 4.3](#) für den manuellen Bahnbetrieb. Der vollständige, in [\[ERA16\]](#) spezifizierte Ablauf der Prozedur SoM kann [Abschnitt C.4, Abbildung C.3](#) entnommen werden. Als Annahme wird im vollautomatischen Bahnbetrieb ebenfalls davon ausgegangen, dass sich das Fahrzeug in SB befindet.



**Abbildung 4.3:** Sequenzdiagramm der Prozedur SoM im manuellen Bahnbetrieb (nach [\[EUG21\]](#)). Der rot markierte Teil kann im vollautomatischen Bahnbetrieb nicht mehr vom Fahrer durchgeführt werden, sondern sollte vollständig automatisiert werden (z. B. durch weitere Systeme).

Grundsätzlich werden in SoM zwei wesentliche Aspekte geprüft:

1. Sind die Zugdaten vollständig?
2. Ist die Zugposition gültig und vertrauenswürdig („valid and unambiguous“) bzw. weiß das streckenseitige System (in GoA 4: *APS*), wo sich das Fahrzeug befindet?

Zwischen den jeweiligen Automatisierungsgraden existiert ein wesentlicher Unterschied beim Starten: In GoA 1 und GoA 2 ist der Fahrer auf dem Fahrzeug und kann entsprechend handeln. In GoA 3 und GoA 4 müssen die Startbedingungen vom System automatisch bereitgestellt werden (siehe [Abbildung 4.3](#)), wenn auf eine Fernsteuerung verzichtet wird. Es wird beispielsweise keine Fahrer-ID mehr benötigt.

Wie bereits in [Unterabschnitt 4.2.4](#) erläutert, wird die Bereitstellung der Zugdaten als beherrschbar eingeschätzt. Die Problematik der Zugposition ist grundsätzlich unabhängig vom Automatisierungsgrad. Es ist folgender Anpassungsbedarf gegenüber den aktuell gültigen Anforderungen der Prozedur SoM denkbar:

- Vollständiger Ersatz der Fahrerbedienungen durch die Umsysteme: Die „Eingabe“ der Zugdaten könnte *UTO-OB* übernehmen (z. B. könnte die Fahrer-ID mit einer *UTO-OB-ID* ersetzt werden). Mittels *CMD* können Fahrzeugbewegungen (in *NP*) erkannt werden (siehe auch [Unterabschnitt 4.2.3](#)). Die Zugposition wird mittels *Ortung* bereitgestellt.
- Alternativ kann ein Fahrtauftrag über *ATO-OB* den Anstoß der Fahrzeugaufrüstung geben. Entsprechende Schnittstellen sind zu prüfen und zu entwickeln.
- Denkbar ist ebenfalls der Fernzugriff aus der Leitstelle (Remote), um die Eingaben händisch durchzuführen. Im Sinne einer vollständigen Automatisierung des Bahnbetriebs sollte diese Lösung möglichst vermieden werden.
- Ebenfalls ist der Ersatz der Prozedur SoM durch eine neue Prozedur möglich, welche exakt auf die Bedürfnisse des vollautomatischen Bahnbetriebs zugeschnitten ist (beispielsweise in Verbindung mit einer neuen Betriebsart für *UTO*, siehe dazu auch [Unterabschnitt 4.2.4](#)).

Insgesamt wird der Ersatz der Fahrereingaben im vollautomatischen Bahnbetrieb als lösbar eingeschätzt.

### 4.3.4 Fazit und weitere Überlegungen

Auf Basis der in [Abbildung 4.2](#) vorgenommenen Kategorisierung zeigen sich folgende Auswirkungen des vollautomatischen Bahnbetriebs auf die Prozeduren:

- Die Prozeduren #5.06, 5.07, 5.12, 5.13, 5.18, 5.19 sind im vollautomatischen Bahnbetrieb nicht relevant (und könnten somit aus der Spezifikation entfallen).
- Die Prozeduren #5.05, 5.15, 5.16, 5.20 können im vollautomatischen Bahnbetrieb angewendet werden. Da der Fahrer keine Funktionen übernimmt, ist eine Anpassung voraussichtlich nicht notwendig. Die Auswirkungen des vollautomatischen Bahnbetriebs werden als gering bewertet.

- Die Prozeduren #5.04, 5.08, 5.09, 5.10, 5.11, 5.14.2, 5.14.3, 5.17 können im vollautomatischen Bahnbetrieb angewendet werden. Da der Fahrer hier Funktionen übernimmt, ist eine nähere Betrachtung notwendig. Die Auswirkungen des vollautomatischen Bahnbetriebs werden als hoch bewertet.

Beispielhaft wurde die Prozedur Start of Mission (#5.04) näher betrachtet. Diese kann in der aktuellen Form nicht im vollautomatischen Bahnbetrieb durchgeführt werden, der notwendige Anpassungsbedarf wird jedoch als lösbar eingeschätzt.

Überlegungen zu weiteren Aspekten sind ebenfalls möglich. Diese ähneln teilweise denen in [Unterabschnitt 4.2.4](#):

- Ist die Bestätigung und/oder Quittierung durch den Fahrer überhaupt noch notwendig (z. B. bei Levelwechseln, siehe z. B. #5.10)?
- Müssen neue Prozeduren für den vollautomatischen Bahnbetrieb entwickelt werden? Bei neuen Betriebsarten kann dies beispielsweise notwendig werden, z. B. beim Aufstarten.

## 4.4 Weitere Aspekte

### 4.4.1 Streckenbedingungen

ETCS bietet die Möglichkeit, optional weitere Streckenbedingungen (Track Conditions) zu übertragen. Nach [\[Tri20b\]](#) sind dies:

- Spannungsloser Abschnitt, Absenkung des Stromabnehmers erforderlich
- Spannungsloser Abschnitt, Ausschaltung des Hauptschalters erforderlich
- Druckdichte erforderlich (zur Regelung der Klimaanlage, z. B. im Tunnel)
- Makrofon ansteuern („Pfeifen“)
- Abschnitte mit Halteverbot (Notbremsüberbrückung)
- Halteabschnitte im Tunnel (Halten möglich, z. B. zur Evakuierung)
- Wechsel des Traktionssystems
- Änderung der maximal zulässigen Stromaufnahme
- Abschalten von Kommunikationsüberwachungen (z. B. große Metallmassen, „Funkloch“)
- Ausschalten bestimmter Bremssysteme (z. B. generatorische Bremse, Magnetschiebenbremse, Wirbelstrombremse)
- Bahnsteigbereich (seitenrichtige Türfreigabe mit oder ohne Schiebetritt)

Diese Informationen können bereits heutzutage im manuellen Bahnbetrieb genutzt werden. Es ist zu klären, ob die Informationen im vollautomatischen Bahnbetrieb durch ETCS bereitgestellt werden sollen. Ein Entfall der Streckenbedingungen könnte die Komplexität von ETCS reduzieren. In Abhängigkeit der Sicherheitsrelevanz wäre auch eine Übermittlung über ATO denkbar, z. B. in Form eines erweiterten SP analog TDO. Teilweise sind diese Bedingungen bereits im SP enthalten. Die Informationen zu den Streckenbedingungen sollten mittels einer „digitalen Karte“ (*TFM*) zur Verfügung gestellt werden (Basisfunktion H.1). Da ETCS die Ausführung der Funktionen nicht übernehmen wird, sind andere Systeme erforderlich, z. B. *UTO-OB* als Teil von *ATPE-OB*.

Es stellt sich zudem die Frage, ob die Übermittlung weiterer Bedingungen sinnvoll ist. Zuerst sollte dabei immer die Sicherheitsrelevanz geklärt werden. Wenn keine vorliegt, soll diese Funktionalität nicht von ETCS abgedeckt werden. Falls eine Bedingung sicherheitsrelevant ist, kann die Übermittlung und Umsetzung durch andere Systeme untersucht werden. ETCS sollte als Zugbeeinflussungssystem keine „unnötigen“ Funktionen übernehmen, wie beispielsweise die Übermittlung von Komfortbedingungen. Diese sind nicht sicherheitsrelevant und sollten nicht in den ETCS-Streckenbedingungen enthalten sein.

Abschließend ist festzuhalten, dass eine Komplexitätsreduzierung der ETCS-Spezifikation durch den Entfall der Streckenbedingungen erreicht werden kann. Die Ausführung könnte *ATO-OB*, analog TDO, anstoßen. Es werden dennoch weitere Umsysteme zur Realisierung benötigt. Sofern die Streckenbedingungen weiterhin an *ETCS-OB* übermittelt werden, ist die Umsetzung bzw. der Anstoß zur Ausführung zu klären (Identifikation von Schnittstellen).

### 4.4.2 Gleisfreiprüfung

Gemäß [ERA16], Kapitel 3.15.5, kann das RBC in Level 2 und 3 einen betrieblichen Auftrag zur Gleisfreiprüfung durch den Fahrer versenden (Track Ahead Free, TAF). Im vollautomatischen Bahnbetrieb kann diese Funktion so nicht mehr umgesetzt werden, da sich kein Fahrer auf dem Zug befindet. Es besteht gemäß [EUG19] die Möglichkeit, TAF automatisch durch streckenseitige Systeme auszuführen (Automatic Track Ahead Free, ATAF).

Im vollautomatischen Bahnbetrieb werden die Basisfunktion D.1, D.2 und D.3 von *Sensorik* ausgeführt (siehe Tabelle 3.3). Die Notwendigkeit des TAF sollte neu bewertet werden. Ein Entfall der Funktionalität ist denkbar und würde die Komplexität der Spezifikation reduzieren. Mit ATAF steht eine mögliche Umsetzung ohne Fahrer zur Verfügung, sodass der Einfluss des vollautomatischen Bahnbetriebs als gering bewertet wird.

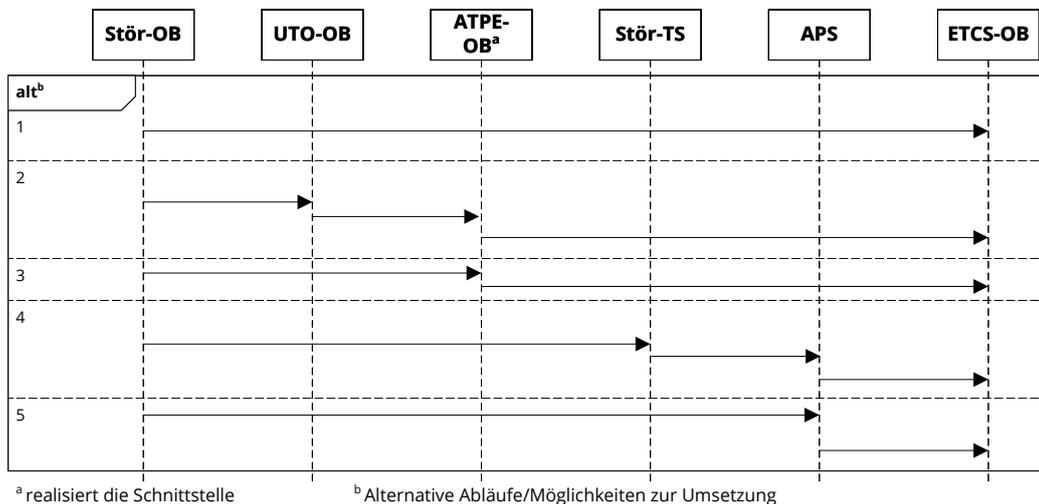
### 4.4.3 Neue Eingangssignale von Umsystemen

In Abbildung 3.2 sind die wesentlichen Umsysteme des vollautomatischen Bahnbetriebs dargestellt. Diese übernehmen verschiedenste Funktionen. Aus den Umsystemen können neue Eingangssignale (Inputs) entstehen, die von ETCS verarbeitet werden müssen (siehe auch Unterabschnitt 4.2.4). Ein Beispiel ist die Überprüfung der Funktionsfähigkeit der entsprechenden Systeme vor und während der Zulassung einer Fahrzeugbewegung (in Abhängigkeit von der Betriebs- bzw. Überwachungsart). Dies könnte zwar von *UTO-OB* durchgeführt werden, aber selbst in diesem Fall müsste ETCS die Funktionsfähigkeit von *UTO-OB*

überprüfen. Grundsätzlich kann die Funktionsfähigkeit der Umsysteme auch über andere Maßnahmen sichergestellt werden, z. B. durch sehr hohe Anforderungen an die Sicherheit und Verfügbarkeit der Systeme (Reliability, Availability, Maintainability, Safety, RAMS).

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt (GoA 1) kann die MA ausschließlich infrastrukturseitig vom RBC in Level 2 und 3 zurückgenommen werden. Dies trifft ebenfalls auf das Senden eines bedingten Nothalts (Conditional Emergency Stop, CES) oder unbedingten Nothalt (Unconditional Emergency Stop, UES) zu. Im vollautomatischen Bahnbetrieb wird APS diese Funktionalität übernehmen.

Um beispielsweise eine Kollision zu verhindern (Basisfunktion D.4), wird der Fahrer in NTO oder STO eine Zwangsbremmung einleiten, sobald er ein Hindernis auf dem Fahrweg erkennt (Basisfunktion D.3). Im vollautomatischen Bahnbetrieb wird dies im Wesentlichen von den Umsystemen *Sensorik* und *Stör-OB* durchgeführt (siehe auch [Tabelle 3.3](#)). Es stellt sich die Frage, wie die entsprechenden Informationen (z. B. UES) an *ETCS-OB* übermittelt werden können. [Abbildung 4.4](#) zeigt mögliche Wege der Informationsübertragung an *ETCS-OB*. Unabhängig davon ist *APS* zu informieren.



**Abbildung 4.4:** Mögliche Informationsflüsse bei neuen Eingangssignalen von Umsystemen.

Dieses Beispiel steht exemplarisch für verschiedenste Situationen, die auftreten können und verdeutlicht die Notwendigkeit einer klaren Abgrenzung und Spezifikation der Schnittstellen. Die Anwendung herstellerspezifischer Lösungen ist zu vermeiden, da dies den modularen Austausch der Systeme verhindert. Es besteht weiterer Forschungsbedarf.

## 4.5 Zusammenfassung

ETCS kann für den vollautomatischen Bahnbetrieb genutzt werden, wenn alle Funktionen, die bislang vom Fahrer durchgeführt werden, von technischen Systemen übernommen werden. Es existieren jedoch vielfältige Herausforderungen, bei denen eine Weiterentwick-

lung der Spezifikation sinnvoll erscheint (z. B. Prüfung neuer Betriebsarten für den vollautomatischen Betrieb als Ersatz für SB und AD/FS). Die Änderungen an den bestehenden Anforderungen sollten dabei so gering wie möglich gehalten werden, um den Entwicklungs- und Zulassungsaufwand zu minimieren.

Die Betriebsarten LS, SH, SN, UN, RV und PS sind im vollautomatischen Bahnbetrieb nicht relevant. Alle anderen Betriebsarten können im vollautomatischen Bahnbetrieb – in Abhängigkeit vom betrieblichen Anwendungsfall – zum Einsatz kommen. Es werden Detailbetrachtungen empfohlen. Der Einfluss des vollautomatischen Bahnbetriebs auf die Betriebsarten SL, NP und SF wird als vernachlässigbar eingeschätzt.

Der Einfluss auf die Prozeduren zeigt ein ähnliches Bild: Es können sechs Prozeduren entfallen, vier vermutlich ohne Anpassung weiter genutzt werden und acht Prozeduren müssen genauer untersucht werden, um den tatsächlichen Anpassungsbedarf zu ermitteln. Die beispielhafte Untersuchung der Prozedur SoM zeigte einen lösbaren Anpassungsbedarf.

Weitere Aspekte, wie das Vorliegen neuer Eingangssignale aufgrund der Umsysteme wurden identifiziert und sollten näher untersucht werden. Es entstehen neue Anforderungen. ETCS-Funktionalitäten, wie beispielsweise die Gleisfreiprüfung durch den Fahrer (TAF), können im vollautomatischen Bahnbetrieb entfallen.

Abschließend kann festgehalten werden, dass der vollautomatische Bahnbetrieb unter ETCS möglich ist. Es wurden keine gravierenden Probleme identifiziert, welche den Einsatz von ETCS grundsätzlich in Frage stellen.

# 5 Systemische Unterschiede der Automatisierungsgrade

In diesem Kapitel werden die Automatisierungsgrade der Rückfallebene (fahrerloser, halb-automatischer und manueller Bahnbetrieb) mit dem vollautomatischen Bahnbetrieb verglichen, um die systemischen Unterschiede zwischen den Automatisierungsgraden zu identifizieren.

## 5.1 Vorüberlegungen

### 5.1.1 Motivation

In einem *idealen* Bahnsystem existieren keine Störungen und Abweichungen vom Regelbetrieb. Das Bahnsystem ist kein *ideales* System, da es vielen (externen) Einflussfaktoren unterliegt. Es kommt zu Störungen und Abweichungen vom Regelbetrieb. Dabei ist zu erwarten, dass die vollautomatische Durchführung des Bahnbetriebs in GoA 4 in einem entsprechendem Zeitraum nicht möglich ist, da beispielsweise das Betriebspersonal steuernd eingreift. Es kann zum Einsatz niedrigerer Automatisierungsgrade kommen. Die Automatisierungsgrade GoA 3, GoA 2 sowie GoA 1 sind als Rückfallebenen zum vollautomatischen Bahnbetrieb (GoA 4) zu verstehen. Bereits in [Kapitel 4](#) wurde der Einfluss der Rückfallebene an verschiedenen Stellen diskutiert. GoA 0 wird im Rahmen der Arbeit nicht als Rückfallebene betrachtet, da dies praktisch einem Komplettausfall der grundlegenden Sicherheitsprinzipien und -systeme entspricht.

Es ist zu untersuchen, (1) welche Umsysteme im entsprechenden Automatisierungsgrad benötigt werden, (2) welche Basisfunktionen automatisch ausgeführt werden und ob (3) neue Umsysteme notwendig sind, die in [Abschnitt 3.3](#) nicht ermittelt wurden. Damit können systemische Unterschiede zwischen den Automatisierungsgraden identifiziert werden.

### 5.1.2 Notwendigkeit der Fernsteuerung im Vollbahnnetz

Im Gegensatz zum Nahverkehr ist das Vollbahnnetz offen und verläuft auch durch schwer erreichbare und dünnbesiedelte Gebiete. Das Betriebspersonal kann im Falle von Störungen nicht innerhalb einer akzeptablen Zeitspanne das Fahrzeug erreichen und die Entstörung vor Ort durchführen. Beispielsweise soll bei der U-Bahn Nürnberg entsprechendes Servicepersonal (Mitarbeiter des Kunden- und Systemservice, KUSS) spätestens nach zehn Minuten an der Störungsstelle, z. B. am Zug im Tunnel, sein (vgl. [\[Dah16\]](#)).

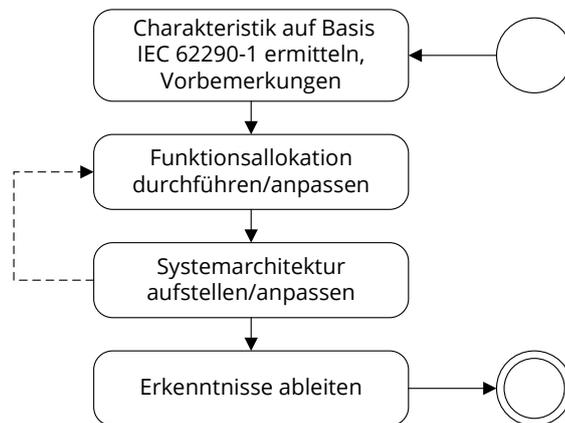
Dies führt zu Konsequenzen im Einsatz niedrigerer Automatisierungsgrade in der Rückfallebene. Die Fernsteuerung der Fahrzeuge und Fahrzeugbedienungen (*Remote*) rückt in

den Vordergrund. Bereits in [Kapitel 4](#) wurde herausgearbeitet, dass ein entsprechender Einsatz sinnvoll sein kann.

Ein neues System wird benötigt (*Remote*). Durch den Einsatz der Fernsteuerung der Fahrzeuge und Fahrzeugbedienungen können beispielsweise Funktionen des Funktionsblock F (*Erkennung und Management von Störungen gewährleisten*) zeitnah durchgeführt werden. Weitere betriebliche Anwendungsfälle sind in Abhängigkeit der Verkehrsarten bzw. Marktsegmente denkbar (z. B. Stärken von Zügen, Überfahren ungesicherter BÜ). Eine vertiefte Betrachtung zur Fernsteuerung der Fahrzeuge und Fahrzeugbedienungen (Umsystem *Remote*) findet sich in [Abschnitt 6.1](#).

### 5.1.3 Vorgehensweise

Die Untersuchung zur Identifizierung der systemischen Unterschiede zwischen den Automatisierungsgraden erfolgt analytisch durch einen Vergleich auf Stufenebene. Die Vorgehensweise zeigt [Abbildung 5.1](#) als Ablauf.



**Abbildung 5.1:** Vorgehensweise des Vergleichs zwischen den Automatisierungsgraden (vereinfacht schematisch dargestellt als UML-Aktivitätsdiagramm). Die iterative Schleife kann ggf. notwendig sein (gestrichelte Linie). Die Schritte werden jeweils für den Vergleich von einem Automatisierungsgrad der Rückfallebene (GoA 3, GoA 2 und GoA 1) mit GoA 4 durchgeführt.

In einem ersten Schritt wird die Charakteristik des entsprechenden Automatisierungsgrades auf Basis IEC 62290-1<sup>1</sup> [IEC06] ermittelt. Auf Basis von [Tabelle 3.3](#) (Funktionsallokation vollautomatischer Bahnbetrieb) folgt die Durchführung bzw. Anpassung der Funktionsallokation<sup>2</sup>. Darauf aufbauend kann die Systemarchitektur des entsprechenden Automatisierungsgrades der Rückfallebene angepasst werden und ggf. die Notwendigkeit neuer Umsysteme identifiziert werden. Aus diesen Informationen kann ebenfalls ermittelt werden, welche Umsysteme in der Rückfallebene im Vergleich zu GoA 4 nicht zur Verfügung stehen

<sup>1</sup> eingeführt in [Unterabschnitt 1.3.2](#).

<sup>2</sup> Die jeweiligen Tabellen finden sich gebündelt am Ende des Kapitels.

(oder ausgefallen sind bzw. sein könnten). In einem letzten Schritt werden die Erkenntnisse zusammengetragen und weitere Überlegungen geäußert, die auch als Grundlage für weiterführende Untersuchungen dienen können.

### 5.1.4 Generelle Vorbemerkungen

In der Rückfallebene werden Funktionen manuell durchgeführt. Um diese zuordnen zu können, wird die Rolle *Betriebspersonal* eingeführt. Hierunter wird entsprechend qualifiziertes Personal verstanden, wie z. B. *Fahrer* oder *Train Operator (TO)*<sup>3</sup>. Die genauen Rollen sind nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Das *Betriebspersonal* und *Remote* werden als gleichwertig betrachtet. In jedem Fall wird die Funktion manuell durchgeführt. Der entscheidende Unterschied ist die Verortung des Personals (vor Ort oder mittels *Remote*). Die folgenden Annahmen sind zu beachten:

- IEC 62290-1 dient lediglich als Eingangsgröße, da diese für den städtischen Nahverkehr entwickelt wurde und im Detail nicht ohne Weiteres auf das Vollbahnnetz angewendet werden kann.
- Die in [Abschnitt 3.3](#) erarbeiteten Umsysteme sind maßgebend.
- Es findet keine Betrachtung großflächiger Ausfälle von essenziellen Systemen wie *TCMS* oder *TMS* statt, da dies unabhängig vom Automatisierungsgrad zu erheblichen Störungen führt. Es besteht Forschungsbedarf, wie auf derartige Situationen im vollautomatischen Bahnbetrieb, d. h. ohne Fahrer auf dem Zug, reagiert werden kann. Alternativ muss eine nahezu hundertprozentige Verfügbarkeit der Systeme sichergestellt werden.
- Da GoA0 nicht untersucht wird, werden keine ETCS-Störungen betrachtet.

Durch die gewählte Vorgehensweise können systemische Unterschiede der Automatisierungsgrade verdeutlicht werden. Grundsätzlich ist zu erwarten, dass einige Umsysteme keinen Einfluss auf die hier untersuchten Unterschiede der Automatisierungsgrade besitzen.

Die Betrachtung von Ausfallszenarien einzelner Umsysteme ist durch den Vergleich auf Stufenebene möglich. Zusätzlich kann eine Ausfallanalyse auf Basis der vorliegenden Funktionsallokation ([Tabelle 3.3](#)) individuell vorgenommen werden: Bei Ausfall eines Systems können die zugeordneten Funktionen der entsprechenden Spalte so nicht mehr ausgeführt werden.

## 5.2 Fahrerloser Bahnbetrieb (GoA 3)

Der fahrerlose Bahnbetrieb (DTO) ist im Wesentlichen dadurch gekennzeichnet, dass das Betriebspersonal (z. B. Zugbegleiter) einzelne Funktionen manuell ausführt (insbesondere

---

<sup>3</sup>siehe auch Ausführungen in [Unterabschnitt 6.1.2](#).

Fahrzeugbedienungen und das Management von Störungen). Die Funktionen können dabei manuell vor Ort oder manuell ferngesteuert mittels *Remote* durchgeführt werden. Somit werden gewisse Funktionen nicht mehr automatisch durch die entsprechenden Systeme ausgeführt.

Die Funktionsallokation des fahrerlosen Bahnbetriebs kann [Tabelle 5.1](#) auf Seite 69 entnommen werden.

Auf Basis der Funktionsallokation kann die Systemarchitektur des fahrerlosen Bahnbetriebs mit den entsprechenden Umsystemen ermittelt werden. Diese kann [Abbildung 5.2](#) auf Seite 67 entnommen werden. Folgende Erkenntnisse können abgeleitet werden:

- Das Umsystem *UTO-OB* entfällt im fahrerlosen Betrieb und wird nicht mehr benötigt. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass nur bei einer Störung von *UTO-OB* der Bahnbetrieb in GoA 3 durchgeführt werden kann. Die anderen Umsysteme müssen funktionsfähig sein (auch wenn einige Funktionen manuell durchgeführt werden).
- Ein neues Umsystem *Remote* ist notwendig, welches sich in *Remote-OB* und *Remote-TS* aufteilt.
- Es ist genauer zu untersuchen, ob die Basisfunktionen des Funktionsblocks F mit *Remote* durchführbar sind. Gerade bei der Entstörung besitzt das Personal in der Leitstelle eine große Relevanz.
- Beispielsweise stellt sich die Frage, wie die Basisfunktion F.3 (*Entgleisung erkennen*) manuell mittels *Remote* durchgeführt werden kann. Es kann erforderlich sein, auf weitere Sensor- oder Videodaten zurückgreifen zu müssen. Da *Sensorik* weiterhin benötigt wird, könnte die Basisfunktion F.3 beispielsweise manuell mit Unterstützung durch *Sensorik* durchgeführt werden. Ein neues System wäre dann nicht notwendig.
- Es entstehen neue Funktionen. Für die Nutzung von *Remote* müssen beispielsweise neben Videoübertragungen auch die Steuerungs- und Kontrolldaten zwischen Zug und Strecke übermittelt werden.
- Die Umsetzung bestimmter Basisfunktionen wie beispielsweise E.5 (*Fahrtaufträge umsetzen*) erfordert in GoA 3 ein Zusammenspiel zwischen dem Betriebspersonal und weiteren Systemen. In Abhängigkeit des konkreten betrieblichen Prozesses kann es sinnvoller sein, den entsprechenden Prozess vollständig manuell (in GoA 1) durchzuführen.

Insgesamt ist davon auszugehen, dass der fahrerlose Bahnbetrieb als Rückfallebene zum vollautomatischen Bahnbetrieb beim Ausfall einzelner Systeme eher selten angewendet wird, da alle wesentlichen Umsysteme außer *UTO-OB* erforderlich sind und somit nicht gestört sein dürfen. Da die Züge weiterhin automatisch fahren, wird ein geringer Einfluss auf die Leistungsfähigkeit erwartet.

### 5.3 Halbautomatischer Bahnbetrieb (GoA 2)

Der halbautomatische Bahnbetrieb führt zu Änderungen, da die Überwachung des Fahrwegs und der Umgebung (Funktionsblock D) nicht mehr automatisch von Systemen über-

nommen wird. Das Betriebspersonal übernimmt weitere wichtige Funktionen.

Die Funktionsallokation des halbautomatischen Bahnbetriebs kann [Tabelle 5.2](#) auf Seite [70](#) entnommen werden.

Auf Basis der Funktionsallokation kann die Systemarchitektur des halbautomatischen Bahnbetriebs mit den entsprechenden Umsystemen ermittelt werden. Diese kann [Abbildung 5.2](#) auf Seite [67](#) entnommen werden. Zusätzlich zu den bereits gewonnenen Erkenntnissen sind folgende Aussagen möglich:

- Im halbautomatischen Bahnbetrieb werden vier (bzw. fünf) Umsysteme nicht mehr benötigt (*Stör-TS*, sowie die zu *ATPE-OB* gehörenden *UTO-OB*, *Sensorik* und *Stör-OB*).
- Es kann eine weitere Zunahme von manuell durchgeführten Funktionen beobachtet werden (18 von 33 Basisfunktionen)<sup>4</sup>.
- Die manuelle Durchführung der neu hinzugekommenen Funktionen mittels *Remote* wird im Wesentlichen als unproblematisch eingeschätzt.
- Der technische Unterschied zwischen GoA 2 und GoA 3 ist vergleichsweise hoch.

Insgesamt wird bei der Anwendung des halbautomatischen Bahnbetriebs weiterhin das automatische Fahren der Züge gewährleistet. Es werden geringe Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit erwartet.

### 5.4 Manueller Bahnbetrieb (GoA 1)

Im manuellen Bahnbetrieb übernimmt das Betriebspersonal zusätzlich wichtige Steuerungsfunktionen. Zu beachten ist, dass der manuelle Bahnbetrieb in dieser Betrachtung nicht den gegenwärtigen Ausrüstungsstand („Status quo“) darstellt. Es sind weiterhin die in [Abschnitt 3.3](#) aufgestellten Umsysteme maßgebend. Der manuelle Bahnbetrieb wird als eine Rückfallebene des vollautomatischen Bahnbetriebs betrachtet.

Die Funktionsallokation des manuellen Bahnbetriebs kann [Tabelle 5.3](#) auf Seite [71](#) entnommen werden.

Auf Basis der Funktionsallokation kann die Systemarchitektur des manuellen Bahnbetriebs mit den entsprechenden Umsystemen ermittelt werden. Diese kann [Abbildung 5.2](#) auf Seite [67](#) entnommen werden. Zusätzlich zu den bereits gewonnenen Erkenntnissen sind folgende Aussagen möglich:

- Es werden 21 von 33 Basisfunktionen manuell durchgeführt.
- Zusätzlich entfallen die Umsysteme *ATO-OB* und *ATO-TS*.
- Durch den Entfall von ATO können die Fahrtaufträge nicht auf das Fahrzeug übertragen und nicht umgesetzt werden (Basisfunktion C.3 und E.5). Die Basisfunktionen müssen manuell durchgeführt werden, allerdings liegen dem Betriebspersonal die entsprechenden Informationen nicht vor. Dies stellt ein großes Problem dar. Hierauf wird in [Abschnitt 5.5](#) vertiefend eingegangen.

---

<sup>4</sup>Die Anzahl der Basisfunktionen ist nicht als Kriterium zur Bewertung geeignet.

- Es besteht durch Erweiterung von *ATO-OB* die Möglichkeit der Integration eines Fahrerassistenzsystems (Driver Advisory System, DAS), um die Optimierungsvorteile von ATO teilweise durch die Anzeige von Fahrempfehlungen kompensieren zu können. Alternativ ist ein separates System denkbar, welches bei einer ATO-Störung weiterhin funktionsfähig wäre. Zu untersuchen ist, ob dieses tatsächlich auf dem Fahrzeug verortet sein muss. Entscheidend ist die entsprechende Anzeige an das Betriebspersonal (Remote oder vor Ort). Es ist zu beachten, dass GoA 1 als Rückfallebene nur über eine kurze Zeitspanne zur Entstörung angewendet werden soll. Ein DAS für dieses Szenario wird daher als nicht erforderlich eingeschätzt. Somit ist kein neues System notwendig.

Es sind Einbußen der Leistungsfähigkeit im manuellen Bahnbetrieb zu erwarten. Es sollte in der Rückfallebene schnellstmöglich eine automatische Fahrt mindestens in GoA 2 angestrebt werden, um den Einfluss auf die Leistungsfähigkeit so gering wie möglich zu halten. Dies ist von der konkreten Situation abhängig. Der technische Unterschied zwischen GoA 1 und GoA 2 ist vergleichsweise gering.

### 5.5 Zusammenfassung und weitere Überlegungen

Auf Basis der entwickelten Funktionsallokation können die systemischen Unterschiede zwischen den Automatisierungsgraden identifiziert werden: Es existieren teils deutliche technische und betriebliche Unterschiede bei der Ausführung der Funktionen zwischen den Automatisierungsgraden. Es ergeben sich keine gravierenden Unterschiede der Umsysteme. Mit *Remote* ist ein neues Umsystem zwingend notwendig. Weitere Systeme sind denkbar, werden aber nicht als notwendig eingeschätzt. Es entstehen neue Funktionen.

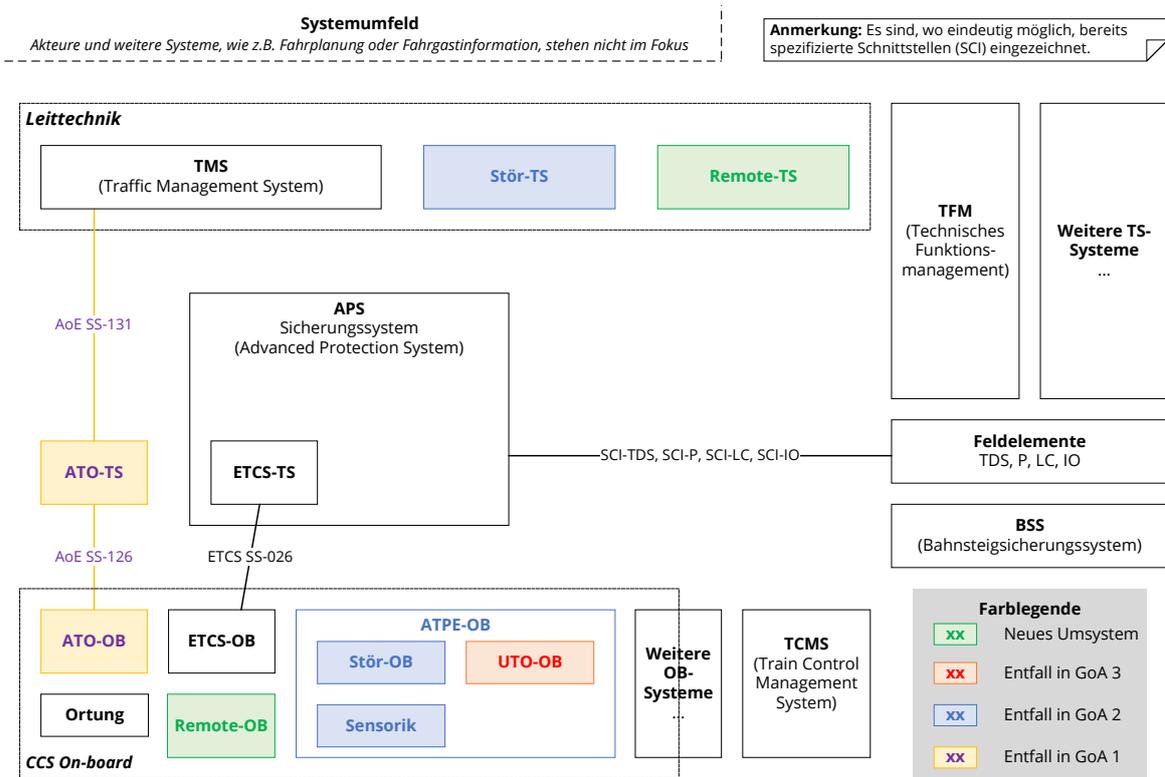
Zusätzlich zeigt sich der hohe Anpassungsaufwand gegenüber den aktuell gültigen Anforderungen („Status quo“). So unterscheiden sich beispielsweise die Umsysteme des derzeitigen manuellen Bahnbetriebs und des manuellen Bahnbetriebs in der Rückfallebene. Ein Beispiel dafür ist *APS*.

Zusammenfassend zeigt [Abbildung 5.2](#) die Systemarchitektur der Umsysteme des fahrerlosen, halbautomatischen und manuellen Bahnbetriebs im Vergleich zum vollautomatischen Bahnbetrieb. Je niedriger der Automatisierungsgrad, desto weniger Systeme werden benötigt, da die (Basis-)Funktionen manuell durchgeführt werden. Im Umkehrschluss bedeutet dies: Je mehr Systeme ausgefallen sind, desto niedriger ist der Automatisierungsgrad.

Insgesamt ist zu erwarten, dass die Detaillierung der betrieblichen Prozesse und darauf aufbauend die konkrete Spezifikation der Umsysteme und Schnittstellen die hier getroffenen Aussagen ändern können. Dies kann beispielsweise die Umsysteme *Stör-OB* und *Stör-TS* betreffen. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse des systemischen Vergleichs der Rückfallebene (GoA 3, GoA 2 und GoA 1) mit dem vollautomatischen Bahnbetrieb können weitere Überlegungen angestellt werden:

- Es ist im Detail zu untersuchen, ob die ermittelten manuellen Basisfunktionen tatsächlich mittels *Remote* durchführbar sind. Der Einsatz weiterer Systeme ist möglich,

## 5 Systemische Unterschiede der Automatisierungsgrade



**Abbildung 5.2:** Architektur der wesentlichen Umsysteme im fahrerlosen, halbautomatischen und manuellen Bahnbetrieb (GoA 3, GoA 2 und GoA 1). Mittels farblicher Kennzeichnung wird zwischen den Automatisierungsgraden der Rückfallebene unterschieden. Beispielsweise stehen in GoA 1 alle „entfallenen“ (und somit farblich markierten) Systeme nicht zur Verfügung.

diese werden im Sinne einer möglichst geringen Komplexität des Gesamtsystems als nicht notwendig bewertet.

- Im Vergleich zum Regelbetrieb in GoA 4 müssen verschiedenste Informationen in der Rückfallebene neu zwischen anderen Umsystemen ausgetauscht werden. Die Informationen liegen weiterhin im Gesamtsystem vor, können in der Rückfallebene aber nicht wie geplant übermittelt und genutzt werden.
- Damit diese Informationen genutzt werden können, müssen sie dem Betriebspersonal an geeigneter Stelle visualisiert werden. Dafür ist nicht zwangsläufig ein gesondertes HMI (Human-Machine Interface) als Umsystem notwendig, die Informationen können beispielsweise auch via Tablet übermittelt werden.
- Werden die Umsysteme nur für den Regelfall entwickelt und spezifiziert, wird es in einigen (wenn nicht sogar vielen) Szenarien in der Rückfallebene zu merklichen Problemen kommen, da die Informationen nicht dort vorliegen, wo sie im konkreten Szenario benötigt werden. Die entsprechenden Schnittstellen sind daher unter Be-

rücksichtigung der Rückfallebene zu identifizieren und vollständig zu spezifizieren. Nachträgliche Änderungen werden als potentiell problematisch eingeschätzt, insbesondere bei sicherheitskritischen Systemen und Schnittstellen.

- Insgesamt ist festzustellen, dass die Norm IEC 62290-1 nicht auf übergeordnete oder Querschnittsfunktionen eingeht. Damit wird die in [Unterabschnitt 5.1.4](#) getroffene Annahme bestätigt, *TMS* oder ähnliche Systeme nicht zu berücksichtigen, da diese in dieser Untersuchung keinen Einfluss auf den Automatisierungsgrad besitzen. Eine Anpassung bzw. Erweiterung der Norm kann sinnvoll sein, um weitergehende Untersuchungen durchführen zu können.

Die Durchführung weiterführender Betrachtungen, insbesondere detailliert zu den Ausfallszenarien, wird empfohlen. Dies schließt Umsysteme ein, die im Rahmen des systematischen Vergleichs keinen Einfluss hatten, z. B. *TMS*, *APS* oder *ETCS*. Hierfür sind betriebliche Prozesse notwendig.

## 5 Systemische Unterschiede der Automatisierungsgrade

*Legende:*  
*x...Basisfunktion wird vom System ausgeführt*  
*(x)...Basisfunktion kann in Teilen vom System ausgeführt werden*  
*grün...neu in der Rückfallebene*  
*rot...entfällt gegenüber GoA 4*

Funktionsblöcke und Basisfunktionen	APS	ATO-OB	ATO-TS	BSS	ETCS-OB	ETCS-TS	Feldelemente	Ortung	Remote	Sensorik	Stör-OB	Stör-TS	TCMS	TFM	TMS	UTO-OB	Weitere OB-Systeme	Weitere TS-Systeme	Betriebspersonal
<b>A Fahrzeug fahren</b>																			
A.1 Fahrprofil ermitteln (auf Basis Fahrauftrag)		x																	
A.2 Beschleunigung und Bremsung steuern		x											x						
A.3 Beschleunigung und Bremsung überwachen		x											x						
<b>B Sichere Zugbewegungen gewährleisten</b>																			
B.1 Fahrweg und Abstandshaltung sichern	x						x												
B.2 Fahrerlaubnis (MP, MA) sichern	x				x	x													
B.3 Zugposition sicher bestimmen	x				x	x		x											
<b>C Bahnbetrieb organisieren</b>																			
C.1 Verkehrsablauf überwachen („ist“, Prognose)															x				
C.2 Verkehrsablauf regeln (inkl. „einfache“ Konfliktlg.)															x				
C.3 Fahraufträge erteilen			x <sup>a</sup>												x				
C.4 Züge verwalten (z. B. Zugposition, ID, Status)															x				
<b>D Fahrweg/Umgebung überwachen</b>																			
D.1 Fahrweg beobachten										x									
D.2 Relevante Umgebung überwachen										x									
D.3 Hindernisse erkennen										x									
D.4 Kollision (Zusammenprall/Aufprall) mit Objekten/ Personen im Gleis verhindern											x	(x) <sup>b</sup>							
<b>E Züge betreiben</b>																			
E.1 Zugstatus steuern									x				x						x
E.2 Zugstatus überwachen									x				x						x
E.3 Fahrzeug/Zug in Betrieb setzen (z. B. SoM)	x				x	x			x										x
E.4 Fahrzeug/Zug außer Betrieb setzen (z. B. EoM)	x				x	x			x										x
E.5 Fahraufträge umsetzen		x	x <sup>a</sup>						x <sup>i</sup>				x						x
<b>F Erkennung und Management von Störungen gewährleisten</b>																			
F.1 Zugdiagnose durchführen									x <sup>i</sup>				(x)						x
F.2 Feuer/Rauch/Brand erkennen									x <sup>i</sup>										x
F.3 Entgleisung erkennen									x <sup>i</sup>										x
F.4 Verlust der Zugintegrität erkennen	(x) <sup>c</sup>				(x) <sup>d</sup>		(x) <sup>e</sup>		x <sup>i</sup>				(x)						x
F.5 Störung bewältigen/lösen									x <sup>i</sup>										x
F.6 Notsituation bewältigen (Ruf, Evakuierung, Überwachung)									x <sup>i</sup>										x
<b>G Fahrgastwechsel überwachen</b>																			
G.1 Fahrgastraumtüren steuern		x <sup>h</sup>							x				x						x
G.2 Fahrgastraumtüren überwachen									x				x						x
G.3 Sichere Anfahrbedingungen gewährleisten/Zug abfertigen									x										x
G.4 Bahnsteigkante sichern				x															
<b>H Bahnbetrieb technisch verwalten</b>																			
H.1 Digitale Karte verwalten/Streckenatlas sicher führen														x					
H.2 Technische Systeme verwalten														x					
H.3 Relevante Zustandsdaten überwachen														x					
H.4 Weitere technische Funktionen durchführen														x			x		

<sup>a</sup> Übertragung nach ATO-OB.

<sup>b</sup> Mitwirkung denkbar. Abhängig von konkreten Situationen und entsprechender Systemspezifikation (siehe Abschnitt 4.4.3).

<sup>c</sup> unabhängig vom Automatisierungsgrad, nur in ETCS L2 und HL3 notwendig.

<sup>d</sup> unabhängig vom Automatisierungsgrad, zwingend notwendig für ETCS L3, Übermittlung an ETCS-TS.

<sup>h</sup> Übermittelt Türsteuerungsinformation gemäß JP (vgl. [S2R18], ID 7.2.2.2, 7.2.2.3).

<sup>i</sup> Es ist genauer zu untersuchen, ob die Basisfunktion tatsächlich mittels *Remote* durchführbar ist.

Tabelle 5.1: Funktionsallokation fahrerloser Bahnbetrieb (GoA3).

## 5 Systemische Unterschiede der Automatisierungsgrade

*Legende:*  
*x...*Basisfunktion wird vom System ausgeführt  
*(x)...*Basisfunktion kann in Teilen vom System ausgeführt werden  
*grün...*neu in der Rückfallebene  
*rot...*entfällt gegenüber GoA 4

Funktionsblöcke und Basisfunktionen	APS	ATO-OB	ATO-TS	BSS	ETCS-OB	ETCS-TS	Feldelemente	Ortung	Remote	Sensorik	Stör-OB	Stör-TS	TCMS	TFM	TMS	UTO-OB	Weitere OB-Systeme	Weitere TS-Systeme	Betriebspersonal
<b>A Fahrzeug fahren</b>																			
A.1 Fahrprofil ermitteln (auf Basis Fahrtauftrag)		x																	
A.2 Beschleunigung und Bremsung steuern		x																	
A.3 Beschleunigung und Bremsung überwachen		x											x						
<b>B Sichere Zugbewegungen gewährleisten</b>																			
B.1 Fahrweg und Abstandshaltung sichern	x						x												
B.2 Fahrterlaubnis (MP, MA) sichern	x				x	x													
B.3 Zugposition sicher bestimmen	x				x	x		x											
<b>C Bahnbetrieb organisieren</b>																			
C.1 Verkehrsablauf überwachen („ist“, Prognose)															x				
C.2 Verkehrsablauf regeln (inkl. „einfache“ Konfliktlsg.)															x				
C.3 Fahrtaufträge erteilen															x				
C.4 Züge verwalten (z. B. Zugposition, ID, Status)				x <sup>a</sup>											x				
<b>D Fahrweg/Umgebung überwachen</b>																			
D.1 Fahrweg beobachten									x										x
D.2 Relevante Umgebung überwachen									x										x
D.3 Hindernisse erkennen									x										x
D.4 Kollision (Zusammenprall/Aufprall) mit Objekten/ Personen im Gleis verhindern									x										x
<b>E Züge betreiben</b>																			
E.1 Zugstatus steuern									x				x						x
E.2 Zugstatus überwachen									x				x						x
E.3 Fahrzeug/Zug in Betrieb setzen (z. B. SoM)	x				x	x			x										x
E.4 Fahrzeug/Zug außer Betrieb setzen (z. B. EoM)	x				x	x			x										x
E.5 Fahrtaufträge umsetzen		x	x <sup>a</sup>						x <sup>i</sup>				x						x
<b>F Erkennung und Management von Störungen gewährleisten</b>																			
F.1 Zugdiagnose durchführen									x <sup>j</sup>				(x)						x
F.2 Feuer/Rauch/Brand erkennen									x <sup>j</sup>				(x)						x
F.3 Entgleisung erkennen									x <sup>j</sup>				(x)						x
F.4 Verlust der Zugintegrität erkennen	(x) <sup>c</sup>								x <sup>j</sup>				(x)						x
F.5 Störung bewältigen/lösen					(x) <sup>d</sup>		(x) <sup>e</sup>		x <sup>j</sup>										x
F.6 Notsituation bewältigen (Ruf, Evakuierung, Überwachung)									x <sup>j</sup>										x
<b>G Fahrgastwechsel überwachen</b>																			
G.1 Fahrgastraumtüren steuern		x <sup>h</sup>							x				x						x
G.2 Fahrgastraumtüren überwachen									x				x						x
G.3 Sichere Anfahrbedingungen gewährleisten/Zug abfertigen									x										x
G.4 Bahnsteigkante sichern				x															
<b>H Bahnbetrieb technisch verwalten</b>																			
H.1 Digitale Karte verwalten/Streckenatlas sicher führen														x					
H.2 Technische Systeme verwalten														x					
H.3 Relevante Zustandsdaten überwachen														x					
H.4 Weitere technische Funktionen durchführen														x			x		

<sup>a</sup> Übertragung nach ATO-OB.

<sup>c</sup> unabhängig vom Automatisierungsgrad, nur in ETCS L2 und HL3 notwendig.

<sup>d</sup> unabhängig vom Automatisierungsgrad, zwingend notwendig für ETCS L3, Übermittlung an ETCS-TS.

<sup>h</sup> Übermittelt Türsteuerungsinformation gemäß JP (vgl. [S2R18], ID 7.2.2.2, 7.2.2.3).

<sup>i</sup> Es ist genauer zu untersuchen, ob die Basisfunktion tatsächlich mittels *Remote* durchführbar ist.

Tabelle 5.2: Funktionsallokation halbautomatischer Bahnbetrieb (GoA2).

## 5 Systemische Unterschiede der Automatisierungsgrade

*Legende:*  
*x...Basisfunktion wird vom System ausgeführt*  
*(x)...Basisfunktion kann in Teilen vom System ausgeführt werden*  
*grün...neu in der Rückfallebene*  
*rot...entfällt gegenüber GoA 4*

Funktionsblöcke und Basisfunktionen	APS	ATO-OB	ATO-TS	BSS	ETCS-OB	ETCS-TS	Feldelemente	Ortung	Remote	Sensorik	Stör-OB	Stör-TS	TCMS	TFM	TMS	UTO-OB	Weitere OB-Systeme	Weitere TS-Systeme	Betriebspersonal
<b>A Fahrzeug fahren</b>																			
A.1 Fahrprofil ermitteln (auf Basis Fahrtauftrag)									x										x
A.2 Beschleunigung und Bremsung steuern									x					x					x
A.3 Beschleunigung und Bremsung überwachen									x				x						x
<b>B Sichere Zugbewegungen gewährleisten</b>																			
B.1 Fahrweg und Abstandshaltung sichern	x						x												
B.2 Fahrerlaubnis (MP, MA) sichern	x				x	x													
B.3 Zugposition sicher bestimmen	x				x	x		x											
<b>C Bahnbetrieb organisieren</b>																			
C.1 Verkehrsablauf überwachen („ist“, Prognose)															x				
C.2 Verkehrsablauf regeln (inkl. „einfache“ Konfliktlg.)															x				
C.3 Fahrtaufträge erteilen															x				
C.4 Züge verwalten (z. B. Zugposition, ID, Status)															x				
<b>D Fahrweg/Umgebung überwachen</b>																			
D.1 Fahrweg beobachten									x										x
D.2 Relevante Umgebung überwachen									x										x
D.3 Hindernisse erkennen									x										x
D.4 Kollision (Zusammenprall/Aufprall) mit Objekten/ Personen im Gleis verhindern									x										x
<b>E Züge betreiben</b>																			
E.1 Zugstatus steuern									x				x						x
E.2 Zugstatus überwachen									x				x						x
E.3 Fahrzeug/Zug in Betrieb setzen (z. B. SoM)	x				x	x			x										x
E.4 Fahrzeug/Zug außer Betrieb setzen (z. B. EoM)	x				x	x			x										x
E.5 Fahrtaufträge umsetzen									x				x						x
<b>F Erkennung und Management von Störungen gewährleisten</b>																			
F.1 Zugdiagnose durchführen									x <sup>j</sup>				(x)						x
F.2 Feuer/Rauch/Brand erkennen									x <sup>j</sup>				(x)						x
F.3 Entgleisung erkennen									x <sup>j</sup>				(x)						x
F.4 Verlust der Zugintegrität erkennen	(x) <sup>c</sup>				(x) <sup>d</sup>		(x) <sup>e</sup>		x <sup>j</sup>				(x)						x
F.5 Störung bewältigen/lösen									x <sup>j</sup>				(x)						x
F.6 Notsituation bewältigen (Ruf, Evakuierung, Überwachung)									x <sup>j</sup>				(x)						x
<b>G Fahrgastwechsel überwachen</b>																			
G.1 Fahrgastraumtüren steuern									x				x						x
G.2 Fahrgastraumtüren überwachen									x				x						x
G.3 Sichere Anfahrbedingungen gewährleisten/Zug abfertigen									x										x
G.4 Bahnsteigkante sichern				x															
<b>H Bahnbetrieb technisch verwalten</b>																			
H.1 Digitale Karte verwalten/Streckenatlas sicher führen														x					
H.2 Technische Systeme verwalten														x					
H.3 Relevante Zustandsdaten überwachen														x					
H.4 Weitere technische Funktionen durchführen														x			x		

<sup>c</sup> unabhängig vom Automatisierungsgrad, nur in ETCS L2 und HL3 notwendig.

<sup>d</sup> unabhängig vom Automatisierungsgrad, zwingend notwendig für ETCS L3, Übermittlung an ETCS-TS.

<sup>j</sup> Es ist genauer zu untersuchen, ob die Basisfunktion tatsächlich mittels Remote durchführbar ist.

Tabelle 5.3: Funktionsallokation manueller Bahnbetrieb (GoA 1).

# 6 Vertiefte Betrachtung ausgewählter Aspekte

Ausgehend von den Ergebnissen der bereits durchgeführten Untersuchungen werden in diesem Kapitel weitere ausgewählte Aspekte vertiefend betrachtet. Es werden die Fernsteuerung der Fahrzeuge und Fahrzeugbedienungen (Remote) sowie weiterführende Anforderungen an die Kommunikationsinfrastruktur analysiert. Aussagen zum Einfluss der Verkehrsarten und Marktsegmente auf die Automatisierungsgrade werden abgeleitet.

## 6.1 Fernsteuerung von Fahrzeug und Fahrzeugbedienungen

### 6.1.1 Umsystem *Remote*

Wie bereits in [Unterabschnitt 5.1.2](#) herausgearbeitet, ist die sichere Fernsteuerung der Fahrzeuge und Fahrzeugbedienungen ein essenzieller Aspekt, um bei Störungen und Abweichungen vom Regelbetrieb möglichst effizient reagieren zu können. Es wird somit ein neues System (*Remote*) benötigt, welches sich strecken- und fahrzeugseitig aufteilt (*Remote-TS* und *Remote-OB*).

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt befindet sich *Remote* im Forschungs- und Entwicklungsprozess. In den letzten Jahren starteten dazu mehrere Forschungsprojekte. Die grundsätzliche Machbarkeit konnte in Pilotprojekten der staatliche Eisenbahngesellschaft Frankreichs (Société nationale des chemins de fer français, SNCF) oder durch das *Lucy Train Lab* im digitalen Testfeld der DB im Erzgebirge gezeigt werden (vgl. [\[Rai19\]](#), [\[IRJ20\]](#), [\[Mel20\]](#)).

Wenngleich die grundsätzliche Machbarkeit bewiesen wurde, existieren noch zahlreiche zu lösende Herausforderungen, bis *Remote* regulär eingesetzt werden kann. Im Wesentlichen können Herausforderungen zu folgenden Aspekten identifiziert werden:

- Entwicklung des Systemaufbaus und der Systemarchitektur (siehe z. B. auch [\[Mel20\]](#))
- Spezifikation und Standardisierung von Schnittstellen (z. B. durch RCA oder OCORA)
- Entwicklung/Nutzung einer geeigneten Kommunikationsinfrastruktur (aufgrund erhöhter Anforderungen, vertiefte Betrachtung in [Abschnitt 6.2](#))
- Arbeitsumgebung (vertiefte Betrachtung in [Unterabschnitt 6.1.3](#))
- Arbeitsplatzgestaltung (vertiefte Betrachtung in [Unterabschnitt 6.1.4](#))
- Arbeitsbelastung/Workload (vertiefte Betrachtung in [Unterabschnitt 6.1.5](#))
- Personalqualifizierung, Tätigkeiten (vertiefte Betrachtung in [Unterabschnitt 6.1.2](#))

- Sicherheitliche Bewertung (u. a. Gefährdungsanalyse, Risikobeurteilung): Insgesamt muss mindestens die gleiche Sicherheit bei Nutzung von *Remote* gewährleistet werden.
- Zulassung: Es müssen insbesondere auch Security-Herausforderungen gelöst werden.

Es besteht vielfältiger Forschungs- und Untersuchungsbedarf, um sowohl die technischen als auch betrieblich-organisatorischen Herausforderungen zu lösen. Nachfolgend sollen ausgewählte Aspekte vertiefend betrachtet, Lösungskonzepte sowie Forschungsergebnisse kurz vorgestellt und eingeordnet werden.

### 6.1.2 Tätigkeiten des Train Operators

Die Fernsteuerung der Fahrzeuge und Fahrzeugbedienungen führt neben technischen Herausforderungen auch zu erheblichen betrieblich-organisatorischen Änderungen, wie beispielsweise bei der Mitarbeiterqualifizierung. Das Leitstellenpersonal, z. B. der Fahrdienstleiter (Fdl), ist für derartige Aufgaben nicht qualifiziert. Der Fahrer wird in der jetzigen Form nicht mehr benötigt. Es ist daher sinnvoll, eine neue Rolle für einen „Fernsteuerarbeitsplatz“ zu schaffen. Ein Lösungskonzept ist der *Train Operator (TO)* (vgl. [Bra17]).

Auf Basis der in dieser Arbeit ermittelten Funktionsallokationen<sup>1</sup> können die Tätigkeiten des TO ermittelt werden. Dies sind im Wesentlichen Tätigkeiten in den Funktionsblöcken:

- A Fahrzeug fahren
- D Fahrweg/Umgebung überwachen
- E Züge betreiben
- F Erkennung und Management von Störungen gewährleisten<sup>2</sup>
- G Fahrgastwechsel überwachen

### 6.1.3 Arbeitsumgebung

Bei der Entwicklung des Systemaufbaus des *Remote*-Systems ist u. a. zu klären, von wo aus der TO arbeiten kann. Naheliegend ist die Integration in die Leitstellen, aber auch andere Lösungen in Abhängigkeit der Verkehrsarten bzw. Marktsegmente sind denkbar. Ein mögliches Konzept zur Arbeitsumgebung des TO zeigt [Abbildung 6.1](#).

In diesem Zusammenhang ist ebenfalls zu untersuchen, wie viel Personal an welcher Stelle benötigt wird. Ebenfalls sind Konzepte zur Organisation und Betriebsführung zu entwickeln, z. B. ob und wie eine Fahrt ohne ETCS-Überwachung möglich ist.

---

<sup>1</sup>insbesondere [Tabelle 5.3](#).

<sup>2</sup>beinhaltet auch Kommunikation.

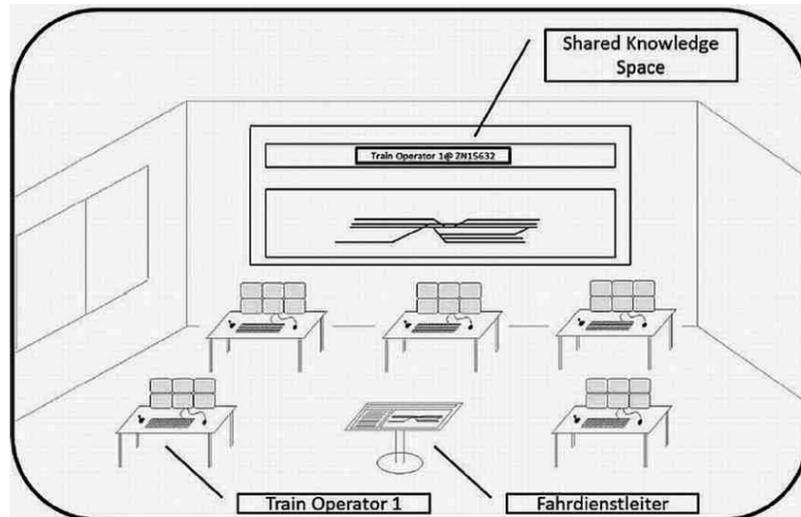


Abbildung 6.1: Schematische Darstellung der Arbeitsumgebung des TO [Bra18a].

### 6.1.4 Arbeitsplatzgestaltung

Ein elementarer Aspekt ist die Gestaltung des Arbeitsplatzes. Das Betriebspersonal muss in den Betriebsführungsprozess integriert werden. Fragestellungen sind beispielsweise: Wie interagiert der TO mit dem System? Welche Informationen benötigt der TO? Wie werden diese angezeigt? Wie können entsprechende Schnittstellen/Anzeigen (HMI) aussehen? Ein Beispiel für die HMI-Anzeige von *Remote* aus Sicht des TO zeigt [Abbildung 6.2](#).

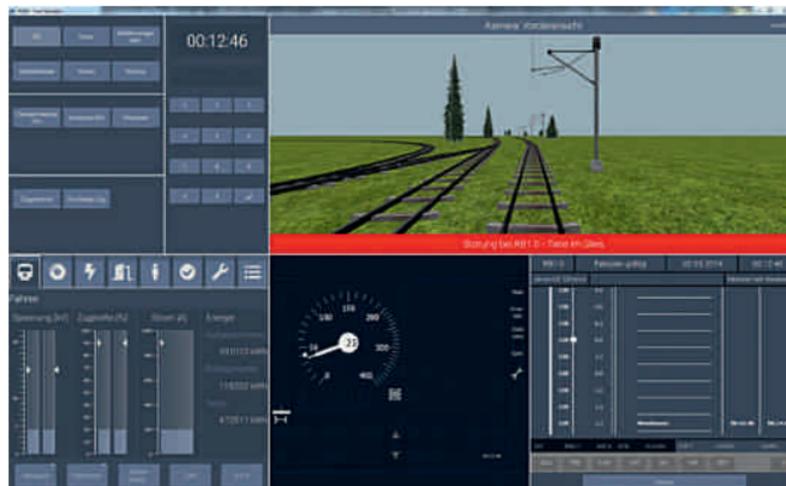


Abbildung 6.2: Beispielhafte HMI-Anzeige: Ferngesteuerter Systemzustand nach manueller Übernahme eines Zuges durch den TO [Bra19].

### 6.1.5 Arbeitsbelastung

Die Analysen dieser Arbeit zeigen, dass das Betriebspersonal im vollautomatischen Bahnbetrieb voraussichtlich weiterhin benötigt wird. Die Leitstelle als vermutlich letzte mit dem Menschen besetzte Instanz besitzt insbesondere bei Störungen und Abweichungen vom Regelbetrieb eine wichtige Rolle. Das Aufgabenfeld des Betriebspersonals wird sich von Ausführungs- hin zu Überwachungstätigkeiten ändern. Manche Aufgaben entfallen komplett.

In diesem Zusammenhang ist die subjektive und objektive Beanspruchung des Personals (Workload) genauer zu untersuchen, um eine Unter- oder Überforderung zu verhindern. Erste Studien zeigen eine subjektive Unterforderung des Personals für Überwachungstätigkeiten bei hochautomatischer Aufgabendurchführung, was verschiedene negative Konsequenzen mit sich bringt (vgl. [Nau18]). Es existieren bereits erste Forschungsergebnisse dazu (siehe z. B. [Bra21b], [Bra18b]). Es werden weitere Untersuchungen empfohlen, die sich mit diesem Themenkomplex beschäftigen. Abschließend sei angemerkt, dass diese Fragestellungen für alle von der Automatisierung des Bahnbetriebs betroffenen Tätigkeiten relevant sind.

## 6.2 Zukünftig benötigte Kommunikationsinfrastruktur

### 6.2.1 Anwendungsfälle

Die Umsetzung des vollautomatischen Bahnbetriebs führt zu weiteren Anforderungen an die zukünftige Kommunikationsinfrastruktur. Gemäß [Abschnitt 2.6](#) soll dafür Funkübertragung genutzt werden. Im Rahmen der Arbeit soll die Kommunikationsinfrastruktur (Funkübertragung) als „Mittel zum Zweck“ verstanden werden, welches die zuvor ermittelten funktionalen Anforderungen realisiert. Zusätzlich müssen entsprechende nicht-funktionale Anforderungen erfüllt werden, die nachfolgend näher analysiert werden.

[DSD21a] und [DSD21b] identifizieren für den vollautomatischen Bahnbetrieb folgende wesentliche Anwendungsfälle der Kommunikationsinfrastruktur:

- Sprachdienste (gelegentlich)
- ETCS (periodisch)
- ATO (im Regelfall periodisch)
- Remote (bei Abweichungen vom Regelbetrieb<sup>3</sup>)
- On-board Videoüberwachung (bei Abweichungen vom Regelbetrieb)

Auf Basis der in [Kapitel 3](#) aufgestellten Umsysteme und der entsprechenden Funktionsallokation in [Tabelle 3.3](#) sind weitere Anwendungsfälle denkbar. Insbesondere die Umsysteme *Stör-OB* und *UTO-OB* werden mit entsprechenden streckenseitigen Umsystemen kommunizieren (wie beispielhaft für *Stör-OB* in [Unterabschnitt 4.4.3](#) herausgearbeitet). Die Kommunikation von Umsystemen, die Funktionen des Funktionsblock H (*Bahnbetrieb technisch*

---

<sup>3</sup>wie ebenfalls in [Kapitel 4](#) und [Kapitel 5](#) herausgearbeitet.

*verwalten*) ausführen, ist zu bestimmen. Diese Anwendungsfälle werden in den folgenden Ausführungen nicht betrachtet. Eine Berücksichtigung in weiterführenden Untersuchungen wird empfohlen, da neue bzw. erweiterte nicht-funktionale Anforderungen entstehen können.

### 6.2.2 Nicht-funktionale Anforderungen (Konnektivitätsanforderungen)

Aus den Anwendungsfällen der zukünftigen funkbasierten Kommunikationsinfrastruktur des vollautomatischen Bahnbetriebs können drei wesentliche nicht-funktionale Anforderungen abgeleitet werden. Diese Konnektivitätsanforderungen sind Anforderungen an (vgl. [DSD21c]):

#### 1. Datenraten $C$

- Im normalen Betrieb sind die Datenraten im Vergleich zu einem typischen Mobilfunknetz gering.
- Auf Basis der Anwendungsfälle kann abgeleitet werden, dass erhöhte Datenraten hauptsächlich bei Übertragungen vom Fahrzeug in Richtung Infrastruktur/Strecke (Uplink, UL) auftreten (z. B. Videoübertragung), die gegensätzliche Richtung (Downlink, DL) besitzt einen geringeren Datenumfang.

#### 2. Latenzen $L$ (Ende-zu-Ende, E2E)

- Im regulären Zugbetrieb mit 5G realisierbar ( $L = 100$  ms).
- Für Remote entstehen erhöhte Anforderungen an die Latenz ( $L_{Remote} = 10$  ms), wenn die Zuggeschwindigkeit unter  $v = 40$  km/h sinkt.
  - Besondere Überlegungen sind notwendig, z. B. Ultra-Reliable and Low-Latency Communication (URLLC).

#### 3. Paketzuverlässigkeiten $PR$

- Höchste Zuverlässigkeit gefordert, um Störungen zu vermeiden.
  - Schlüsselanforderung

Eine Übersicht mit Annahmen zu typischen Kenngrößen der Konnektivitätsanforderungen findet sich in [Tabelle 6.1](#).

### 6.2.3 Herausforderungen

Um eine erste Abschätzung treffen zu können, sollen nachfolgend ausgewählte Herausforderungen, die der vollautomatische Bahnbetrieb an die Kommunikationsinfrastruktur stellt, näher untersucht werden.

#### Unterschiede zwischen den Automatisierungsgraden

Für die entsprechenden Automatisierungsgrade können auf Basis der Anwendungsfälle die Anforderungen an die Datenraten (UL und DL) je Zug ermittelt werden:

Anwendungsfall	Nachrichtentyp	UL/DL	C	L	PR
Sprachdienste ETCS	Audio	50/50	24 kbit/s	100 ms	99,9 %
	TPR	UL	10 kbit/s	100 ms	99,9999 %
	MA	DL	10 kbit/s	100 ms	99,9999 %
ATO	JP	DL	10-50 kbit/s	100 ms	99,9 %
	SP	DL	100 kbit/s	1 s	99,9 %
	Status Report	UL	1 kbit/s	100 ms	99,9 %
Remote	Video/Audio Stream	UL	1-7 Mbit/s	10 ms	99,9 %
	Control Data	DL	10-100 kbit/s	10 ms	99,9999 %
	Videoüberwachung Video/Audio Stream	UL	1-7 Mbit/s	100 ms	99,9 %

**Tabelle 6.1:** Annahmen zu nicht-funktionalen Anforderungen für ausgewählte Anwendungsfälle des vollautomatischen Bahnbetriebs [DSD21b].

- **Manueller Bahnbetrieb** – nicht als Rückfallebene zu GoA 4, mit Fahrer, nicht ferngesteuert:  $C_{GoA1} = C_{Sprachdienste} + C_{ETCS} = 44 \text{ kbit/s}$
- **Halbautomatischer Bahnbetrieb** – nicht als Rückfallebene zu GoA 4, mit Fahrer, nicht ferngesteuert:  $C_{GoA2} = C_{GoA1} + C_{ATO} = 195 \text{ kbit/s}$
- **Fahrerloser Bahnbetrieb** – Rückfallebene zu GoA 4, ferngesteuert (im Maximalfall, identisch zur Rückfallebene GoA 2):  $C_{GoA3} = C_{GoA2} + C_{Remote} + C_{Video} = 14,295 \text{ Mbit/s}$
- **Vollautomatischer Bahnbetrieb** – folgt auf nächster Seite

Es zeigt sich eine mindestens 325-fache Erhöhung der Anforderungen an die Datenraten in der Rückfallebene des vollautomatischen Bahnbetrieb gegenüber den aktuell gültigen Anforderungen (GoA 1). Wie bereits erläutert, sind für den vollautomatischen Bahnbetrieb weitere Umsysteme notwendig (siehe [Abschnitt 3.3](#)), die zu weiteren Anwendungsfällen führen. Da hierfür keine Daten vorliegen, kann keine detaillierte Abschätzung vorgenommen werden. Eine weitere Steigerung der Anforderungen ist zu erwarten.

Zusätzlich kann auf Basis der Daten aus [Tabelle 6.1](#) ermittelt werden, dass bei Videoübertragung die Datenrate im Vergleich zur Übertragung des ETCS TPR um den Faktor 700 steigt. Dies verdeutlicht exemplarisch die Herausforderungen, die der vollautomatische Bahnbetrieb mit sich bringt („Paradigmenwechsel“).

### Unterschiede zwischen der Rückfallebene und dem Regelbetrieb im vollautomatischen Bahnbetrieb

Typische Kenngrößen des Datenverkehrs des vollautomatischen Bahnbetriebs gemäß eines Berichts des Electronic Communications Committee (ECC) für verschiedene Bereichstypen im Regelbetrieb, d. h. ohne Videoübertragungen, sind in [Tabelle 6.2](#) aufgeführt.

Wie zuvor herausgearbeitet, ist bei Abweichungen vom Regelbetrieb die Nutzung der Fernsteuerung der Fahrzeuge und Fahrzeugbedienungen notwendig. In diesem Fall erhö-

	$C_{DL}/\text{Zug}$ [Mbit/s]	$C_{UL}/\text{Zug}$ [Mbit/s]	# Züge/km [-]	Zellgröße [km]	$C_{DL}/\text{Zelle}$ [Mbit/s]	$C_{UL}/\text{Zelle}$ [Mbit/s]
Abschnitt mit niedriger Belastung	0,42	3,46	0,33	8	1,10	9,15
Abschnitt mit hoher Belastung	0,42	3,46	0,67	8	2,22	18,57
Hochgeschwindigkeitsabschnitt	0,42	3,46	0,5	8	1,66	13,86

**Tabelle 6.2:** Datenverkehr im vollautomatischen Bahnbetrieb für jeden Bereichstyp, ohne kritische Videos gemäß [ECC20].

	$C_{DL}/\text{Zug}$ [Mbit/s]	$C_{UL}/\text{Zug}$ [Mbit/s]	# Züge/km [-]	Zellgröße [km]	$C_{DL}/\text{Zelle}$ [Mbit/s]	$C_{UL}/\text{Zelle}$ [Mbit/s]
Abschnitt mit niedriger Belastung	4,38	7,42	0,33	8	11,55	19,60
Abschnitt mit hoher Belastung	4,38	7,42	0,67	8	23,45	39,79
Hochgeschwindigkeitsabschnitt	4,38	7,42	0,5	8	17,50	29,70

**Tabelle 6.3:** Datenverkehr im vollautomatischen Bahnbetrieb für jeden Bereichstyp, einschließlich Videoübertragungen/kritischer Videos und Sensordaten gemäß [ECC20].

hen sich die Anforderungen deutlich. Einen Überblick über typische Kenngrößen an den Datenverkehr für verschiedene Bereichstypen bei Remote-Nutzung, d. h. mit Videoübertragungen, sind in [Tabelle 6.3](#) aufgeführt.

Die in [Tabelle 6.2](#) und [Tabelle 6.3](#) verwendeten Zellgrößen basieren gemäß [ECC20] auf den Kennwerten typischer, derzeit verwendeter GSM-R-Netze. Es wird angenommen, dass FRMCS an denselben Funkstandorten ohne weitere Verdichtung eingesetzt werden würde.

Anhand der Daten kann der Unterschied der Anforderungen an die Kommunikationsinfrastruktur in der Rückfallebene bzw. bei Nutzung von *Remote* ermittelt werden. Im Wesentlichen sind dies folgende Erkenntnisse:

- Die Anforderungen an die Datenraten steigen bei DL/UL ca. um den Faktor 10,5/2,1.
  - Datenrate (UL und DL) je Zug im Regelbetrieb:  $C_{\text{Regelbetrieb,GoA4}} = 3,88$  Mbit/s (ohne Videoübertragungen)
  - Datenrate (UL und DL) je Zug bei Abweichungen vom Regelbetrieb:  $C_{\text{Rückfallebene}} = 11,8$  Mbit/s (mit Videoübertragungen)
- Dies entspricht einer Verdreifachung der Datenrate bei Nutzung von Videoübertragungen (in der Rückfallebene).

### Vergleich mit den aktuell gültigen Anforderungen an die Kommunikationsinfrastruktur (GSM-R)

Für die Erfüllung der aktuell gültigen Konnektivitätsanforderungen des manuellen Bahnbetriebs wird GSM-R verwendet. Gemäß [He16] kann für GSM-R-Netze folgende Spitzenrate angenommen werden:  $C_{Peak,UL} = C_{Peak,DL} = 172$  kbit/s. Die Konnektivitätsanforderungen des vollautomatischen Bahnbetriebs sind somit nicht mit GSM-R realisierbar. Die Entwicklung eines neuen Funksystems ist notwendig. Derzeit wird an der Einführung des 5G-basierten FRMCS gearbeitet, welches GSM-R ablösen soll.

### 6.2.4 Fazit und weitere Überlegungen

Insgesamt ist festzustellen, dass die Anforderungen an die Kommunikationsinfrastruktur im vollautomatischen Bahnbetrieb gegenüber den aktuell gültigen Anforderungen signifikant erhöht sind, da eine größere Anzahl von Anwendungsfällen existiert. Dies trifft insbesondere auf Abweichungen vom Regelbetrieb zu (Störungen, Rückfallebene). Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen können weitere Überlegungen angestellt werden, deren nähere Untersuchung empfohlen wird:

1. Nutzung öffentlicher Mobilfunknetze (anstelle bahnspezifischer)
  - Dies ist insbesondere für die Kommunikation nicht-sicherer Systeme wie ATO interessant. In urbanen Gebieten wird eine gute Netzabdeckung erwartet.
  - In diesem Zusammenhang ist ebenfalls die Frage zur Nutzung öffentlicher Netze zusätzlich zum Bahn-Mobilfunknetz interessant, z. B. zur Verbesserung der Dienstgüte (Quality of Service, QoS).
  - Es stellt sich ebenfalls die Frage, ob öffentliche Netze im Störfall als Ersatz für sicherheitskritische Systeme genutzt werden können.
  - Die Nutzung öffentlicher Netze ist beispielsweise vorübergehend bei der Umsetzung von ATO im DKS geplant (vgl. [Mar22]).
2. WLAN-Nutzung
  - Ein Anwendungsfall wäre beispielsweise die Nutzung zur Fernsteuerung (Remote) in räumlich begrenzten Bereichen, wie Werksbahnen oder Rangierbereiche.
  - Analog zu CBTC-Systemen existiert die Möglichkeit, WLAN als Ersatz für FRMCS zu nutzen. Dies ist besonders für den Regionalverkehr in urbanen Gebieten interessant (z. B. S-Bahn-Stammstrecken oder Innenstadtunnel).
3. Konnektivitätsanforderungen
  - Die Daten aus [DSD21b] und [ECC20] unterscheiden sich teilweise signifikant. Beispielsweise führen die Daten aus [DSD21b] zu höheren Anforderungen als die Daten aus [ECC20]. Die Herkunft der Unterschiede sollte abgeklärt werden.
  - Die Datengrundlage ist insgesamt zu verbessern, Daten zu weiteren Anwendungsfällen sind zu ermitteln.

- Auf Basis erster Untersuchungen in [DSD21b] zeigt sich, dass die Erfüllung der Konnektivitätsanforderungen weitere Herausforderungen mit sich bringt. Beispielsweise kann die Paketzuverlässigkeit nicht immer erreicht werden.
- 4. Es ist zu untersuchen, welchen Einfluss die räumliche Distanz zwischen Arbeitsplatz des TO und ferngesteuertem Zug auf die Latenz besitzt. Dies kann den Systemaufbau und die Arbeitsumgebung des TO beeinflussen.

### 6.3 Verkehrsarten und Automatisierungsgrade

Anhand der Definition der Automatisierungsgrade gemäß [IEC06] können folgende Aussagen betreffend den in [Abschnitt 2.1](#) eingeführten Verkehrsarten und Marktsegmente für den Regelbetrieb getroffen werden:

- Die Bedingungen zur Einführung des vollautomatischen Betriebs werden für Rangierbereiche und Werksbahnen aufgrund des räumlich begrenzten Bereichs und der geringen Geschwindigkeiten als besonders günstig eingeschätzt. Dies trifft insbesondere auch auf die Anwendung von *Remote* zu. Es kann ein hoher Nutzen erzielt werden.
- Im Güterverkehr ist die Anwendung des fahrerlosen Bahnbetriebs nicht möglich, da keine Zugbegleiter vorhanden sind.
- Im Regionalverkehr in der Fläche auf schwächer belasteten Strecken ist zukünftig ein autonomer Betrieb denkbar. In diesem Fall kommunizieren die Züge mit der Streckeninfrastruktur, wie beispielsweise Weichen (Vehicle-to-Infrastructure-Kommunikation, V2I), und mit anderen Zügen (Vehicle-to-Vehicle-Kommunikation, V2V). In diesem Fall ist eine Zuordnung auf einen entsprechenden Automatisierungsgrad nicht ohne Weiteres möglich, es kommt zu Änderungen an der ermittelten Funktionsallokation ([Tabelle 3.3](#)). Ein Konzept ist beispielsweise die Neue Sekundärbahn (NSB) (vgl. [Men20]).
- In den einzelnen Verkehrsarten bzw. Marktsegmenten kommt es zu geringen Abweichungen bei den Basisfunktionen. So gibt es im Güterverkehr beispielsweise keine Fahrgastraumtüren, die gesteuert und überwacht werden müssen (Basisfunktionen G.1 und G.2). In Rangierbereichen und bei Werksbahnen können aufgrund spezifischer Anforderungen weitere Funktionen auftreten. Die stufenbasierte Struktur der (Basis-)Funktionen<sup>4</sup> ermöglicht eine modulare Anpassung und Ergänzung.

Anhand der Erkenntnisse aus [Kapitel 5](#), [Abschnitt 6.1](#) und [Abschnitt 6.2](#) können für die Rückfallebene folgende Aussagen betreffend der Verkehrsarten und Marktsegmente getroffen werden:

- Im Regionalverkehr in urbanen Gebieten sinkt der Stellenwert der Fernsteuerung der Fahrzeuge und Fahrzeugbedienungen. Es existieren Ähnlichkeiten zu bestehenden

---

<sup>4</sup>erläutert in [Abschnitt 3.2](#).

vollautomatischen U-Bahnen (z. B. U-Bahn Nürnberg). Die Bereithaltung von entsprechendem Betriebspersonal (z. B. KUSS-Mitarbeiter) zur Entstörung vor Ort ist beispielsweise auf Stammstrecken gut möglich.

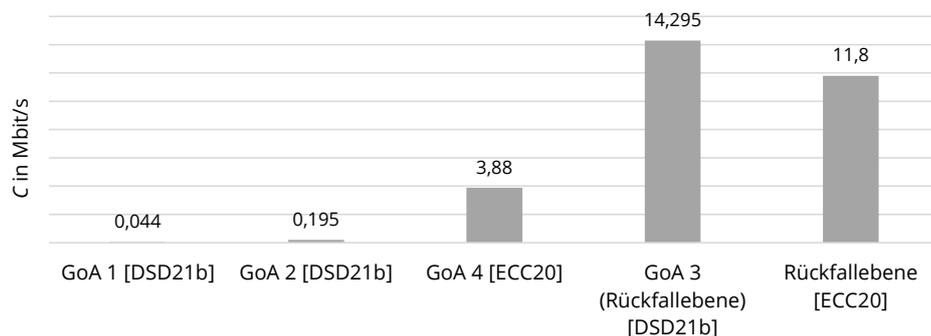
- Die Bewältigung von Störungen und Notsituationen (Basisfunktionen F.5 und F.6) unterscheidet sich im Detail, da beispielsweise im Güterverkehr keine Fahrgäste in Panik geraten können. Dies kann die notwendigen Konnektivitätsanforderungen beeinflussen, da beispielsweise weniger Videoübertragungen nötig sind.

## 6.4 Zusammenfassung

Um bei Störungen und Abweichungen vom Regelbetrieb effizient reagieren zu können, ist ein neues System notwendig (*Remote-OB* und *Remote-TS*), welches die sichere Fernsteuerung der Fahrzeuge und Fahrzeugbedienungen ermöglicht. Pilotprojekte beweisen die Machbarkeit, wenngleich eine Vielzahl von Herausforderungen betreffend Systemaufbau, Systemarchitektur, Schnittstellen, Arbeitsumgebung, Arbeitsplatzgestaltung, Arbeitsbelastung (Workload) sowie Aspekten der Zulassung zu lösen sind. Ein mögliches Lösungskonzept ist der *Train Operator*.

An die zukünftige Kommunikationsinfrastruktur entstehen signifikant höhere nicht-funktionale Anforderungen (Konnektivitätsanforderungen) betreffend Datenraten, E2E-Latenzen und Paketzuverlässigkeiten. [Abbildung 6.3](#) fasst die Steigerung der Anforderungen an die Datenraten zusammen. Notwendige Videoübertragungen in der Rückfallebene können als Hauptgrund identifiziert werden. Die Konnektivitätsanforderungen des vollautomatischen Bahnbetriebs sind nicht mit GSM-R realisierbar. Weiterführende Untersuchungen zur Nutzung öffentlicher Mobilfunknetze und WLAN sowie der Verbesserung der Datengrundlage werden empfohlen.

Die einzelnen Verkehrsarten und Marktsegmente besitzen einen Einfluss auf die Automatisierungsgrade. So ist der fahrerlose Bahnbetrieb im Güterverkehr nicht möglich. Es kommt zu leichten Abweichungen der Basisfunktionen, da beispielsweise nur im Personenverkehr Fahrgastraumtüren gesteuert und überwacht werden müssen.



**Abbildung 6.3:** Vergleich der Anforderungen an die Datenraten (UL und DL) je Zug in Abhängigkeit der Automatisierungsgrade des Regelbetriebs und der Rückfallebene sowie der Datengrundlage.

# 7 Zusammenfassung und Ausblick

Dieses Kapitel dient der Zusammenfassung der in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse. Empfehlungen zu weiteren Entwicklungsschritten werden formuliert. Weiterer Untersuchungsbedarf und übergreifende Aspekte werden in einem Ausblick geäußert.

## 7.1 Fazit

In dieser Arbeit wurden verschiedene Aspekte der Vollautomatisierung des Bahnbetriebs systematisch untersucht. Neben den Zusammenfassungen am Ende der jeweiligen Kapitel sollen nachfolgend die wesentlichen Erkenntnisse im Rahmen des Fazits zusammengefasst werden.

Der vollautomatische Bahnbetrieb unterliegt einem Spannungsfeld verschiedener **Rahmenbedingungen**. Es existieren verschiedene Verkehrsarten und Marktsegmente, die sich u. a. im Hinblick auf Automatisierungsfähigkeit, Anforderungen, Basisfunktionen sowie Nutzen unterscheiden. Beispielsweise ist der fahrerlose Bahnbetrieb im Güterverkehr nicht möglich. Der vollautomatische Betrieb bei Vollbahnen ist in Deutschland zum aktuellen Zeitpunkt nicht rechtssicher durchführbar. Die aktuellen betrieblichen Prozesse und Regelwerke sind nicht geeignet, eine Neugestaltung ist angebracht.

Die **Ausgangsbasis** des vollautomatischen Bahnbetriebs umfasst u. a. technische Kernsysteme wie ETCS (mindestens in Level 2 und ohne Lichtsignale), AoE, APS (Verschmelzung von RBC und bisherigem Stw) sowie eine leistungsfähige Leittechnik. Sämtliche Zugbewegungen benötigen einen Fahrtauftrag und finden unter Deckung einer Fahrerlaubnis (MP im APS) statt. Es wird nicht zwischen Zug- und Rangierfahrten unterschieden.

Für die Beschreibung des vollautomatischen Bahnbetriebs wurden acht Funktionsblöcke sowie 33 übergeordnete **Basisfunktionen** mittels eines stufenbasierten und literaturorientierten Verfahrens aufgestellt und **wesentliche Umsysteme** definiert. Die neuen Umsysteme ersetzen das Betriebspersonal im vollautomatischen Bahnbetrieb. Die Funktionen sind den Systemen in einer Funktionsallokation zugeordnet.

Als Ergebnis der systematischen Untersuchung des **Einflusses des vollautomatischen Bahnbetriebs auf ETCS** zeigt diese Arbeit, dass ETCS eingesetzt werden kann, wenn alle Funktionen, die bislang vom Fahrer durchgeführt werden, von technischen Systemen übernommen werden. Der Einfluss auf die Betriebsarten ist in [Tabelle 7.1](#) zusammengefasst. Die Auswirkungen auf die Prozeduren sind ähnlich: Sechs können entfallen, vier vermutlich ohne Anpassung weiter genutzt und acht Prozeduren müssen genauer untersucht werden, um den tatsächlichen Anpassungsbedarf zu ermitteln. Die beispielhafte Untersuchung der Prozedur SoM zeigte einen lösbaren Anpassungsbedarf. ETCS-Funktionalitäten, wie beispielsweise die Gleisfreiprüfung durch den Fahrer (TAF), können im vollautomatischen Bahnbetrieb entfallen. Es entstehen neue Anforderungen. Da weitere Eingangssi-

ETCS-Betriebsarten	Einfluss
LS, SH, UN, SN, RV, PS	Nicht relevant
AD/FS, OS, SR, NL	Anwendung möglich
TR, PT, SB, IS	Anwendung möglich
SL, NP, SF	Anwendung möglich, Einfluss UTO vernachlässigbar

**Tabelle 7.1:** Zusammenfassung des Einflusses des vollautomatischen Bahnbetriebs auf die Betriebsarten.

gnale vorliegen, sind neue Schnittstellen notwendig. Eine Weiterentwicklung der Spezifikation ist angebracht.

Die teils deutlichen **systemischen Unterschiede zwischen den Automatisierungsgraden** bei Ausführung der Basisfunktionen äußern sich in technischen und betrieblichen Aspekten. Je mehr Systeme ausgefallen sind, desto niedriger ist der anwendbare Automatisierungsgrad. Es ergeben sich keine erheblichen Unterschiede in der Systemarchitektur. Mit *Remote* ist ein neues Umsystem zur Fernsteuerung der Fahrzeuge und Fahrzeugbedienungen in der Rückfallebene zwingend notwendig. Pilotprojekte beweisen die Machbarkeit, wenngleich eine Vielzahl von Herausforderungen betreffend Systemaufbau, Systemarchitektur, Schnittstellen, Arbeitsumgebung, Arbeitsplatzgestaltung, Arbeitsbelastung (Workload) sowie Aspekten der Zulassung zu lösen sind. Weitere Systeme sind für den Einsatz in der Rückfallebene denkbar, werden aber nicht als notwendig eingeschätzt. Es entstehen neue Funktionen. Bei der Systementwicklung sind neue Herausforderungen der Informationsübertragung und -visualisierung in der Rückfallebene zu berücksichtigen.

An die zukünftige **Kommunikationsinfrastruktur** entstehen hohe nicht-funktionale Anforderungen (Konnektivitätsanforderungen) betreffend Datenraten, E2E-Latenzen und Paketzuverlässigkeiten. Im Vergleich zu den aktuell gültigen Anforderungen an die Datenraten kann eine mindestens 325-fache Steigerung ermittelt werden. Die Konnektivitätsanforderungen des vollautomatischen Bahnbetriebs sind nicht mit GSM-R realisierbar.

Insgesamt kommt die Arbeit zu dem Fazit, dass ETCS für den Einsatz im vollautomatischen Bahnbetrieb geeignet ist. Es wurden keine Probleme identifiziert, welche den Einsatz von ETCS grundsätzlich in Frage stellen. Es besteht ein hoher Anpassungsaufwand gegenüber den aktuell gültigen Anforderungen, was sich u. a. durch Änderungen an den betrieblichen Prozessen, der Entwicklung neuer Umsysteme sowie erhöhten Konnektivitätsanforderungen zeigt.

## 7.2 Empfehlung zu weiteren Entwicklungsschritten

Diese Arbeit zeigt, dass für die Einführung des vollautomatischen Bahnbetriebs eine Vielzahl von Herausforderungen technischer und betrieblich-organisatorischer Herkunft zu lösen sind. Neben vielen weiteren in der Arbeit aufgezeigten Aspekten sind insbesondere die folgenden Punkte mit hoher Priorität anzugehen, welche in [Tabelle 7.2](#) mit einer Abschätzung zur zeitlichen Umsetzbarkeit zusammengefasst sind:

1. **Schaffung rechtlicher Rahmenbedingungen**
2. **Erstellung und Veröffentlichung eines betrieblichen Konzepts** für alle Verkehrsarten und Marktsegmente (z. B. in Szenarienform). Das Konzept sollte Orientierung geben und keine technischen Aspekte berücksichtigen. Eine Weiterentwicklung zu einem BZB ist auf Basis von Rückmeldungen möglich.
3. **Entwicklung betrieblicher Prozesse und Regelwerke** für den Regelbetrieb und die Rückfallebene unter Berücksichtigung der in dieser Arbeit abgeleiteten Anforderungen (z. B. detailliertes BZB, Betriebsarten, Fahrdienstvorschrift).
4. **Sammeln von Praxiserfahrungen** im laufenden Betrieb zu bereits spezifizierten Kernsystemen wie ATO oder ETCS (L2 oS). ATO muss zusätzlich zum *Stand der Technik* auch zum *Betriebsstandard* in allen Verkehrsarten und Marktsegmenten werden. Teststrecken mit ETCS HL3 oder L3 werden empfohlen. In diesem Zusammenhang sollte eine *optimale* ETCS-Ausrüstung unter Berücksichtigung vieler Faktoren, wie LCC, RAMS oder der Verkehrsarten und Marktsegmente, ermittelt werden.
5. **Durchführung von Pilotprojekten** in allen Verkehrsarten und Marktsegmenten<sup>1</sup>
6. Identifikation relevanter Schnittstellen und **Weiterentwicklung der ETCS-Spezifikation**
7. **Schaffung technischer Grundlagen** für den vollautomatischen Bahnbetrieb: Umsysteme auf Basis betrieblicher Anforderungen des Regelbetriebs und der Rückfallebene unter Beachtung der gültigen Normen (wie EN 50126, -28 und -29) entwickeln, testen und zulassen. Es kann ggf. erforderlich sein, die Umsysteme den entsprechenden Sicherheitsstufen (Safety Integrity Level, SIL) zuzuordnen. Ein Vorgehen gemäß dem Model-based Systems Engineering (MBSE) wird empfohlen.

#	Entwicklungsschritt	Abschätzung zur zeitlichen Umsetzbarkeit
1.	Rechtliche Rahmenbedingungen	Kurz- bis mittelfristig möglich
2.	Betriebliches Konzept	Kurzfristig, mittelfristig Detaillierungen
3.	Betriebliche Prozesse und Regelwerke	Mittel- bis langfristig
4.	Praxiserfahrungen	Mittel- bis langfristig <sup>a</sup>
5.	Pilotprojekte	Mittelfristig realisierbar
6.	Weiterentwicklung ETCS-Spezifikation	Langfristig
7.	Schaffung technischer Grundlagen	Langfristig
8.	Umsetzungsplan	Kurz- bis mittelfristig

<sup>a</sup>kurzfristig aufgrund fehlender Streckenausrüstung nicht möglich, z. B. ATO im DKS ab 2026 geplant (vgl. [Dre22]).

**Tabelle 7.2:** Empfehlungen zu weiteren Entwicklungsschritten zur Einführung des vollautomatischen Bahnbetriebs mit Abschätzungen zur zeitlichen Umsetzbarkeit.

<sup>1</sup>Beispielhaft sei die Entwicklung einer vollautomatischen Abdrücklok für den Rangierbereich genannt (vgl. [Eur21]). Naheliegender ist die Weiterentwicklung der DSH, siehe z. B. Projekt *Sensors4Rail* (vgl. [Hau22]). Dies schließt Anwendungsmöglichkeiten von *Remote* ein.

8. Erarbeitung eines **Umsetzungsplans**<sup>2</sup>**7.3 Weiterer Untersuchungsbedarf**

Zu den in den jeweiligen Kapiteln identifizierten Untersuchungsbedarfen und den in [Abschnitt 7.2](#) formulierten Empfehlungen zu weiteren Entwicklungsschritten soll zusammenfassend auf folgende Aspekte hingewiesen werden:

**1. Standardisierung und Vereinheitlichung**

Die Norm IEC 62290-1 wurde für den städtischen Nahverkehr entwickelt. Für die Anwendung im Vollbahnbereich wird eine Weiterentwicklung unter (1) Berücksichtigung der charakteristischen Merkmale der Verkehrsarten und Marktsegmente, (2) Unterscheidung zwischen *automatischem* und *autonomen* Bahnbetrieb, (3) Einordnung der Fernsteuerung der Fahrzeuge und Fahrzeugbedienungen sowie (4) Erweiterung um übergeordnete und Querschnittsfunktionen (im Sinne einer „vollständigen“ Beschreibung des Bahnbetriebs) empfohlen.

Ein mögliches Vorgehen ist auf Basis betrieblicher Prozesse, der Bildung von Betriebsarten für den Regel- und Störbetrieb und der darauf aufbauenden Zuordnung zu den Automatisierungsgraden denkbar.

Im Rahmen der Arbeit wurde bei folgenden (Grund-)Begriffen Klärungs- bzw. Standardisierungspotential identifiziert: *automatisch*, *vollautomatisch*, *automatisiert*, *hochautomatisiert*, *autonom* sowie *ETCS L2 ohne Signale (oS)*. Eine weiterführende Klärung und Standardisierung durch europäische Initiativen oder die jeweiligen EIU ist wünschenswert.

**2. Die Rolle des Menschen im zukünftigen Bahnbetrieb**

Die Arbeit zeigt, dass der Mensch im vollautomatischen Bahnbetrieb weiterhin benötigt wird. Das Aufgabenfeld des Betriebspersonals wird sich ändern. Es entstehen verschiedene Fragestellungen, die interdisziplinär diskutiert und untersucht werden sollten: Wie kann das Betriebspersonal in den Bahnbetriebsführungsprozess integriert werden? Werden Fahrgäste einen fahrerlosen Zug des HGV nutzen? Wie sieht der Kundenkontakt und Kundenservice in Zukunft aus? Können Bremsproben vollautomatisch (ohne „haftendes“ Personal) durchgeführt werden?

**3. Kommunikationsinfrastruktur**

Neben der Entwicklung von FRMCS werden weiterführende Untersuchungen zur Nutzung öffentlicher Mobilfunknetze oder WLAN empfohlen. Die entsprechenden Daten (z. B. Anwendungsfälle, Anforderungen an Datenraten) sollten vervollständigt und plausibilisiert werden, um eine bessere Datengrundlage zu schaffen.

<sup>2</sup>Als Realisierungsstartpunkte bieten sich die DSH oder der DKS an. Allgemein sollten in diesem Zusammenhang Fragen zur Wirtschaftlichkeit der Vollautomatisierung der jeweiligen Verkehrsarten und Marktsegmente untersucht werden, um einen hohen Nutzen zu erzielen (siehe z. B. [Zsc20]).

## 7.4 Ausblick

Diese Arbeit möchte durch den ganzheitlichen Betrachtungsansatz des Bahnsystems und die systematischen Untersuchungen bezüglich der Auswirkungen auf ETCS, der Identifikation systemischer Unterschiede der Automatisierungsgrade und den Betrachtungen weiterer Aspekte einen wichtigen Beitrag zur Einführung des vollautomatischen Bahnbetriebs leisten. Das entwickelte Modell der Basisfunktionen und die Systemarchitektur können modular erweitert werden. Die in der Arbeit identifizierten Problemstellungen stellen eine Ausgangsbasis für weitergehende Diskussionen und Untersuchungen dar. Es ergeben sich weitere Fragestellungen, die im Rahmen der Arbeit nicht näher betrachtet werden konnten:

- Wird die durch RCA entwickelte Systemarchitektur eine Spezifikation analog ETCS (d. h. mit Integration in ERTMS und Einführung neuer SS) oder „nur“ einen Rahmen vorgeben?
- Trifft diese Problematik auch auf OCORA und weitere Umsysteme zu?
- Wie kann ein bestmöglicher Kompromiss zwischen Interoperabilität und Innovation erreicht werden?
- Was sind die Auswirkungen von APS auf die klassische LST bzw. Stw-Technik? Inwieweit ist eine Kompatibilität einzelner Komponenten vorhanden?
- Führen weitere nicht-funktionale Anforderungen zu Einschränkungen bei der Prozess- und Systemgestaltung?

Der Paradigmenwechsel im Anforderungsmanagementprozess muss konsequent umgesetzt werden, die Technik die vom Betrieb gestellten Anforderungen erfüllen. Die für dieses Jahr erwartete neue TSI ZSS enthält wichtige *Game Changer*, (Arbeits-)Ergebnisse von Initiativen wie OCORA, RCA und der DAK sowie die Schaffung des ERJU mit Innovations- und Systempfeiler treiben die Entwicklung voran. Der aktuelle Stand von Forschung und Technik ändert sich stetig, weshalb diese Arbeit nur einen Zwischenstand darstellt und somit kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben werden kann.

Es ist essentiell, aus den Erfahrungen der ersten *digitalen* Projekte zu lernen und diese bei der weiteren Entwicklung des vollautomatischen Bahnbetriebs zu berücksichtigen. Nur so können in den nächsten Jahren weitreichende Schritte der Digitalisierung des Bahnsystems erfolgreich gesetzt und die Einführung des vollautomatischen Bahnbetriebs vorangebracht werden.

# Literatur

- [AEG21] AEG: *Allgemeines Eisenbahngesetz vom 27. Dezember 1993 (BGBl. I S. 2378, 2396; 1994 I S. 2439), das zuletzt durch Artikel 10 des Gesetzes vom 10. September 2021 (BGBl. I S. 4147) geändert worden ist.* 2021.
- [Alb20] R. F. Albert und R. Hundt: „Digitalisierung als Schlüssel für die Zukunft der Bahn – Wer orchestriert die Leit- und Sicherungstechnik in Deutschland und Europa?“ In: *Signal + Draht* 112.4 (2020), S. 6–12.
- [All21] Allianz pro Schiene: *Eisenbahn ist das sicherste Verkehrsmittel.* 2021. url: <https://www.allianz-pro-schiene.de/presse/pressemittelungen/eisenbahn-ist-das-sicherste-verkehrsmittel/> (besucht am 14.02.2022).
- [All22a] Allianz pro Schiene: *Digitale Automatische Kupplung – Güterverkehr mit Zukunft.* 2022. url: <https://www.allianz-pro-schiene.de/themen/gueterverkehr/digitale-automatische-kupplung/> (besucht am 04.03.2022).
- [All22b] Allianz pro Schiene: *Marktanteile – Der Erfolgskurs der Güterbahnen gerät ins Stocken.* 2022. url: <https://www.allianz-pro-schiene.de/themen/gueterverkehr/marktanteile/> (besucht am 18.01.2022).
- [Arp16] M. Arpaci und M. Eichhorn: „Case study: coexistence of CBTC and ETCS on Crossrail project in London“. In: *CORE 2016, Maintaining the Momentum, Conference on Railway Excellence, Melbourne, Victoria, 16-18 May 2016.* 2016.
- [Bac18] D. Bachurina und U. Maschek: „Die Leit- und Sicherungstechnik im Spiegel der industriellen Revolutionen“. In: *Der Eisenbahningenieur* 1 (2018), S. 10–13.
- [Bey19] M. Beyer, S. Jurtz, M. Langhof, P. Reinhart und T. Vogel: „ETCS als Trägersystem zur Leistungssteigerung bei der S-Bahn Stuttgart“. In: *Signal + Draht* 111.6 (2019), S. 6–16.
- [Bob18] S. Bobsien: „Innovationen für die Zukunft der Fahrzeuge im Schienengüterverkehr“. In: *Deine Bahn* 12 (2018), S. 6–13.
- [BOS19] BOStrab: *Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung vom 11. Dezember 1987 (BGBl. I S. 2648), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 1. Oktober 2019 (BGBl. I S. 1410) geändert worden ist.* 2019.
- [Bos19] G. Bosse und M. Scheidt: „Übergreifender Ansatz zur Definition eisenbahnbetrieblicher Funktionen“. In: *Deine Bahn* 3 (2019), S. 22–27.
- [Bra17] N. Brandenburger, A. Naumann, J. Grippenkoven und M. Jipp: „Der Train Operator“. In: *EI-SPEZIAL Fahrzeuge – Entwicklung, Design, Ausstattung* 9 (2017), S. 13–15.

- [Bra18a] N. Brandenburger und A. Naumann: „Menschliche Problemlösung macht automatisierten Bahnverkehr erfolgreich“. In: *Signal + Draht* 110.3 (2018), S. 6–13.
- [Bra18b] N. Brandenburger und A. Naumann: „Towards remote supervision and recovery of automated railway systems: The staff's changing contribution to system resilience“. In: *2018 International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT)*. 2018, S. 1–5. doi: [10.1109/ICIRT.2018.8641576](https://doi.org/10.1109/ICIRT.2018.8641576).
- [Bra19] N. Brandenburger und A. Naumann: „Der Arbeitsplatz des Train Operators im Fokus“. In: *Der Eisenbahningenieur* 11 (2019), S. 13–16.
- [Bra20] J. Braband: „Safety und Security in Sicherheitsnachweisführung und Begutachtung“. In: *Deine Bahn* 6 (2020), S. 20–24.
- [Bra21a] J. Braband: „Künstliche Intelligenz – Mit Sicherheit?“ In: *Deine Bahn* 4 (2021), S. 30–35.
- [Bra21b] N. Brandenburger, A. Naumann und M. Jipp: „Task-induced fatigue when implementing high grades of railway automation“. In: *Cognition, Technology & Work* 23.2 (2021), S. 273–283. issn: 1435-5558. doi: [10.1007/s10111-019-00613-z](https://doi.org/10.1007/s10111-019-00613-z).
- [Brü17] D. Brückner: „Lösungen für das automatisierte Fahren im Nahverkehr“. In: *Signal + Draht* 109.6 (2017), S. 6–11.
- [Büh21] P. Bührsch: *Nachhaltige Effekte der Digitalisierung im Bereich der Deutschen Bahn*. 2021. url: [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/DG/Digitales/ag-digitale-netze-auftaktveranstaltung-praesentation-nachhaltige-effekte-digitalisierung-deutsche-bahn.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/DG/Digitales/ag-digitale-netze-auftaktveranstaltung-praesentation-nachhaltige-effekte-digitalisierung-deutsche-bahn.pdf?__blob=publicationFile) (besucht am 18.01.2022).
- [Büh22] P. Bührsch, T. Büker, S. Schotten und S. Hardel: „Vorteile und Nutzen von ETCS L2oS und DSTW im Schienenverkehr“. In: *Eisenbahn Ingenieur Kompendium* (2022), S. 223–238.
- [DAC21] DAC4EU, Hrsg.: *Digitale Automatische Kupplung (DAK) - Projektinformation*. 2021. url: [https://www.dac4.eu/wp-content/uploads/DAK\\_Projektinformation\\_Mrz\\_21.pdf](https://www.dac4.eu/wp-content/uploads/DAK_Projektinformation_Mrz_21.pdf) (besucht am 07.03.2022).
- [Dah16] T. Dahlmann-Resing: *Automatisierung und ihre Möglichkeiten*. 2016. url: [https://www.oevg.at/fileadmin/user\\_upload/Editor/Dokumente/Veranstaltungen/2016/u2\\_u5/dahlmann\\_resing.pdf](https://www.oevg.at/fileadmin/user_upload/Editor/Dokumente/Veranstaltungen/2016/u2_u5/dahlmann_resing.pdf) (besucht am 09.02.2022).
- [DB 21] DB Netz AG, Hrsg.: *Richtlinie 408: Fahrdienstvorschrift. Version 4.0*. 2021.
- [Deu20] Deutsche Bahn: *DB-Konzern 2019: Erstmals über 150 Millionen Reisende im Fernverkehr*. 2020. url: <https://ir.deutschebahn.com/de/news-praesentation/news/detail/bilanz-2019> (besucht am 04.05.2022).
- [Deu22a] Deutsche Bahn: *Deutschland braucht eine starke Schiene*. 2022. url: [https://www.deutschebahn.com/de/konzern/starke\\_schiene-6899544](https://www.deutschebahn.com/de/konzern/starke_schiene-6899544) (besucht am 18.01.2022).

- [Deu22b] Deutsche Bahn: *Digitale Revolution im Güterverkehr: Testzug startet zu Fahrt durch Europa*. 2022. url: [https://www.deutschebahn.com/de/presse/pressestart\\_zentrales\\_uebersicht/Digitale-Revolution-im-Gueterverkehr-Testzug-startet-zu-Fahrt-durch-Europa--7175278?view=&contentId=6900954](https://www.deutschebahn.com/de/presse/pressestart_zentrales_uebersicht/Digitale-Revolution-im-Gueterverkehr-Testzug-startet-zu-Fahrt-durch-Europa--7175278?view=&contentId=6900954) (besucht am 04. 03. 2022).
- [Deu22c] Deutsche Bahn: *Erläuterung Pünktlichkeitswerte Dezember 2021*. 2022. url: [https://www.deutschebahn.com/de/konzern/konzernprofil/zahlen\\_fakten/puenktlichkeitswerte-6878476](https://www.deutschebahn.com/de/konzern/konzernprofil/zahlen_fakten/puenktlichkeitswerte-6878476) (besucht am 18. 01. 2022).
- [Dim21] D. Dimmer und K. Haimann: „Brownfield-Projekte: Re-Signalisierung einer U-Bahn mit Communications-Based Train Control“. In: *Signal + Draht* 113.3 (2021), S. 14–20.
- [DIN18] Norm DIN EN 50126-1:2018-10 2018: *Bahnanwendungen – Spezifikation und Nachweis von Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit (RAMS) – Teil 1: Generischer RAMS-Prozess*.
- [Dop15] J. Doppelbauer: „Regulierungs- und Standardisierungsaspekte im europäischen Eisenbahnwesen“. In: *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik* 132.7 (2015), S. 384–388. issn: 0932-383X. doi: [10.1007/s00502-015-0346-x](https://doi.org/10.1007/s00502-015-0346-x).
- [Dre22] O. Drescher: „ETCS Level 2 ohne „Signale“ in einem großen Knoten“. In: *Deine Bahn* 3 (2022), S. 28–32.
- [DSD21a] DSD, Hrsg.: *Design and Evaluation of an FRMCS E2E System using Mission Critical Services for Future Rail Operation. Final Report, Version 1.1*. 2021. url: [https://digitale-schiene-deutschland.de/Downloads/FinalReport\\_Kontron\\_DB\\_FRMCS\\_MCX\\_Design.pdf](https://digitale-schiene-deutschland.de/Downloads/FinalReport_Kontron_DB_FRMCS_MCX_Design.pdf) (besucht am 10. 03. 2022).
- [DSD21b] DSD, Hrsg.: *Design of an FRMCS 5G E2E System for Future Rail Operation*. 2021. url: [https://digitale-schiene-deutschland.de/Downloads/StudyReport\\_Ericsson\\_DB\\_FRMCS\\_5G\\_Design.pdf](https://digitale-schiene-deutschland.de/Downloads/StudyReport_Ericsson_DB_FRMCS_5G_Design.pdf) (besucht am 25. 03. 2022).
- [DSD21c] DSD, Hrsg.: *Highly resilient FRMCS/5G design for future rail operation. White paper*. 2021. url: [https://digitale-schiene-deutschland.de/Downloads/WhitePaper\\_Nokia\\_DB\\_%20Highly\\_Reliable\\_FRMCS\\_5G\\_Design.pdf](https://digitale-schiene-deutschland.de/Downloads/WhitePaper_Nokia_DB_%20Highly_Reliable_FRMCS_5G_Design.pdf) (besucht am 25. 03. 2022).
- [EBO19] EBO: *Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung vom 8. Mai 1967 (BGBl. 1967 II S. 1563), die zuletzt durch Artikel 2 der Verordnung vom 5. April 2019 (BGBl. I S. 479) geändert worden ist*. 2019.
- [ECC20] ECC, Hrsg.: *CEPT Report 74*. 2020. url: <https://docdb.cept.org/download/af7170bb-7a35/CEPT%20Report%2074.pdf> (besucht am 11. 03. 2022).
- [ERA16] ERA, Hrsg.: *ERTMS/ETCS: System Requirements Specification. SUBSET-026, Version 3.6.0*. 2016.
- [EUG19] EUG, Hrsg.: *Engineering Guideline: 69. Automatic Track Ahead Free (B3). Ref: EUG\_69, Version 3.0*. 2019.
- [EUG21] EUG, Hrsg.: *Engineering Guideline: 68. Start of Mission in Level 2/3 (B3). Ref: 19E045, Version 2-*. 2021.

- [EUL20] EULYNX, Hrsg.: *EULYNX System definition - Appendix A1: EULYNX System architecture. Eu.Doc.7\_A1 v3.5 (0.A)*. 2020.
- [Eur21] Eurailpress: *DB Cargo: Railery entwickelt vollautomatische Abdrücklok*. 2021. url: <https://www.eurailpress.de/nachrichten/unternehmen-maerkte/detail/news/db-cargo-railery-entwickelt-vollautomatische-abdruecklok-1.html> (besucht am 14.04.2022).
- [Fie12] J. Fiedler und W. Scherz: *Bahnwesen Planung, Bau und Betrieb von Eisenbahnen, S-, U-, Stadt- und Straßenbahnen*. 6., neu bearb. und erw. Aufl. Köln: Werner, 2012. isbn: 9783804116252.
- [Fla19a] L. Flamm, C. Meirich und B. Jäger: „Die Umsetzung des automatisierten Bahnbetriebs zwischen Technik, Regelwerken und Wirtschaftlichkeit“. In: *Eisenbahntechnische Rundschau* 3 (2019), S. 27–31.
- [Fla19b] L. Flamm, C. Meirich, M. Meyer zu Hörste, F. Hagemeyer und M. Preuß: „Regulatorischer Anpassungsbedarf für das automatische Fahren im Bahnbetrieb“. In: *Eisenbahn Ingenieur Kompendium* (2019), S. 110–131.
- [Fri21] N. Fries: „Betrieblich-Technisches Zielbild für die „Digitale Schiene““. In: *Deine Bahn* 3 (2021), S. 6–10.
- [Gra16] C. Gralla: „Sind wir bereit für den fahrerlosen Verkehr im Nah- und Fernverkehr?“ In: *Signal + Draht* 108.4 (2016), S. 6–15.
- [Hag21] F. Hagemeyer, M. Preuß, M. Meyer zu Hörste, C. Meirich und L. Flamm: *Automatisiertes Fahren auf der Schiene*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021. isbn: 978-3-658-32327-1. doi: [10.1007/978-3-658-32328-8](https://doi.org/10.1007/978-3-658-32328-8).
- [Hau22] C. Hauswald, D. Spiegel, D. Kreyenberg und A. Fiack: „Digitale Schiene Deutschland testet erstmals sensorbasierte Wahrnehmungssysteme im Bahnbetrieb“. In: *Deine Bahn* 4 (2022), S. 36–34.
- [He16] R. He, B. Ai, G. Wang, K. Guan, Z. Zhing, A. F. Molisch, C. Briso-Rodriguez und C. Oestges: „High-Speed Railway Communications: from GSM-R to LTE-R“. In: *IEEE Vehicular Technology Magazine* 11.3 (2016), S. 49–58. doi: [10.1109/MVT.2016.2564446](https://doi.org/10.1109/MVT.2016.2564446).
- [Hin93] A. Hinzen: *Der Einfluss des menschlichen Fehlers auf die Sicherheit der Eisenbahn*. Aachen: Verkehrswiss. Inst. d. Rhein.-Westfäl. Techn. Hochsch, 1993.
- [Hua16] P.-C. Huang und B. Milius: „IT-Security für einen sicheren Bahnbetrieb“. In: *Deine Bahn* 2 (2016), S. 12–16.
- [IEC06] Norm IEC 62290-1:2006 2006: *Railway application – Urban guided transport management and command/control systems – Part 1: System principles and fundamental concepts*.
- [IEEE04] IEEE: „IEEE Standard for Communications-Based Train Control (CBTC) Performance and Functional Requirements“. In: *IEEE Std 1474.1-2004 (Revision of IEEE Std 1474.1-1999)* (2004), 0\_1–45. doi: [10.1109/IEEESTD.2004.95746](https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2004.95746).

- [IRJ20] IRJ International Railway Journal: *Remote driving clears first hurdle*. 2020. url: <https://www.railjournal.com/indepth/remote-driving-clears-first-hurdle/> (besucht am 10.03.2022).
- [Jan12] J. Janicki: „Systematik der Schienenfahrzeuge“. In: *Deine Bahn* 9 (2012), S. 30–35.
- [Jan20a] J. Janicki, H. Reinhard und M. Ruffer: *Schienenfahrzeugtechnik*. 4., überarbeitete Auflage. Berlin: Bahn Fachverlag GmbH, 2020. isbn: 9783943214260.
- [Jan20b] J. Jansen und Godziejewski: „ETCS: Zugbeeinflussung der Vergangenheit, der Gegenwart oder der Zukunft?“ In: *Signal + Draht* 112.12 (2020).
- [Kim15] K. Kimura und M. Inoue: „Inventing a new type of platform gate“. In: *Urban Transport XXI*. URBAN TRANSPORT 2015 (València, Spain). Hrsg. von C. A. Brebbia und J. L. Miralles i Garcia. WIT Transactions on The Built Environment. WIT PressSouthampton, UK, 2015, S. 599–609. doi: [10.2495/UT150491](https://doi.org/10.2495/UT150491).
- [Koa21] Koalitionsvertrag zwischen SPD, B'90/Grüne und FDP: *Mehr Fortschritt wagen*. 2021. url: [https://www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Koalitionsvertrag/Koalitionsvertrag\\_2021-2025.pdf](https://www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Koalitionsvertrag/Koalitionsvertrag_2021-2025.pdf) (besucht am 18.01.2022).
- [Kop21] M. Kopitzki, W. Braun und S. Post: *Betriebliches Zielbild für den digitalen Bahnbetrieb*. 2021. url: [https://www.ews.tu-berlin.de/fileadmin/fg98/aushaenge/2021-wise/2021-11-15\\_EWS\\_Kopitzki\\_Braun\\_Post\\_DB\\_Netz\\_Zielbild\\_digitaler\\_Bahnbetrieb.pdf](https://www.ews.tu-berlin.de/fileadmin/fg98/aushaenge/2021-wise/2021-11-15_EWS_Kopitzki_Braun_Post_DB_Netz_Zielbild_digitaler_Bahnbetrieb.pdf) (besucht am 11.01.2022).
- [Kre19] E. Kretschmer und M. D. Kunze: „Ausrüstungsvarianten bei ETCS Level 3“. In: *Deine Bahn* 11 (2019), S. 26–32.
- [Kut21] M. Kuttig-Trölenberg, J. Schurig und R. Koch: „Die Zukunft mit ETCS Level 3 Hybrid“. In: *Signal + Draht* 113.7+8 (2021), S. 38–45.
- [Mar18] U. Marks-Fährmann, K. Restetzki, A. Biehounek und A. Hegger: *Grundwissen Bahn*. 9. Auflage. Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 2018. isbn: 3808523166.
- [Mar22] P. Marsch, R. Fritzsche, B. Holfeld und Kuo Fang-Chun: „5G für das digitalisierte Bahnsystem der Zukunft – ein Ausblick auf FRMCS“. In: *Signal + Draht* 114.3 (2022), S. 11–17.
- [Mas18] U. Maschek: *Sicherung des Schienenverkehrs*. 4. überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018. isbn: 978-3-658-22877-4. doi: [10.1007/978-3-658-22878-1](https://doi.org/10.1007/978-3-658-22878-1).
- [Mel20] T. Melzer: „Konzeption neuer Technologien für autonomes Fahren“. In: *Der Eisenbahningenieur* 2 (2020), S. 12–15.
- [Men20] D. Menzel, M. Sommer und J. Trinckauf: „Neue Sekundärbahn – innovative Fahrzeugbewegungssicherung“. In: *Signal + Draht* 112.11 (2020), S. 6–11.
- [Men21] D. Menne, M. Kopitzki, T. Nenke, P. Möller und W. Braun: „Das Betriebliche Zielbild als Basis für ein modernes und anwenderfreundliches Regelwerk“. In: *Deine Bahn* 10 (2021), S. 6–11.

- [Mey17a] M. Meyer zu Hörste: „Aspekte der Migration zur Voll-Automatisierung des Bahnbetrieb“. In: *Signal + Draht* 109.7+8 (2017), S. 29–33.
- [Mey17b] M. Meyer zu Hörste: „Vollautomatisches Fahren: Vom Baustein zum System“. In: *Deine Bahn* 10 (2017), S. 36–40.
- [Mis21] A. Mishra: *RCA Onboarding*. 2021. url: <https://public.3.basecamp.com/p/jGh4E3ZdE8T1RtoxbWLCYss> (besucht am 25.01.2022).
- [Mob21] Mobilität der Zukunft: „Europe’s Rail Joint Undertaking“ stellt europäische Bahnforschung auf neue Beine. 2021. url: <https://mobilitaetderzukunft.at/de/news/2020/shift2rail-geplante-fortfuehrung-in-der-transforming-europes-rail-system-partnerschaft.php> (besucht am 31.01.2022).
- [Mor20] A. Morast und N. Nießen: „Regelwerke und Gesetze in Bezug auf den fahrerlosen Betrieb“. In: *Deine Bahn* 10 (2020), S. 18–21.
- [Mor21] A. Morast und N. Nießen: „Herausforderungen des fahrerlosen Fahrens auf der Schiene“. In: *Making Connected Mobility Work*. Hrsg. von H. Proff. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021, S. 151–164. isbn: 978-3-658-32265-6. doi: [10.1007/978-3-658-32266-3\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-658-32266-3_8).
- [Müc21] T. Mücke und M. Krahl: „Erstes ETCS-Projekt bei einer NE“. In: *Signal + Draht* 113.7+8 (2021), S. 46–51.
- [Müh20] R. Mühlemann: „OCORA – Die europäische Initiative zur ETCS-Fahrzeugausrüstung der Zukunft“. In: *Signal + Draht* 112.9 (2020), S. 25–30.
- [Nau18] A. Naumann, B. Thomas-Friedrich, N. Brandenburger und J. Grippenkov: „Der Faktor Mensch im Kontext der Automatisierung des Bahnsystems“. In: *Der Eisenbahningenieur* 10 (2018), S. 50–53.
- [Nie17] N. Nießen, C. Schindler und D. Vallée: „Assistierter, automatischer oder autonomer Betrieb - Potentiale für den Schienenverkehr“. In: *Eisenbahntechnische Rundschau* 66.4 (2017), S. 32–37.
- [Nie19] N. Nießen: „Autonomes Fahren – technisch betrachtet“. In: *Tagungsband: Fachtagung Eisenbahnrecht und Technik*. Hrsg. von Eisenbahnbundesamt. 1. Fachtagung Eisenbahnrecht und Technik, Frankfurt am Main, 08.-09. April 2019. 2019. doi: [10.18154/RWTH-2020-01668](https://doi.org/10.18154/RWTH-2020-01668).
- [OCO21a] OCORA, Hrsg.: *Introduction to OCORA. Version 5.00, Release: R1*. 2021.
- [OCO21b] OCORA, Hrsg.: *System Architecture. Version: 2.01, Release: R1*. 2021.
- [Pac17] J. Pachl: „Betriebliche Randbedingungen für autonomes Fahren auf der Schiene“. In: *Deine Bahn* 9 (2017), S. 10–19.
- [Pac21a] J. Pachl: „Der Weg zu einer neuen Fahrdienstvorschrift für den digitalen Bahnbetrieb“. In: *Deine Bahn* 10 (2021), S. 12–18.
- [Pac21b] J. Pachl: *Glossar der Systemtechnik des Schienenverkehrs*. 2021. url: <http://joernpachl.de/glossar.htm> (besucht am 28.01.2022).

- [Pac21c] J. Pachl: *Systemtechnik des Schienenverkehrs*. 10., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021. isbn: 978-3-658-31164-3. doi: [10.1007/978-3-658-31165-0](https://doi.org/10.1007/978-3-658-31165-0).
- [Rah11] K. Rahn: „Green Mobility – Effiziente Zugbeeinflussung mit CBTC-Systemen“. In: *Signal + Draht* 103.10 (2011), S. 26–29.
- [Rai19] RailTech: *SNCF tests its first autonomous train*. 2019. url: <https://www.railtech.com/digitalisation/2019/07/12/sncf-tests-its-first-autonomous-train/?gclid=...> (besucht am 10.03.2022).
- [RCA21a] RCA, Hrsg.: *RCA Architecture Poster. Preliminary issue, Version: 0.3 (0.A)*. 2021.
- [RCA21b] RCA, Hrsg.: *RCA System Architecture. Preliminary issue, Version 0.3 (0.A)*. 2021.
- [Rij17] T. van Rijn und C. Söffker: „ETCS für Herausforderungen und Chancen angesichts wachsender Städte“. In: *Signal + Draht* 109.6 (2017), S. 12–17.
- [Rod19] R. Rodrigues, R. Mueller und M. Moritz: „Lösungen für autonomes Fahren im Rahmen von Shift2Rail“. In: *Signal + Draht* 111.6 (2019), S. 17–21.
- [Rum10] A. Rumsey: „Semi-automatic, driverless and unattended operation of trains“. In: *Signal + Draht* 102.3 (2010), S. 43–46.
- [S2R18] S2R, Hrsg.: *ATO over ETCS – System Requirements Specification. SUBSET-125, Version 0.1.0*. 2018.
- [S2R22a] S2R: *Digital Automatic Coupling (DAC) – the backbone for full digital rail freight train operations in Europe*. 2022. url: <https://shift2rail.org/news/digital-automatic-coupling-dac-the-backbone-for-full-digital-rail-freight-train-operations-in-europe/> (besucht am 08.03.2022).
- [S2R22b] S2R: *X2Rail-4*. 2022. url: [https://projects.shift2rail.org/s2r\\_ip2\\_n.aspx?p=x2rail-4](https://projects.shift2rail.org/s2r_ip2_n.aspx?p=x2rail-4) (besucht am 11.03.2022).
- [Sch18a] M. Scheidt, L. Pelster, G. Bosse und J. Pachl: *Prozesslandschaft Bahnbetrieb*. Braunschweig, 2018. doi: [10.24355/dbbs.084-201901211619-0](https://doi.org/10.24355/dbbs.084-201901211619-0). url: [https://publikationsserver.tu-braunschweig.de/receive/dbbs\\_mods\\_00066203](https://publikationsserver.tu-braunschweig.de/receive/dbbs_mods_00066203).
- [Sch18b] S. Schmidt und D. Grabowski: „Das „ETCS-Stellwerk““. In: *Signal + Draht* 110.10 (2018), S. 29–39.
- [Sch18c] L. Schnieder: „Hochautomatisierte Systeme im Nahverkehr und ihre Inbetriebnahme“. In: *Eisenbahntechnische Rundschau* 67.4 (2018), S. 21–24.
- [Sch19a] S. Schmidt: „APS – Advanced Protection System, die günstige Einführung von ETCS Level 2/3“. In: *Signal + Draht* 111.10 (2019), S. 22–31.
- [Sch19b] L. Schnieder: „Zugbeeinflussungssysteme für Stadtbahnen im Vergleich“. In: *Der Eisenbahningenieur* 70.12 (2019), S. 31–34.
- [Sch20a] C. Schindler: „Schienenverkehrstechnik 4.0“. In: *Handbuch Industrie 4.0: Recht, Technik, Gesellschaft*. Hrsg. von W. Frenz. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2020, S. 719–757. isbn: 978-3-662-58473-6. doi: [10.1007/978-3-662-58474-3-38](https://doi.org/10.1007/978-3-662-58474-3-38).

- [Sch20b] L. Schnieder: „Funktionsallokation in funkbasierten Zugbeeinflussungssystemen – ein Vergleich“. In: *Eisenbahntechnische Rundschau* 69.11 (2020), S. 16–19.
- [Sch21a] E. Schnieder: „Erfolgreicher Schienenverkehr durch Innovationen der Sicherungstechnik“. In: *Signal + Draht* 113.3 (2021), S. 29–35.
- [Sch21b] L. Schnieder: *Communications-Based Train Control (CBTC)*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021. isbn: 978-3-662-62875-1. doi: [10.1007/978-3-662-62876-8](https://doi.org/10.1007/978-3-662-62876-8).
- [Sch21c] L. Schnieder: *European Train Control System (ETCS)*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021. isbn: 978-3-662-62877-5. doi: [10.1007/978-3-662-62878-2](https://doi.org/10.1007/978-3-662-62878-2).
- [Sch21d] J. Schröder, C. Goncalves Alpoim, B. Dickgießer und V. Knollmann: „Digitale S-Bahn Hamburg – Erstmalige Realisierung von „ATO over ETCS“ in Deutschland“. In: *Signal + Draht* 113.7+8 (2021), S. 52–59.
- [Sch21e] J. Schröder, C. Goncalves Alpoim, B. Dickgießer und M. Talg: „Digitale S-Bahn Hamburg“. In: *Der Eisenbahningenieur* 10 (2021), S. 44–47.
- [Sie14] Siemens AG, Hrsg.: *Marmaray project. Crossing the Bosphorus with cutting-edge-technology*. 2014. url: [https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:10c60b41ccf000bd7afd069870bd97ecf8af3870/sic\\_00019524.pdf](https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:10c60b41ccf000bd7afd069870bd97ecf8af3870/sic_00019524.pdf) (besucht am 17.01.2022).
- [Ste13] A. Steingröver und K. Rahn: „Compatibility between CBTC and ETCS“. In: *Signal + Draht* 105.1+2 (2013), S. 29–33.
- [Suw21] I. Suwalski und H. Wünsche: „ATO over ETCS als Schlüssel für mehr Effizienz, Kapazität und Nachhaltigkeit – Erfahrungen und Strategien aus der Praxis“. In: *Signal + Draht* 113.9 (2021), S. 13–24.
- [Tas18] G. Tasler und V. Knollmann: „Einführung des hochautomatisierten Fahrens – auf dem Weg zum vollautomatischen Bahnbetrieb“. In: *Signal + Draht* 110.6 (2018), S. 6–14.
- [Tre21] R. Treydel und F. Schiffmann: „Digitalisierung Bahnsystem – im Kontext der europäischen Standardisierung“. In: *Sicherungstechnische Fachtagung 2021. Sicherungstechnische Fachtagung: „Projektrealisierung zwischen Kapital und Kapazität“*, 30.09.2021 - 01.10.2021, Dresden. 2021.
- [Tri19] J. Trinckauf: „Digitalisierung im Bahnsystem“. In: *Deine Bahn* 11 (2019), S. 6–9.
- [Tri20a] J. Trinckauf, J. Buder und D. Menzel: „Moderne Zugsicherung – Anforderungen und Grenzen“. In: *Signal + Draht* 112.1+2 (2020), S. 14–23.
- [Tri20b] J. Trinckauf, U. Maschek, R. Kahl und C. Krahl, Hrsg.: *ETCS in Deutschland*. 1. Auflage. Leverkusen: PMC, 2020. isbn: 978-3-96245-219-3.
- [TRS14] TRStrab FoF: *Technische Regeln für Straßenbahnen – Fahrbetrieb ohne Fahrzeugführer (Ausgabe vom 15. Januar 1997 in der Fassung vom 18. August 2014)*. 2014.

- 
- [Ver19] Verband der Bahnindustrie in Deutschland e.V.: *Die Zukunft der Schiene soll rasch beginnen. Umfassender Konzeptvorschlag: Industriebeitrag für industrielles Rollout DSTW/ETCS*. 2019. url: [https://bahnindustrie.info/fileadmin/VDB-Positionspapiere/VDB\\_Rollout\\_ETCS\\_Langfassung.pdf](https://bahnindustrie.info/fileadmin/VDB-Positionspapiere/VDB_Rollout_ETCS_Langfassung.pdf) (besucht am 04.01.2022).
- [Vet21] H.-P. Vetsch, A. Schweizer, A. Egloff und M. Schindelholz: „Automatisierter Fahrbetrieb auf konventionellen Eisenbahnstrecken“. In: *Signal + Draht* 113.3 (2021), S. 22–28.
- [Wei20] K. Weiland und A. Hundertmark: „Mit dem digitalen Bahnbetrieb in die Zukunft der Eisenbahn“. In: *Deine Bahn* 9 (2020), S. 14–18.
- [Wic20] A. Wickmann: „Systematisierung und Möglichkeiten des automatischen Zugbetriebs“. In: *Eisenbahntechnische Rundschau* 9 (2020), S. 16–19.
- [Zsc20] F. Zschoche: *Automatisierter Bahnbetrieb. Eine system-ökonomische Betrachtung von Anwendungsfällen im Vollbahn-Bereich*. 2020. url: [https://civity.de/asset/de/sites/3/2020/11/civity-Management-Consultants\\_DLR\\_Automatisierter-Betrieb\\_Nutzen-und-Kosten-im-Vollbahn-Bereich.pdf](https://civity.de/asset/de/sites/3/2020/11/civity-Management-Consultants_DLR_Automatisierter-Betrieb_Nutzen-und-Kosten-im-Vollbahn-Bereich.pdf) (besucht am 24.02.2022).

### **Selbstständigkeitserklärung**

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit mit dem Titel *Auswirkungen des voll-automatischen Bahnbetriebs auf ETCS und weitere Umsysteme* selbstständig und ohne unzulässige Hilfe Dritter verfasst habe. Es wurden keine anderen als die in der Arbeit angegebenen Hilfsmittel und Quellen benutzt. Die wörtlichen und sinngemäß übernommenen Zitate habe ich als solche kenntlich gemacht. Es waren keine weiteren Personen an der geistigen Herstellung der vorliegenden Arbeit beteiligt. Mir ist bekannt, dass die Nichteinhaltung dieser Erklärung zum nachträglichen Entzug des Hochschulabschlusses führen kann.

Dresden, 1. Juni 2022

Fabian Gaebler

# Anhang

# Verzeichnis der Anhänge

<b>A</b>	<b>Verzeichnis digitaler Anlagen</b>	<b>99</b>
<b>B</b>	<b>Glossar</b>	<b>100</b>
B.1	Relevante Grundbegriffe der Systemtechnik des Schienenverkehrs . . . . .	100
B.2	Grundbegriffe der Systemarchitektur automatischer (Nahverkehrs-)Bahnen .	101
<b>C</b>	<b>Zusatzmaterial</b>	<b>102</b>
C.1	Mögliche Struktur einer neuen Fahrdienstvorschrift . . . . .	102
C.2	EULYNX-Systemübersicht . . . . .	104
C.3	Prozesslandschaft Bahnbetrieb . . . . .	105
C.4	Flowchart der Prozedur Start of Mission . . . . .	106
C.5	Anmerkungen zum Bahnsteigsicherungssystem . . . . .	107

# A Verzeichnis digitaler Anlagen

Diplomarbeit\_print.pdf Eingereichte, druckerfreundliche Version der Diplomarbeit  
Diplomarbeit.pdf Digitale Version dieser Diplomarbeit

# B Glossar

## B.1 Relevante Grundbegriffe der Systemtechnik des Schienenverkehrs

Quelle/Basis der Definitionen: [Pac21b]

**Bahnhof** Bahnhöfe sind Bahnanlagen mit mindestens einer Weiche, wo Züge beginnen, enden, ausweichen oder wenden dürfen. Als Grenze zwischen den Bahnhöfen und der freien Strecke gelten im Allgemeinen die Einfahrsignale oder Trapeztafeln, sonst die Einfahrweichen. Bahnhöfe können in mehrere Bahnhofsteile unterteilt sein.

**Einteilung der Gleise** Hauptgleise sind Gleise, die planmäßig von Zügen befahren werden dürfen. Hauptgleise müssen dazu mit den für Zugfahrten vorgeschriebenen Sicherungsanlagen ausgerüstet sein. Die Hauptgleise außerhalb von Bahnhöfen werden als „freie Strecke“ bezeichnet. Durchgehende Hauptgleise sind Hauptgleise der freien Strecke und ihre Fortsetzung in den Bahnhöfen. Alle anderen Gleise sind Nebengleise.

**Freie Strecke** Durchgehende Hauptgleise außerhalb von Bahnhöfen.

**Gegengleis** Streckengleis einer zweigleisigen Strecke, das entgegen der gewöhnlichen Fahrtrichtung befahren wird.

**Leistungsfähigkeit** Maximal möglicher Durchsatz einer Betriebsanlage bei einer bestimmten Struktur des Betriebsprogramms.

**Rangierfahrten** Fahrten mit Eisenbahnfahrzeugen unter vereinfachten Bedingungen innerhalb von Bahnhöfen und Anschlussstellen zum Bilden und Zerlegen von Zügen, Umsetzen von Fahrzeugen, Bedienen von Ladestellen und ähnlichen Zwecken. Rangierfahrten werden auf Sicht mit stark reduzierter Geschwindigkeit durchgeführt.

**Regelgleis** Streckengleis einer zweigleisigen Strecke, das entsprechend der gewöhnlichen Fahrtrichtung befahren wird.

**Zugfahrt** Auf die freie Strecke übergehende oder innerhalb eines Bahnhofs mit Fahrplan verkehrende, aus Regelfahrzeugen bestehende, durch Maschinenkraft bewegte Einheiten oder einzeln fahrende Triebfahrzeuge. Geeignete Nebenfahrzeuge dürfen wie Züge behandelt oder in Züge eingestellt werden. Für Züge gilt die im Fahrplan festgelegte zulässige Geschwindigkeit.

## B.2 Grundbegriffe der Systemarchitektur automatischer (Nahverkehrs-)Bahnen

Die Begriffe sind aus dem Englischen auf Basis von [IEE04] übersetzt.

**Automatic Train Control (ATC)** System zur automatischen Steuerung der Zugbewegung, zur Gewährleistung der Zugsicherheit und zur Lenkung des Bahnbetriebs. ATC muss ATP enthalten und kann ATO und/oder ATS beinhalten.

**Automatic Train Operation (ATO)** Das Teilsystem innerhalb des ATC-Systems, das eine oder alle Funktionen der Geschwindigkeitsregelung, des programmierten Anhaltens, der Türsteuerung, der Leistungsregelung oder andere Funktionen, die sonst dem Fahrer zugewiesen sind, ausführt.

**Automatic Train Protection (ATP)** Das Teilsystem innerhalb des ATC-Systems, das durch eine Kombination aus Zugortung, Abstandshaltung und Fahrwegsicherung einen ausfallsicheren Schutz vor Kollisionen, überhöhter Geschwindigkeit und anderen gefährlichen Bedingungen gewährleistet.

**Automatic Train Supervision (ATS)** Das Teilsystem innerhalb des ATC-Systems, das die Züge überwacht, zur Fahrplaneinhaltung die Leistung einzelner Züge anpasst und Daten zur Anpassung des Dienstes liefert, um durch Unregelmäßigkeiten verursachte Unannehmlichkeiten zu minimieren.

# C Zusatzmaterial

## C.1 Mögliche Struktur einer neuen Fahrdienstvorschrift

Der hier beschriebene Vorschlag für die Struktur einer neuen Fahrdienstvorschrift für den digitalen Bahnbetrieb (GoA 1) wurde von Pahl in [Pac21a] veröffentlicht:

1. Definition grundlegender Begriffe
2. Durchführung der Fahrten
  - 2.1 Fahrt in der Betriebsart FS
    - 2.1.1 Anwendung
    - 2.1.2 Durchführen einer Fahrt
    - 2.1.3 Übergang in andere Betriebsarten
  - 2.2 Fahrt in der Betriebsart OS
    - 2.2.1 Anwendung
    - 2.2.2 Durchführen einer Fahrt
    - 2.2.3 Übergang in andere Betriebsarten
  - 2.3 Fahrt in der Betriebsart SR
    - 2.3.1 Anwendung
    - 2.3.2 Durchführen einer Fahrt
    - 2.3.3 Übergang in andere Betriebsarten
  - 2.4 Fahrt in der Betriebsart SH
    - 2.4.1 Anwendung
    - 2.4.2 Durchführen einer Fahrt
    - 2.4.3 Übergang in andere Betriebsarten
3. Rangieren
  - 3.1 Verständigung
  - 3.2 Abstellen von Fahrzeugen
  - 3.3 Bedienen von Ladestellen und Gleisanschlüssen
4. Betriebliche Besonderheiten
  - 4.1 Gleisperrungen

- 4.2 Außergewöhnliche Fahrten
- 4.3 Fahrten mit Kleinwagen
- 5. Störfallprozesse
  - 5.1 Abklären der Betriebslage
  - 5.2 Ersatzweise Sichern der Fahrt
  - 5.3 Ersatzweise Zulassen der Fahrt
  - 5.4 Ersatzweises Grundstellen von Sicherungsanlagen
- 6. Prozesse an Schnittstellen
  - 6.1 Schnittstellen innerhalb des digitalen Netzes
  - 6.2 Schnittstellen zum konventionellen Netz



### C.3 Prozesslandschaft Bahnbetrieb

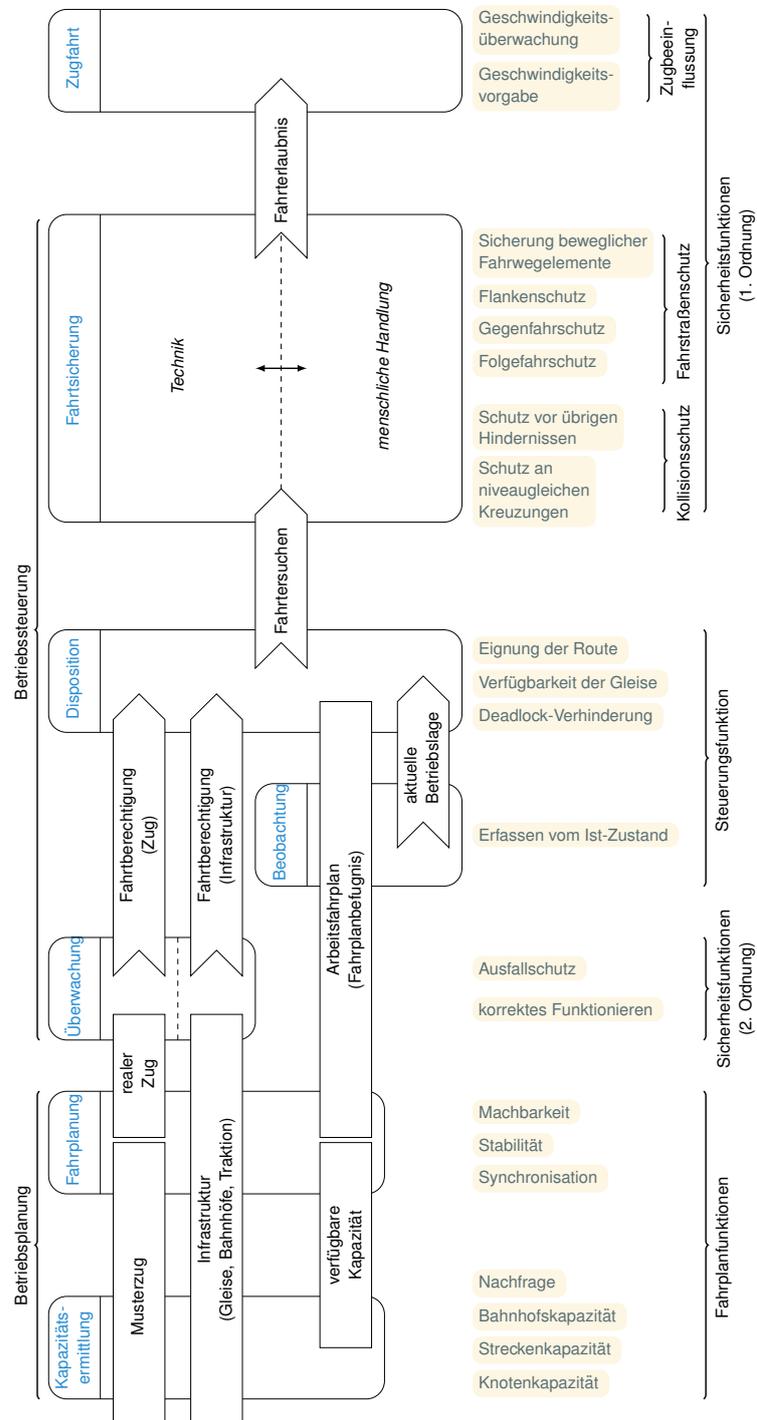


Abbildung C.2: Prozesslandschaft Bahnbetrieb [Sch18a].

## C.4 Flowchart der Prozedur Start of Mission

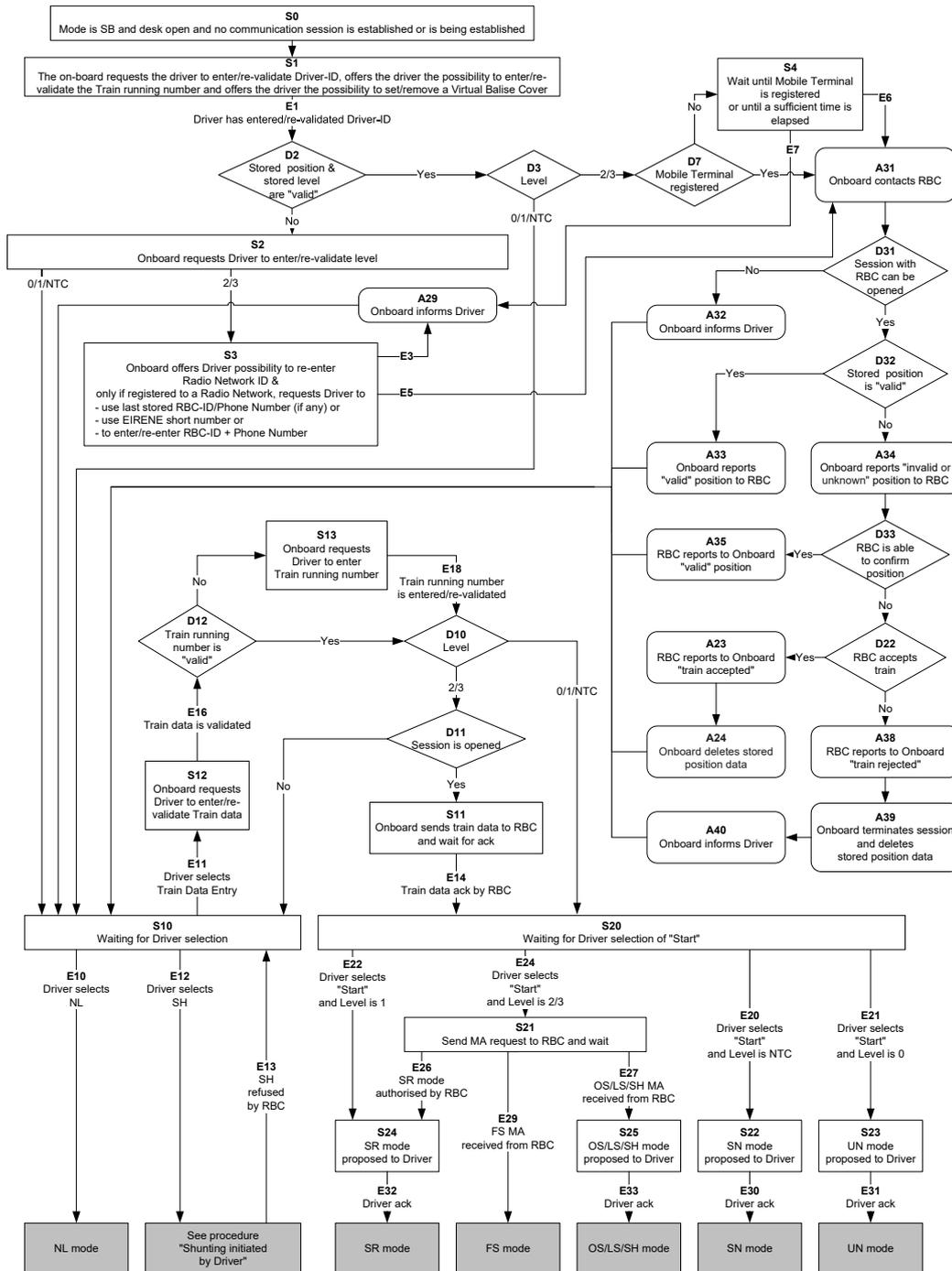


Abbildung C.3: Flowchart der Prozedur Start of Mission [ERA16].

## C.5 Anmerkungen zum Bahnsteigsicherungssystem

Das in [Abschnitt 3.3](#) eingeführte Bahnsteigsicherungssystem (BSS) kann in Abhängigkeit vom Einsatzgebiet der entsprechenden Verkehrsarten und Marktsegmente<sup>1</sup> verschiedene Ausprägungen annehmen. Grundsätzlich sind u. a. folgende Möglichkeiten denkbar, wenn ein Bahnsteig vorhanden ist:

1. Festinstallierte Reisendensicherungsanlagen, wie z. B. Gitter
2. Video- oder Laserüberwachung der Bahnsteigkante, des Gefahrenbereichs oder des gesamten Bahnsteiges
3. Bahnsteigtüren (Platform Screen Doors, PSD)
4. Wire-style Platform Gates (WSPG), wie z. B. in [\[Kim15\]](#) beschrieben. Ein Beispiel zeigt [Abbildung C.4](#).

Die verschiedenen Ausprägungen besitzen spezifische Vor- und Nachteile. Es können weitere funktionale Anforderungen, wie Kommunikationsschnittstellen, entstehen. In Abhängigkeit des jeweiligen Systemaufbaus können weitere nicht-funktionale Anforderungen entstehen, wie beispielsweise an die Haltegenauigkeit oder die Türanordnung der Fahrzeuge.



**Abbildung C.4:** Seitenansicht der WSPG (links geöffnet, rechts geschlossen) [\[Kim15\]](#).

---

<sup>1</sup> siehe [Abbildung 2.1](#).