Projektierung von ETCS Level 1 Full Supervision am Beispiel Deutschland

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Christopher Wink

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Nils Nießen
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Lars Schnieder

Tag der mündlichen Prüfung: 10. August 2026

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis III

Kurzfassung VII

Summary VIII

1 Einleitung 1
- 1.1 Motivation . . . 1
- 1.2 Fragestellung . . . 1
- 1.3 Struktur der Arbeit . . . 2

2 Grundlagen 4
- 2.1 Aufgaben und Entwicklung von Zugbeeinflussungssystemen . . . 4
- 2.2 Rechtlicher Rahmen . . . 5
- 2.3 European Rail Traffic Management System . . . 13
- 2.4 Betriebliches Regelwerk . . . 20
- 2.5 Technisches Regelwerk . . . 21

3 Stand der Technik und Forschung 23
- 3.1 Systembeschreibung ETCS . . . 23
- 3.2 Betriebsverfahren . . . 37
- 3.3 Stand der Forschung . . . 38
- 3.4 Untersuchungsgegenstand . . . 49

4 Infrastrukturausrüstung 50
- 4.1 Ausrüstungs- und Technikvarianten . . . 50
- 4.2 Signalisierung . . . 52
- 4.3 Balisengruppen . . . 54
- 4.4 Optimierung der Infill-Balisengruppen . . . 70
- 4.5 Bahnübergänge . . . 85
- 4.6 Transitionen . . . 94

5 Projektierung der Balisentelegramme 98
- 5.1 Grundsätze . . . 98
- 5.2 Übertragbare Datenmengen . . . 99
- 5.3 Zuordnung der Pakete . . . 100
- 5.4 Fahrbarkeit . . . 102

6 Betrieb 106
- 6.1 Regelbetrieb . . . 106
- 6.2 Rückfallebene . . . 112

7 Kapazitätswirkung 115
- 7.1 Grundlagen . . . 115
- 7.2 Vergleich von ETCS mit Bestandssystemen . . . 117
- 7.3 Kreuzungsbahnhof einer eingleisigen Regionalstrecke . . . 117

7.4 Zweigleisige Mischverkehrsstrecke 124

8 Automatisierter Betrieb **134**
8.1 Grundlagen 134
8.2 Infrastrukturausrüstung und Projektierung 135
8.3 Auswirkungen auf das Gesamtsystem 136
8.4 Auswirkungen auf die Kapazität 137

9 Weiterer Forschungsbedarf **138**

10 Zusammenfassung und Ausblick **140**

Abbildungsverzeichnis **142**

Tabellenverzeichnis **144**

Bibliografie **146**

Datenverfügbarkeit **170**

Anhang **171**

A Im Level 1 mögliche ETCS-Betriebsarten **172**

B Referenzierte ETCS-Pakete **175**

C Anhang zu Abschnitt 4.2 **177**

D Anhang zu Abschnitt 4.4 **179**

E Anhang zu Abschnitt 7.3 **180**

F Anhang zu Abschnitt 7.4 **182**

Abkürzungsverzeichnis

AD	Betriebsart Automated Driving (*Automatisches Fahren*)
AEG	Allgemeines Eisenbahngesetz (Deutschland)
AFB	Automatische Fahr- und Bremssteuerung
Anst	Anschlussstelle
AsBo	Assessment Body (*Unabhängige Bewertungsstelle*)
ATO	Automatic Train Operation (*Automatische Zugsteuerung*)
Awanst	Ausweichanschlussstelle
BAV	Bundesamt für Verkehr (Schweiz)
BG	Balisengruppe
BIU	Brake Interface Unit (*Bremswirkgruppe*)
BMV	Bundesministerium für Verkehr
BTM	Balise Transmission Module (*Balisenübertragungsmodul*)
BÜ	Bahnübergang
BÜSA	Bahnübergangssicherungsanlage
BÜV-NE	Vorschrift für die Sicherung der Bahnübergänge bei nichtbundeseigenen Eisenbahnen (Deutschland)
CENELEC	Comité Européen de Normalisation Électrotechnique (*Europäisches Komitee für elektrotechnische Normung*)
CFL	Société Nationale des Chemins de Fer Luxembourgeois (*Nationale Gesellschaft der Luxemburgischen Eisenbahnen*)
CMD	Cold Movement Detection (*Erkennung von Fahrzeugbewegungen in Betriebsart NP*)
CSM	Ceiling Speed Monitoring (*Überwachung der Höchstgeschwindigkeit*)
CSM	Common Safety Method (*Gemeinsame Sicherheitsmethode*)
CTMS	Capacity & Traffic Management System (*Kapazitäts- und Verkehrsmanagementsystem*)
DAK	Digitale Automatische Kupplung
DB	Deutsche Bahn
DeBo	Designated Body (*Bestimmte Stelle*)
DGS	Güterzug externer EVU
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DKS	Digitaler Knoten Stuttgart
DMI	Driver Machine Interface (*Schnittstelle Triebfahrzeugführer-Maschine*)
DP	Danger Point (*Gefahrpunkt (-abstand)*)
DPN-D	Nahverkehrszug Dritter mit Doppelstockwagen
DSD	Digitale Schiene Deutschland
DSTW	Digitales Stellwerk
DTO	Driverless Train Operation (*Begleiteter fahrerloser Zugbetrieb*)
DV	Dienstvorschrift (der ehemaligen Deutschen Reichsbahn)
DZSF	Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung
EB	Emergency Brake (*Schnellbremsung*)
EBA	Eisenbahn-Bundesamt (Deutschland)
EBD	Emergency Brake Deceleration curve (*Schnellbrems-Ablaufkurve*)
EBG	Eisenbahngesetz (Schweiz)
EBI	Emergency Brake Intervention supervision limit (*Schnellbrems-Einsatzkurve*)
EBO	Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (Deutschland)
EBV	Verordnung über Bau und Betrieb der Eisenbahnen (Eisenbahnverordnung, Schweiz)
EBWU	Eisenbahnbetriebswissenschaftliche Untersuchung
EdB	Eisenbahnen des Bundes

EG	Europäische Gemeinschaft
EIGV	Eisenbahn-Inbetriebnahmegenehmigungsverordnung (Deutschland)
EisbBBV	Eisenbahnbau- und -betriebsverordnung (Österreich)
EisbG	Eisenbahngesetz (Österreich)
EisbVO	Eisenbahnverordnung (Österreich)
EIU	Eisenbahninfrastrukturunternehmen
EN	Europäische Norm
EOA	End of Authority (*Ende der Fahrterlaubnis mit* $v = 0\,\mathrm{km/h}$)
EPSV	Eisenbahn-Prüfsachverständigenverordnung (*Deutschland*)
ERA	European Union Agency for Railways (*Eisenbahnagentur der Europäischen Union*)
ERTMS	European Rail Traffic Management System (*Europäisches Eisenbahnverkehrsleitsystem*)
ESO	Eisenbahn-Signalordnung (Deutschland)
ESG	ETCS Signalgeführt
ESTW	Elektronisches Stellwerk
ETCS	European Train Control System (*Europäisches Zugbeeinflussungssystem*)
EU	Europäische Union
EUG	ERTMS Users Group (*Vereinigung europäischer EIU*)
EVC	European Vital Computer (*sicherer Rechnerkern des ETCS-Fahrzeuggerätes*)
EVU	Eisenbahnverkehrsunternehmen
EZK	Einzelwagenzug Nahbereich
FBS	Fahrplanbearbeitungssystem
Fdl	Fahrdienstleiter
FFFIS	Form Fit Function Interface Specification (*Eindeutige Schnittstellenbeschreibung in Form, Passung und Funktion*)
FIS	Functional Interface Specification (*Funktionale Schnittstellenbeschreibung*)
FLOI	First Line of Intervention (*Interventionskurve*)
FRMCS	Future Railway Mobile Communication System
FS	Betriebsart Full Supervision (*Vollüberwachung*)
FSK	Frequency shift keying (*Frequenzumtastung*)
FSÜ	Fahrstraßenüberwachung
FV	Fernverkehr
GIuV	Genehmigung zum Inverkehrbringen und Verwenden
GoA	Grade of Automation (*Automatisierungsgrad*)
GP	Gradient Profile (*Gradientenprofil*)
GPA	Geschwindigkeitsprüfabschnitt
GPS	Global Positioning System (*Globales Positionsbestimmungssystem*)
GM	Gleismagnet
GNSS	Global Navigation Satellite System (*globales Navigationssatellitensystem*)
GSM-R	Global System for Mobile Communications – Railways (*Globales Mobilfunk-System für Eisenbahnen*)
GV	Güterverkehr
HTD	Hybrid Train Detection (*Hybride Gleisfreimeldung*)
HL	Hauptluftleitung
ICE-W	InterCity-Express mit Wirbelstrombremse
IEC	International Electrotechnical Commission (*Internationale Elektrotechnische Kommission*)
IETF	Internet Engineering Task Force (*Internettechnik-Arbeitsgruppe*)
INA	Induktive Sicherung anfahrender Züge
IP	Indication Point (*Bremseinsatzpunkt*)
IS	Betriebsart Isolation (*Isoliert*)
ISO	International Organization for Standardization (*Internationale Organisation für Normung*)
JRU	Juridical Recording Unit (*Fahrtenschreiber*)
JSON	JavaScript Object Notation
KPI	Key Performance Indicator (*Wichtiger Leistungsindikator*)

LEA Landeseisenbahnaufsicht
LEU Line side Electronic Unit (*Streckenseitige elektronische Einheit*)
LINT Leichter innovativer Nahverkehrstriebwagen
LOA Limit of Authority (*Ende der Fahrterlaubnis mit* $v > 0\,\mathrm{km/h}$)
LRBC Limited Radio Block Centre (*vereinfachte ETCS-Zentrale*)
LS Betriebsart Limited Supervision (*Teilüberwachung*)
LST Leit- und Sicherungstechnik
LTE Long Term Evolution (*Mobilfunkstandard der vierten Generation*)
LTM Loop Transmission Module (*Loopübertragungsmodul*)
LUKS Leistungs-Untersuchungen für Knoten und Strecken
LZB Linienförmige Zugbeeinflussung
MA Movement Authority (*ETCS-Fahrterlaubnis*)
Mg Magnetschienenbremse
MRSP Most Restrictive Speed Profile (*Restriktivstes Geschwindigkeitsprofil*)
NBÜ Notbremsüberbrückung
NE nichtbundeseigene Eisenbahn
NL Betriebsart Non Leading (*Nicht führend*)
NNTR National notified technical rules (*Nationale, notifizierte technische Vorschriften – NNTV*)
NoBo Notified Body (*Benannte Stelle*)
NP Betriebsart No Power (*Ausgeschaltet*)
NTC National Train Control (*Nationale Zugbeeinflussung*)
NTO Non-Automated Train Operation (*Manueller Zugbetrieb mit Zugbeeinflussung*)
NV National Value (*Nationaler Wert*)
OB On-board (*fahrzeugseitig*)
OBU On-board Unit (*Fahrzeuggerät*)
OL Overlap (*Durchrutschweg*)
OS Betriebsart On Sight (*Fahren auf Sicht*)
oS ohne Signale
ÖBB Österreichische Bundesbahnen
PBD Permitted Braking Distance (*Zulässiger Bremsweg*)
PS Betriebsart Passive Shunting (*Rangieren beibehalten*)
PSV Prüfsachverständiger
PT Betriebsart Post Trip (*Zwangsbremsung aufgehoben*)
PT1 Planteil 1
PV Personenverkehr
PZB Punktförmige Zugbeeinflussung
RAMS Reliability, Availability, Maintainability, Safety (*Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit, Sicherheit*)
RB Regionalbahn
RBC Radio Block Centre (*ETCS-Zentrale*)
RFC Requests for Comments (*Reihe technischer und organisatorischer Dokumente zum Internet*)
Ril Richtlinie
RTO Remote Train Operation (*Fernsteuerung von Zügen*)
RIU Radio Infill Unit (*GSM-R-Funkzelle mit kurzer Reichweite*)
RMR Railway Mobile Radio (*Digitale Zugfunksysteme im ERTMS*)
RS Release Speed (*Freigabegeschwindigkeit*)
RSM Release Speed Monitoring (*Überwachung der Freigabegeschwindigkeit*)
RÜ Reisendenüberweg
RV Betriebsart Reversing (*Rückwärtsfahrt*)
SB Service Brake (*Vollbremsung*)
SB Betriebsart Stand By (*Bereitschaft*)
SBB Schweizerische Bundesbahnen AG
SBD Service Brake Deceleration curve (*Vollbrems-Ablaufkurve*)
SBI Service Brake Intervention supervision limit (*Vollbrems-Einsatzkurve*)
SF Betriebsart System Failure (*Systemfehler*)

SGV Schienengüterverkehr
SH Betriebsart Shunting (*Rangieren*)
SIL Safety Integrity Level (*Sicherheits-Integritätslevel*)
SL Betriebsart Sleeping (*Ferngesteuert*)
SM Betriebsart Supervised Manoeuvre (*Anzeigegeführtes Rangieren*)
SN Betriebsart National System (*Nationales System*)
SNCF Société Nationale des Chemins de Fer Français (*Nationale Gesellschaft der französischen Eisenbahnen*)
SOB Schweizerische Südostbahn AG
SPNV Schienenpersonennahverkehr
SR Betriebsart Staff Responsible (*Personalverantwortung*)
SRS System Requirements Specifications (*Systemanforderungsspezifikationen*)
SSP Static Speed Profile (*Statisches Geschwindigkeitsprofil*)
STE Signal-, Telekommunikations- und Elektrotechnik
STM Specific Transmission Module (*Spezifisches Übertragungsmodul*)
STO Semi-Automated Train Operation (*halbautomatischer Zugbetrieb mit Fahrer*)
SV Systemversion
SvL Supervised Location (*überwachter Ort*)
SZB Signalisierter Zugleitbetrieb
TEIV Transeuropäische-Eisenbahn-Interoperabilitätsverordnung
TEN Transeuropäische Netze
Tf Triebfahrzeugführende:r
Tfz Triebfahrzeug
TIMS Train Integrity Monitoring System (*System zur Überwachung der Zugintegrität*)
TIU Train Interface Unit (*Schnittstelle zwischen dem Fahrzeug und der ETCS-OBU*)
TMS Traffic Management System (*Verkehrsmanagementsystem*)
TR Betriebsart Trip (*Zwangsbremsung bis zum Stillstand*)
TS Trackside (*streckenseitig*)
TSI Technische Spezifikationen für Interoperabilität
TSM Target Speed Monitoring (*Überwachung der Zielgeschwindigkeit*)
TSR Temporary Speed Restriction (*vorübergehende Langsamfahrstelle*)
TuZ Technisch unterstützter Zugleitbetrieb
UIC Union Internationale de Chemins de Fer (*Internationaler Eisenbahnverband*)
UN Betriebsart Unfitted (*ohne Zugbeeinflussung*)
UTO Unattended Train Operation (*Vollautomatischer fahrerloser Zugbetrieb*)
ÜS Überwachungssignal
ÜSW Überwachungssignalwiederholer
ÜSoE Überwachungssignal mit optimierter Einschaltstrecke
VBC Virtual Balise Cover (*Virtuelle Balisenabdeckung*)
VDV Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V.
VV Verwaltungsvorschrift
Wb Wirbelstrombremse
Ww Weichenwärter
ZLB Zugleitbetrieb
ZNA Zugnummernmeldeanlage

Kurzfassung

Die Schaffung eines einheitlichen europäischen Eisenbahnraumes erfordert die technische und betriebliche Interoperabilität über die Grenzen von Infrastrukturbetreibern hinweg. Insbesondere im Bereich der Zugbeeinflussung haben sich in der Vergangenheit unterschiedliche nationale Systeme entwickelt, die zueinander inkompatibel sind und den grenzüberschreitenden Eisenbahnverkehr erschweren. Mit dem European Train Control System (ETCS) wurde daher ein einheitlicher technischer Standard etabliert, der bestehende Inkompatibilitäten zwischen Infrastruktur- und Fahrzeugausrüstung überwinden soll.

ETCS kann in unterschiedlichen Ausprägungen eingesetzt werden. Der derzeitige Fokus von Industrie und Wissenschaft liegt auf hoch ausgelasteten Strecken und Knoten der Transeuropäischen Netze, auf denen der funkbasierte ETCS-Level 2 zur Anwendung kommt. Parallel existieren jedoch auch zahlreiche Infrastrukturen mit geringeren Leistungsanforderungen. Diese Strecken und Bahnhöfe sind ebenso wesentlicher Bestandteil des europäischen Eisenbahnraumes, da sie im Güter- und im Personenverkehr die Erschließung der Fläche sicherstellen. Um neue technische Systemgrenzen zu vermeiden, bietet sich hier die Ausrüstung mit ETCS Level 1 an, bei dem keine Funkverbindung zwischen Infrastruktur und Fahrzeug benötigt wird. Dadurch ist die Systemarchitektur weniger komplex, dennoch weist ETCS Level 1 in der Ausprägung Full Supervision (FS) funktional große Parallelen zum Level 2 auf und bietet Triebfahrzeugführenden eine vergleichbare Arbeitsumgebung.

Während für ETCS Level 2 umfangreiche Untersuchungen vorliegen, existieren für den Betrieb mit ETCS Level 1 FS bislang keine durchgängigen Betrachtungen. An dieser Forschungslücke setzt die vorliegende Arbeit an.

Auf der Grundlage der Systemeigenschaften von ETCS Level 1 FS werden zunächst typische Anwendungsfälle identifiziert. Für diese werden Konzepte zur Infrastrukturausrüstung sowie zur Projektierung der streckenseitigen Komponenten entwickelt. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der optimierten Positionierung von Infill-Balisengruppen. Die Entwicklung erfolgt konsequent ausgehend von den betrieblichen Anforderungen. Darüber hinaus wird auch der Betrieb in der Rückfallebene berücksichtigt.

Ein neues Zugbeeinflussungssystem kann Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit des Eisenbahnsystems haben. Daher werden die kapazitiven Effekte von ETCS Level 1 FS mit anerkannten Verfahren der Eisenbahnbetriebswissenschaft untersucht. Die Ergebnisse werden sowohl mit bestehenden Systemen als auch mit ETCS Level 2 verglichen und eingeordnet.

Die Arbeit zeigt, dass ETCS Level 1 FS aus technischer, betrieblicher, kapazitiver und regulatorischer Sicht für den Einsatz in Deutschland geeignet ist. Noch offene Fragestellungen und durchzuführende Schritte bis zum produktiven Einsatz wurden ebenso identifiziert. Darüber hinaus lassen sich zahlreiche der gewonnenen Erkenntnisse auch auf andere Staaten und Infrastrukturen übertragen.

Summary

The creation of the Single European Railway area requires technical and operational interoperability across the borders of infrastructure managers. Particularly, different national train control systems had been developed in the past, which are incompatible with each other and complicate cross-border traffic. The European Train Control System (ETCS) was therefore established as a uniform technical standard intended to overcome existing incompatibilities between different infrastructure and rolling stock equipment.

ETCS can be implemented in different configurations. The current focus of industry and research lies on highly utilized lines and nodes of the Trans-European Networks, where the radio-based ETCS Level 2 is applied. At the same time, numerous lines with lower performance requirements also exist. These lines and stations are likewise an essential component of the European railway area, as they ensure regional accessibility for both freight and passenger transport. In order to avoid the creation of new technical system boundaries, equipping such infrastructures with ETCS Level 1 is an appropriate option, as this level does not require a radio connection between track and train. As a result, the system architecture is less complex. Nevertheless, ETCS Level 1 in the configuration Full Supervision (FS) exhibits significant functional similarities to Level 2 and provides train drivers with a comparable working environment.

While extensive studies exist for ETCS Level 2, comprehensive investigations of operations with ETCS Level 1 FS are still lacking. The present work addresses this research gap.

Based on the system characteristics of ETCS Level 1 FS, typical application scenarios are first identified in this thesis. For these scenarios, concepts for infrastructure equipment and for the engineering of trackside components are developed. Particular attention is given to the optimized positioning of infill balise groups. The development is consistently carried out on the basis of operational requirements. In addition, operation in degraded conditions is also considered.

The introduction of a new train control system may affect the capacity of the railway system. Therefore, the capacity effects of ETCS Level 1 FS are examined using established methods of railway operations research. The results are compared with existing systems as well as with ETCS Level 2 and are placed in context.

The work shows that ETCS Level 1 FS is suitable for application in Germany from a technical, operational, capacity-related, and regulatory perspective. Remaining open questions and the steps required before productive deployment have likewise been identified. Furthermore, many of the findings can also be transferred to other countries and networks.

1 Einleitung

1.1 Motivation

Das European Train Control System (ETCS)[1] soll als Bestandteil des European Rail Traffic Management System (ERTMS) eine einheitliche Zugbeeinflussung in Europa schaffen und so die Interoperabilität verbessern, indem zukünftig lediglich ein einziges Zugbeeinflussungssystem strecken- und fahrzeugseitig vorhanden sein muss. Ohne ETCS ist für den grenzüberschreitenden Einsatz meistens pro Land ein länderspezifisches, nicht interoperables Zugbeeinflussungssystem (teilweise auch mehrere pro Land) notwendig.

Während in einigen der deutschen Nachbarländer die Ausrüstung mit ETCS weit vorangeschritten oder gar initial abgeschlossen ist, existieren in Deutschland nur wenige Strecken und im Jahr 2026 keine Knoten mit einer vollständigen ETCS-Ausrüstung. Auch die im Rahmen der Digitalen Schiene Deutschland (DSD) geplanten Projekte zur Ausrüstung mit ETCS (vgl. Gülicher et al. [49]) haben bisher nicht die angestrebte Umsetzungsmenge erreicht. Gründe hierfür sind neben einer unklaren, mittel- bis langfristigen Finanzierung von Infrastruktur und Fahrzeugausrüstung auch Vorbehalte ggü. der „neuen“ Technik sowie stellenweise eine große technische Komplexität und umfangreiche, z. T. noch in der Entwicklung befindliche Regelwerke.

All dies behindert einen zügigen Rollout von ETCS, welches bei flächendeckendem Einsatz deutliche Chancen bietet, den Eisenbahnbetrieb und die verwendeten Techniken zu vereinfachen und zu standardisieren, vgl. Steinebach [123], sowie positive Effekte auf Fahrgäste und Betrieb zu generieren, vgl. Rijn und Söffker [103].

1.2 Fragestellung

In der aktuellen Debatte wird eine Ausrüstung mit ETCS im bundesdeutschen Umfeld aufgrund der gegenwärtigen Strategie der Eisenbahnen des Bundes (EdB) de facto gleichbedeutend mit einer Ausrüstung des funkbasierten Level 2 (wahlweise mit oder ohne veränderliche Außensignalisierung) gesetzt. Diese Lösungen müssen jedoch nicht zwangsläufig für alle Infrastrukturen und betrieblichen Anforderungen die technisch-betrieblich beste oder die wirtschaftlich vorteilhafteste sein. Auch abseits der stark ausgelasteten Korridore und Knoten, auf weniger ausgelasteten Infrastrukturen, welche eine essenzielle Erschließungswirkung für das System Schiene in der Fläche erbringen und wichtige lokale Verkehre ermöglichen, ist eine vollständig

[1] Alle Begriffe und Abkürzungen in dieser Arbeit werden nach Möglichkeit im Einklang mit der TSI OPE [234], den veröffentlichten Spezifikationen [155], dem ETCS-Glossar der Deutschen Bahn (DB) [23] sowie dem ERTMS/ATO-Glossar der ERTMS Users Group (EUG) [157] genutzt.

interoperable Ausrüstung mit ETCS notwendig. Nur mit einer interoperablen Ausrüstung auch in der Fläche entstehen keine neuen technisch-betrieblichen Grenzen.

Hierfür bietet ETCS mit der Ausprägung Level 1 Full Supervision (FS) eine passende Alternative. Level 1 FS kann eine kostengünstige, weniger komplexe Option sein, die Infrastruktur mit dem europäischen Standard auszurüsten, vollständig interoperabel zu sein und praktisch alle Vorteile einer digitalen Zugbeeinflussungstechnik (wie das automatisierte Fahren) zu erhalten. Die Ausprägung Level 1 Limited Supervision (LS) kann diese Erwartungen nicht vollumfänglich erfüllen und findet derzeit nur begrenzte Anwendung, vgl. Gruszka et al. [48].

In ihrer Studie über die Einführung von ETCS in den unterschiedlichen Ländern der Europäischen Union (EU) zeigen Smith et al. [119] auf, welche Probleme dabei aufgetreten sind. Im Ergebnis kommen sie zum Schluss, dass vier Kernthemen in zukünftigen Projekten adressiert werden müssen:

1. Transparenz der Anforderungen, Spezifikationen und Tests;
2. Harmonisierung und Konsolidierung betrieblicher Regeln;
3. Beachtung menschlicher Faktoren;
4. Kosten.

Vor diesem Hintergrund erscheint es konsequent, die Möglichkeiten einer Ausrüstung mit ETCS Level 1 FS in Deutschland systematisch zu untersuchen. Eine solche Untersuchung liegt nach Kenntnisstand bislang – abgesehen von einzelnen lokal begrenzten Studien – nicht vor, sodass keine umfassende technische Analyse und Ausarbeitung der hierfür erforderlichen Infrastrukturausstattung unter Berücksichtigung deutscher Betriebsregeln und rechtlicher Vorgaben verfügbar ist. Diese Lücke schließt die vorliegende Arbeit, indem sie aus technisch-betrieblicher Sicht die wesentlichen Anforderungen an die Infrastrukturausrüstung ableitet. Dabei ist das Ziel, mit einer Ausrüstung, welche die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen der Infrastrukturbetreiber berücksichtigt, betrieblichen Nutzen zu stiften.

Die oben aufgelisteten Themenbereiche fanden und finden auch Berücksichtigung in der Erstellung von einheitlichen nationalen Planungsregeln für ETCS Level 1 FS für Deutschland, die unter dem Dach des Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V. (VDV) vorangetrieben wird und an welcher der Autor in den Jahren 2023 bis 2026 maßgebend mitgewirkt hat. Teile der in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse sollen zuerst als VDV-Mitteilung 3640 veröffentlicht und nach Rückmeldungen aus der Branche als ETCS-Module in die kommende VDV-Schrift 364 „Planungsrichtlinie LST für NE“ aufgenommen werden. Darin gehen auch die bisherigen VDV-Schriften 360 „Eisenbahn-Stell-Einrichtungen“ [224] und 361 „Eisenbahn-Signal-Anlagen“ [225] auf, siehe auch Wink et al. [137].

1.3 Struktur der Arbeit

Diese Dissertation besteht aus zehn Kapiteln. Im Kapitel 2 ab Seite 4 werden die rechtlichen und technischen Rahmenbedingungen von Zugbeeinflussungssystemen im Allgemeinen und

ERTMS/ETCS im Speziellen als Grundlage der weiteren Arbeiten dargelegt. Dabei wird auch auf die technischen und betrieblichen Regelwerke eingegangen.

Der aktuelle Stand von Forschung und Technik wird in Kapitel 3 ab Seite 23 aufgezeigt. Themenschwerpunkte sind hierbei die Systembeschreibung von ETCS, die genutzten Betriebsverfahren sowie aktuelle Entwicklungen in der Praxis wie auch aktuelle Forschungsarbeiten.

Ein Kernelement der vorliegenden Arbeit ist das Kapitel 4 ab Seite 50. In diesem wird detailliert auf die Ausrüstung der Infrastruktur für einen Betrieb mit ETCS Level 1 FS unter den deutschen Gegebenheiten eingegangen und werden Lösungen für unterschiedliche Betriebsfälle entwickelt.

In Kapitel 5 ab Seite 98 wird die Projektierung des ETCS-Systems auf der Ebene der Baliseninhalte betrachtet. Durch die Funktionsweise und Anzeigen von ETCS im Führerstand sollen bei der Ausrüstung auch die menschlichen Faktoren der Nutzenden Berücksichtigung finden, weshalb dieser Teilaspekt ebenso behandelt wird.

Die Durchführung des Eisenbahnbetriebs unter ETCS Level 1 FS wird in Kapitel 6 ab Seite 106 untersucht. Dabei wird sowohl der Regelbetrieb als auch der Betrieb in der Rückfallebene berücksichtigt und anhand von Betriebsfällen detailliert beschrieben.

Bei der Einführung neuer oder der Änderung bestehender Zugbeeinflussungssysteme stellt sich in vielen Fällen neben dem Sicherheitsaspekt die Frage, welche Auswirkungen auf die Kapazität der auszurüstenden Eisenbahninfrastruktur zu erwarten sind. Dieser Frage wird im Kapitel 7 ab Seite 115 nachgegangen und anhand ausgewählter Aspekte die Kapazitätswirkung von ETCS an unterschiedlichen Beispielen im Vergleich zu Bestandssystemen bestimmt.

ETCS kann im Bereich der Eisenbahn als „*Enabler*“ des teil- oder hochautomatisierten Fahrens auf der Schiene angesehen werden. Im Kapitel 8 ab Seite 134 werden sich daraus ergebende Anforderungen an die Infrastruktur abgeleitet sowie die Auswirkungen des automatisierten Fahrens unter ETCS Level 1 FS qualitativ bewertet.

Der weitere Forschungsbedarf wird anhand von im Laufe der Bearbeitung identifizierter Lücken im Kapitel 9 ab Seite 138 aufgezeigt und anhand sinnvoller Kriterien kategorisiert.

Zum Abschluss gibt das Kapitel 10 ab Seite 140 eine Zusammenfassung der Arbeit sowie der erlangten Erkenntnisse und gibt einen Ausblick.

2 Grundlagen

2.1 Aufgaben und Entwicklung von Zugbeeinflussungssystemen

Das oberste Ziel der Eisenbahn ist es, einen sicheren Betrieb durchzuführen. Hierfür werden Maßnahmen technischer und organisatorischer Natur implementiert, welche die Sicherheit gewährleisten sollen. „Sicher“ bedeutet für die technischen Systeme der Eisenbahn nach DIN EN 50126-1 die „Freiheit von inakzeptablem Risiko“ [170] und nicht die vollkommene Freiheit von Risiko, da immer ein (sehr) geringes Restrisiko besteht, welches nicht auf null gesenkt werden kann.

Als grundlegende Aufgabe einer Zugbeeinflussung definiert Maschek „[d]ie Überwachung der Reaktion auf die Signalisierung“ [78]. Auch Pachl beschreibt in ähnlicher Weise, dass „die Einhaltung der durch die Signalisierung vorgegebenen Fahrweise nicht allein dem Menschen überlassen werden (darf)“ [96] und dass Zugbeeinflussungssysteme diese „Sicherungslücke“ schließen.

Die konkrete Ausgestaltung und Überwachung dieser Sicherungsmaßnahmen kann jedoch nicht allein den im Eisenbahnverkehr tätigen Unternehmen überlassen werden. Ein rechtlicher Rahmen sowie eine Überwachung der Einhaltung von Vorschriften durch unabhängige Stellen sind notwendig, um das Ziel eines sicheren Eisenbahnbetriebs auch tatsächlich zu erreichen. Aufgrund der meist national geprägten Entwicklung der Eisenbahn vor allem im 20. Jahrhundert hat sich eine Vielzahl technisch unterschiedlicher und nicht miteinander kompatibler Zugbeeinflussungssysteme entwickelt.

Diese Inkompatibilitäten behindern einen grenzüberschreitenden, interoperablen Eisenbahnverkehr, indem entweder an den Grenzen ein Wechsel des Triebfahrzeugs notwendig ist, oder Triebfahrzeuge mit mehreren Systemen ausgestattet sein müssen. Beides erhöht die Komplexität des Eisenbahnverkehrs – sei es aus organisatorischer oder technischer Sicht – und stellt einen Wettbewerbsnachteil gegenüber dem Verkehr auf der Straße, zu Wasser und in der Luft dar. Die EU hat mit ihrer Gründung Ziele für einen ungehinderten Transport auch über die Grenzen der Nationalstaaten hinweg definiert. ETCS ist eine technische Lösung, welche die vorherigen und auch weiterhin bestehenden Hürden reduzieren und schlussendlich vollständig entfernen soll, vgl. Abschnitt 2.2 auf der nächsten Seite.

ETCS erfüllt die oben definierten Aufgaben eines Zugbeeinflussungssystems vollumfänglich. Gleichzeitig ist es selbst Teil der Signalisierung, indem die Signalinformationen den Triebfahrzeugführenden (Tf) auf einem Display direkt im Führerstand angezeigt werden. Man spricht daher von einer Führerstandssignalisierung[1]. Im englischsprachigen Umfeld wird der Begriff „cab signal(l)ing“ genutzt. In der deutschen Fachsprache wird ein Betrieb mit Führerstandssi-

[1] Dies gilt nicht für ETCS in der Betriebsart LS. Dort fahren die Tf weiterhin nach den vorhandenen Außensignalen, ETCS überwacht ohne Anzeige von Führungsgrößen ausschließlich im Hintergrund.

gnalisierung auch als „anzeigegeführt“ bezeichnet, bei Fahrt nach der Außensignalisierung ist ein Zug „signalgeführt“[2].

2.2 Rechtlicher Rahmen

Im Kontext von ETCS als länderübergreifend harmonisiertes System spielt insbesondere der rechtliche Rahmen auf europäischer Ebene eine wichtige Rolle. Nur damit kann das Ziel der Interoperabilität erreicht werden. Die nationalen rechtlichen Bestimmungen der einzelnen Mitgliedstaaten treten stellenweise in den Hintergrund bzw. füllen den Raum der nicht von Europarecht umfassten Bereiche.

2.2.1 Europäisches Recht

Ausschlaggebend für das Vorantreiben der Entwicklung von und die Ausrüstung mit ETCS war und ist vor allem die Definition der sogenannten Transeuropäischen Netze (TEN). Die TEN sollen Infrastruktur für Verkehr und Energie schaffen, um im Binnenmarkt der EU die nationalen Netze miteinander zu verbinden und somit freien Verkehr zu gewährleisten [268]. Die Europäische Gemeinschaft (EG) als Vorläufer der EU hat im Jahr 1996 mit der Entscheidung 1692/96/EG [246] erstmals die Leitlinien für den Aufbau eines TEN für den Verkehr festgehalten. Dieses Netz umfasst alle Verkehrsträger zu Land, zu Wasser und in der Luft. Konkret wird das Verkehrsnetz dort unterteilt in Straßennetz, Eisenbahnnetz, Binnenwasserstraßennetz, Seehäfen, Flughäfen sowie das Netz für den kombinierten Verkehr. Neben der Infrastruktur gehören auch die entsprechenden Verkehrsmanagement-, Ortungs- und Navigationssysteme zu den TEN. Mit der Verordnung (EU) Nr. 1315/2013 [256] wurde die Unterteilung der Infrastrukturnetze in das Kern- und das Gesamtnetz eingeführt. Zudem sind für das Eisenbahnnetz nun konkrete Komponenten aufgeführt, welche die Infrastruktur des entsprechenden Netzes ausmachen und damit unter die Regelung dieser Verordnung fallen, sowie anhand der Streckengeschwindigkeit zwischen Hochgeschwindigkeits- und konventionellem Eisenbahnverkehr unterschieden.

Die aktuell gültige Verordnung (EU) 2024/1679 [254] über die „Leitlinien der Union für den Aufbau des Transeuropäischen Verkehrsnetzes“ enthält (insbesondere in Art. 18) auch Ziele für die Ausrüstung mit ERTMS. Hierfür wird die Infrastruktur nach ihrer Wichtigkeit als dem Kernnetz, dem erweiterten Kernnetz oder dem Gesamtnetz zugehörig klassifiziert. Zu beachten ist hierbei, dass das sogenannte Gesamtnetz nicht alle Eisenbahnstrecken in der EU umfasst, sondern sich auf Verbindungen von besonderer europäischer Relevanz beschränkt. Ab dem 31. Dezember 2030 soll das Kernnetz, ab dem 31. Dezember 2040 das erweiterte Kernnetz und ab dem 31. Dezember 2050 das Gesamtnetz mit ERTMS und damit ETCS ausgerüstet

[2] Der Wortbestandteil der „Führung“ steht hier in keinem Zusammenhang mit der Pflicht nach § 15 Abs. (3) EBO, bei Geschwindigkeiten oberhalb von 160 km/h eine Zugbeeinflussung einzusetzen, durch die Züge „geführt“ werden können.

sein. Ebenfalls zeitlich gestaffelt sollen in den genannten Bereichen ggf. noch vorhandene *Class-B*-Systeme[3] nach dem Jahr 2040, nach dem Jahr 2045, respektive nach dem Jahr 2050 weder betrieben werden noch installiert sein. Ab dem 31. Dezember 2050 soll zudem das Gesamtnetz des TEN-Netzes mit „funkgestütztem ERTMS“ ausgerüstet sein. Hinzu kommen die Zugangsstrecken zu multimodalen Güterterminals und Rangierbahnhöfen. Hieraus ergibt sich also eine Ausrüstungsverpflichtung von Teilen der Eisenbahninfrastruktur mit ETCS Level 2; Level 1 kann daher nach heutiger Rechtslage nicht dauerhaft für Infrastrukturen, die unter die TEN-Verordnung fallen, angewendet werden. Die von der TEN-Verordnung abgedeckten Strecken sind unter anderem gekennzeichnet durch hohe Zugzahlen und hohe Geschwindigkeiten. Beides sind Faktoren, bei denen ETCS Level 2 seine Stärken ausspielen kann und in denen die punktförmige Übertragung von Level 1 (vgl. Abschnitt 3.1 auf Seite 23) kapazitive und betriebliche Nachteile nach sich ziehen könnte. Dennoch verbleibt ein großer Teil der Schieneninfrastruktur in Europa, für die eine Ausrüstung mit ETCS Level 1 auch langfristig möglich, zulässig und vorteilhaft sein kann.

In Deutschland z. B., das in absoluten Zahlen das längste Schienennetz aller EU-Staaten besitzt [34], fallen im Fahrplanjahr 2025 ca. 54,3 % bzw. gut 30 700 km der insgesamt knapp 57 000 km aktiven Gleiskilometer (nichtbundeseigene Eisenbahnen (NE) und EdB summiert) unter die TEN-Verordnung [265]. Im Umkehrschluss existieren also in Deutschland zurzeit über 25 000 km Eisenbahninfrastruktur, die nach aktueller Rechtslage keiner Ausrüstungsverpflichtung mit ETCS Level 2 unterliegen und potenziell für die Ausrüstung mit ETCS Level 1 infrage kommen, um interoperabel befahren zu werden.

Während die Rechtsakte die TEN betreffend Ziel und Zweck der Ausrüstung mit ETCS beschreiben, sind die technischen Eigenschaften der betroffenen Teilsysteme des Eisenbahnverkehrs in den Technischen Spezifikationen für Interoperabilität (TSI) enthalten. Die technischen Grundlagen von Interoperabilität im Allgemeinen und einer interoperablen Durchfahrbarkeit der Korridore im Speziellen wurden daher mit der Einführung der TSI gelegt.

Das Konzept der TSI als Fundament für die Interoperabilität im Eisenbahnsektor führte im Jahr 1996 die Richtlinie 96/48/EG [252] ein. Begonnen wurde mit den Hochgeschwindigkeitsstrecken. Fünf Jahre später wurde der Geltungsbereich der TSI mit der Richtlinie 2001/16/EG [248] auch auf bestimmte konventionelle Strecken, welche dem transeuropäischen Verkehr dienen, ausgeweitet. Beide wurden 2004 mit der Richtlinie 2004/50/EG [249] geringfügig geändert und konkretisiert, bevor sie 2008 durch die Richtlinie 2008/57/EG [250] einer Neufassung unterzogen wurden. In näherer Vergangenheit wurde mit der Richtlinie 2012/34/EU [251] der Begriff „Single European Railway Area“ eingeführt und damit die Bedeutung der Interoperabilität im Eisenbahnsektor bestärkt. Das Ziel ist es, ein einheitliches europäisches Eisenbahnsystem zu erreichen, in dem die Grenzen der Staaten weder relevant sind noch wesentliche Hürden für den transeuropäischen Personen- und Güterverkehr auf der

[3] Als *Class-B*-Systeme werden alle Systeme bezeichnet, welche nicht den Technische Spezifikationen für Interoperabilität (TSI) entsprechen bzw. nicht den ERTMS-Spezifikationen entsprechen. Dies umfasst de facto alle nationalen Bestandssysteme. *Class-A*-Systeme hingegen umfassen alle interoperablen Teilsysteme gemäß TSI bzw. den ERTMS-Standards.

Schiene darstellen. Zuletzt wurde im Jahr 2016 das Thema der Interoperabilität in der EU mit der weiterhin gültigen Richtlinie (EU) 2016/797 [247] umfassend überarbeitet und neu gefasst.

Bei den zuvor aufgeführten europäischen Vorgaben zur Interoperabilität handelt es sich um Richtlinien, also jene Art von Rechtsakten, die einen einheitlichen Zielzustand vorgeben, jedoch auf der Ebene der Mitgliedstaaten jeweils durch nationales Recht konkretisiert werden müssen [269].

Die auf dieser Grundlage erstellten TSI hingegen werden durch Verordnungen rechtskräftig und sind damit unmittelbar in allen Mitgliedstaaten gültig und anzuwenden [269]. Sie bedürfen daher keiner nationalen rechtlichen Umsetzung bzw. Konkretisierung. Alle zulässigen Ausnahmen von den einzelnen TSI sind bereits diesen inhärent und damit abschließend beschrieben. Aus diesem Grund ist der rechtliche Rahmen der jeweils gültigen TSI in allen Mitgliedstaaten der EU weitestgehend derselbe. Derzeit sind elf TSI in Kraft [273] und umfassen jeweils spezifische Teilsysteme des Eisenbahnsystems:

- Control, Command and Signalling (CCS TSI),
- Energy (ENE TSI),
- Freight Wagons (WAG TSI),
- Locomotives and Passengers (LOC&PAS TSI),
- Noise (NOI TSI),
- Operation and Traffic Management (OPE TSI),
- Persons with Disabilities and with Reduced Mobility (PRM TSI),
- Safety in Railway Tunnels (SRT TSI),
- Infrastructure (INF TSI),
- Telematic Applications for Passenger Service (TAP TSI),
- Telematic Applications for Freight Service (TAF TSI).

Relevant für das Themenfeld der Projektierung von ETCS sind die drei TSI CCS, OPE sowie LOC&PAS. Im Folgenden werden zu diesen TSI jeweils die mit Stand Anfang 2026 aktuell gültigen Rechtsvorschriften benannt, sowie – sofern vorhanden – die jeweils konsolidierte Version referenziert. Ein vollständiger Überblick über die Historie der TSI ist bei der European Union Agency for Railways (ERA) verfügbar [33].

Die TSI CCS [236] umfasst die Teilsysteme Zugsteuerung, Zugsicherung und Signalgebung. Dementsprechend sind darin grundlegende Anforderungen an ETCS enthalten, ebenso die Bestimmungen zur Ausrüstung neuer Strecken und Fahrzeuge, sofern sie unter den Geltungsbereich dieser TSI fallen. ETCS ist das alleinige *Class A*-Zugbeeinflussungssystem in der aktuellen TSI CCS [236] und soll damit einmal im gesamten Geltungsbereich der TSI zur Verfügung stehen. Bis auf Weiteres können die bestehenden nationalen *Class B*-Systeme in Betrieb bleiben, außer die entsprechenden Infrastrukturen fallen unter die TEN-Verordnungen. Dann gelten die oben vorgestellten Daten zur Außerbetriebnahme der nationalen *Class B*-Systeme.

Das Teilsystem Fahrzeuge – Lokomotiven und Personenwagen wird durch die TSI LOC&PAS abgedeckt. Aufgrund zahlreicher Änderungen in den vergangenen Jahren sind aktuell jeweils Teile der Verordnung (EU) Nr. 1302/2014 [255] sowie der Durchführungsverordnungen (EU) 2018/868, (EU) 2019/776, (EU) 2020/387 und (EU) 2023/1694 [229, 231, 232, 235] gültig[4]. Relevant für die Projektierung von ETCS sind hieraus Fahrzeugfunktionen, welche optional implementiert werden können bzw. nicht in allen Fahrzeugtypen oder -klassen vorgeschrieben sind. Solche Fälle müssen entsprechend berücksichtigt, in betrieblichen Regeln festgehalten oder – sofern regulatorisch unbedenklich – über die Netzzugangsbedingungen auf relevanten Strecken dennoch gefordert werden.

Die TSI OPE definiert das Teilsystem Verkehrsbetrieb und Verkehrssteuerung. Die aktuell (teilweise) gültigen Durchführungsverordnungen (EU) 2019/773, (EU) 2021/2238 und (EU) 2023/1693 [230, 233, 234][5] enthalten übergeordnete Anforderungen an die Infrastruktur, die Fahrzeuge, das Personal und den Betrieb. Diese TSI ist für die vorliegende Arbeit von Interesse durch die enthaltenen „ERTMS-Betriebsgrundsätze und -Vorschriften“, also harmonisierten Regelungen für den Betrieb unter ETCS, welche einerseits Einzug finden müssen in die jeweiligen Fahrdienstvorschriften (und wenn erforderlich auch in weiteres betriebliches Regelwerk), andererseits durch die Beschreibung harmonisierter Prozesse, die Auswirkungen auf die Ausgestaltung der streckenseitigen ETCS-Infrastruktur und -Projektierung besitzen können. Die konkreten Funktionalitäten und obligatorischen Spezifikationen von ETCS sind als Anhang A der TSI CCS festgeschrieben, vgl. Abschnitt 2.3 auf Seite 13.

Ergänzend zu den europäischen Richtlinien und Verordnungen, welche grundlegende Anforderungen definieren, konkretisieren europäische Normen die technischen Details[6]. Von besonderer Relevanz für Bahnanwendungen im Allgemeinen und Signaltechnik im Speziellen sind von den Normen der Comité Européen de Normalisation Électrotechnique (CENELEC) die EN 50126 [170, 171] für den Bereich Reliability, Availability, Maintainability, Safety (RAMS), die EN 50129 [172] für elektronische Systeme der Signaltechnik, die EN 50159 [173] für sicherheitsrelevante Kommunikation und zuletzt die EN 50716 [174] für einzuhaltende Anforderungen in der Softwareentwicklung.

Trotz der Bestrebungen, einen einheitlichen Eisenbahnraum mit harmonisierten Regeln zu errichten, können weiterhin nationale Vorschriften notwendig sein, die nicht von den TSI abgedeckt sind. Die Verordnung EU 2016/797 [247] erlaubt den Mitgliedstaaten daher, per Notifizierung nationale Vorschriften als sogenannte National notified technical rules (NNTR) festzulegen. Meistens sind diese erforderlich, um die Kompatibilität mit dem Bestandsnetz sicherzustellen oder sicherheitsrelevante Aspekte, die sich aus speziellen Konstellationen der Infrastrukturausrüstung entstehen, fahrzeugseitig zu berücksichtigen.

[4] Eine konsolidierte Fassung der TSI LOC&PAS zu Informationszwecken ist verfügbar unter: http://data.europa.eu/eli/reg/2014/1302/2023-09-28.

[5] Eine konsolidierte Fassung der TSI OPE zu Informationszwecken ist verfügbar unter: http://data.europa.eu/eli/reg_impl/2019/773/2023-09-28.

[6] Im Folgenden wird jeweils die deutsche Fassung der genannten Europäischen Normen referenziert.

Zuletzt legt die Durchführungsverordnung EU 402/2013 [237] (zuletzt geändert durch die Durchführungsverordnung EU 2015/1136 [238]) mit der Common Safety Method (CSM) ein harmonisiertes Risikomanagementsverfahren für Änderungen am Bahnsystem fest. Dabei werden sowohl technische als auch betriebliche und organisatorische Änderungen berücksichtigt und hinsichtlich ihrer Auswirkungen bewertet. Im ersten Schritt erfolgt die Bewertung der Sicherheitsrelevanz, also ob eine Änderung potenziell sicherheitsrelevante Komponenten bzw. Funktionen betrifft. Darauf aufbauend wird die Signifikanzbewertung anhand der festgelegten Kriterien Ausfallfolgen, Innovation, Komplexität, Überwachbarkeit, Umkehrbarkeit und additive Wirkung durchgeführt. Wird eine Änderung als signifikant eingestuft, so muss das vollständige Risikomanagementsverfahren durchgeführt werden. Dieses besteht aus den Phasen Systemdefinition, Risikoanalyse inklusive Gefährdungsermittlung und Risikoevaluation. Die Vertretbarkeit identifizierter Risiken kann mithilfe der drei Grundsätze „Anwendung von Regelwerken“, „Vergleich mit ähnlichen Systemen“ und „explizite Risikoabschätzung“ evaluiert werden.

Die Einhaltung aller Vorgaben gerade in sicherheitsrelevanten Bereichen wie der Eisenbahn muss durch Externe geprüft werden. Daher sind im Rahmen der Konformitätsbewertung mit der vollständigen Umsetzung des 4. Eisenbahnpakets drei Stellen („*Bodies*“) einzubeziehen:

- Notified Body (NoBo),
- Designated Body (DeBo),
- Assessment Body (AsBo).

Diese besitzen jeweils klar abgegrenzte Aufgabenbereiche. Der NoBo prüft die Interoperabilität gegen die Anforderungen des TSI, der DeBo überprüft die Einhaltung der jeweils gültigen NNTR und der AsBo bewertet das Ergebnis sowie die korrekte Durchführung des Risikomanagementsverfahrens (CSM) bei signifikanten Änderungen.

2.2.2 Nationales Recht

In Bezug auf Zugbeeinflussungssysteme wird durch EU-Rechtsvorschriften in vielen Fällen nicht das gesamte Eisenbahnsystem der Mitgliedstaaten geregelt. Die einzelnen Staaten und diesen untergeordnete Ebenen besitzen weiterhin Kompetenzen in der rechtlichen und technischen Ausgestaltung der Teilsysteme der Eisenbahn. Dies betrifft insbesondere Infrastrukturen (und auch Fahrzeuge), welche nicht unter die TEN-Verordnung oder den Anwendungsbereich der TSI fallen. Weiterhin können auch Nicht-EU-Länder beispielsweise die TSI in ihrem Land anwenden, um dennoch einen interoperablen Betrieb mit angrenzenden EU-Ländern zu unterstützen und somit auch etablierte, standardisierte Systeme wie ETCS anwenden. Zuletzt müssen EU-Richtlinien im Gegensatz zu den EU-Verordnungen von den Mitgliedstaaten in nationales Recht überführt werden, sodass sich in der konkreten rechtlichen Ausgestaltung nationale Spezifika ergeben können.

In den folgenden Abschnitten wird exemplarisch die nationale Rechtslage in Bezug auf ETCS der Länder Deutschland (auf der nächsten Seite), Österreich (auf Seite 12) und der

Schweiz (auf Seite 13) erläutert. Die Auswahl dieser Länder beruht auf vergleichbaren, aber nicht identischen eisenbahnbetrieblichen Rahmenbedingungen bei zugleich unterschiedlicher rechtlicher Einbindung in das europäische Recht. Während Deutschland und Österreich als EU-Mitgliedstaaten unmittelbar den einschlägigen EU-Rechtsvorschriften unterliegen, wendet die Schweiz als Nicht-EU-Staat zentrale Elemente freiwillig an. Zudem zeichnen sich diese drei Länder dadurch aus, dass der Stellwert der Eisenbahn in Politik und Gesellschaft unterschiedlich hoch ist.

Deutschland

Eine Zusammenfassung über die rechtlichen Grundlagen von ETCS wurde von den Wissenschaftlichen Diensten des Deutschen Bundestages [24] erstellt. Relevante bundesdeutsche Gesetze sind das Allgemeine Eisenbahngesetz (AEG), die Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO), die Eisenbahn-Signalordnung (ESO) und die Eisenbahn-Inbetriebnahmegenehmigungsverordnung (EIGV).

Das AEG [227] enthält keine Bestimmungen hinsichtlich der Ausrüstung mit oder der Anforderungen an Zugbeeinflussungssysteme. Seiner Natur nach werden die grundlegenden Rechte und Pflichten im Eisenbahnbetrieb geregelt.

Die dem AEG nachgeordnete EBO [239] legt fest, in welchen Fällen eine Infrastruktur mit einem Zugbeeinflussungssystem auszurüsten ist und welche Funktionen dieses – in Abhängigkeit der zulässigen Geschwindigkeit und des Verkehrs – mindestens erfüllen muss. Als Rechtsnorm sind hierbei keine konkreten technischen Lösungen definiert. Entsprechend § 2 (1) EBO sind die anerkannten Regeln der Technik anzuwenden. Anerkannte Regeln der Technik sind neben Normen in diesem Fall beispielsweise auch die Richtlinien der Deutsche Bahn (DB) AG (inklusive der Tochterunternehmen wie der DB InfraGO AG) sowie die Schriften und Mitteilungen des Verbands Deutscher Verkehrsunternehmen e. V. (VDV).

Die ESO [244] definiert anzuwendende Signale in Form, Aussehen, Klang und Bedeutung. Im Wesentlichen sind darin die statischen und veränderlichen Außensignale, Signale an Fahrzeugen sowie Tonsignale enthalten. Aufgrund § 14 (1) EBO sind „[d]en Signalen am Fahrweg [...] entsprechende Anzeigen im Führerraum gleichgestellt; sie dürfen Signale am Fahrweg ersetzen“. Im Kontext von ETCS kommt dieser Festlegung besondere Bedeutung zu, da es sich bei der Betriebsart FS um eine Führerstandssignalisierung handelt. Dies bedeutet für ETCS, dass andere Darstellungen zur Informationsübermittlung an die Triebfahrzeugführende (Tf) genutzt werden können, als in den entsprechenden Rechtsnormen definiert. Ein Beispiel ist die Anzeige einer Movement Authority (MA), welche unter bestimmten Voraussetzungen die Zustimmung des Fahrdienstleiter (Fdl) zur Abfahrt anzeigt und einen Fahrtbegriff an einem Hauptsignal ersetzen kann. Dementsprechend ist die ESO besonders dort relevant, wo eine Doppelausrüstung besteht. Direkt ETCS betreffend existiert dort derzeit lediglich das Signal Ne 14 (ETCS-Halt-Tafel), welches offiziell als Signal mit vorübergehender Gültigkeit genehmigt

ist. Weitere Signale sind insbesondere bei alleiniger Ausrüstung mit ETCS den betrieblichen und sicherheitstechnischen Anforderungen entsprechend der EBO und der ESO anzuwenden.

Ein Großteil der nationalen Konkretisierung der EU-Richtlinie 2016/797 [247] „für das Inverkehrbringen und für die Inbetriebnahme von Bestandteilen des Eisenbahnsystems“ in Deutschland ist aktuell in der EIGV [242] geregelt und definiert damit den nationalen Zulassungsrahmen. Die EIGV folgt mit Inkraftsetzen im Jahr 2018 auf die zeitgleich außer Kraft gesetzte Transeuropäische-Eisenbahn-Interoperabilitätsverordnung (TEIV) [260].

In der Anwendung der diversen Rechtsnormen ist in Deutschland die Besonderheit zu berücksichtigen, dass das normalspurige, öffentliche Eisenbahnnetz de jure in zwei Bereiche getrennt ist. Diese sind die EdB und die NE. Während für erstere das Eisenbahn-Bundesamt (EBA) die zuständige Aufsichtsbehörde ist und in den meisten Fällen die europäischen Richtlinien und damit auch die EIGV anzuwenden sind, fallen die NE formal unter die Aufsicht der Länder in Form der jeweiligen Landeseisenbahnaufsicht (LEA)[7]. Sie sind dem deutschen Eisenbahnrecht nach unter anderem von der Anwendung der Richtlinien über die Interoperabilität des europäischen Eisenbahnsystems und damit auch der EIGV ausgenommen. Für letztere bestehen also grundsätzlich aus juristischer Sicht größere Freiheiten in der Ausgestaltung ihrer Infrastruktur und ihres Betriebes.

Mit einem fortschreitenden Ausbau von ETCS bei den EdB (primär der DB InfraGO AG) ist das Thema ETCS auch für die NE von Relevanz, da sie als Infrastrukturen an das Schienennetz der DB InfraGO anschließen.

Diese rechtliche Zweiteilung bedeutet, dass je nach zuständiger Aufsichtsbehörde unterschiedliche Prozesse anzuwenden sind, um eine Zulassung bzw. eine Genehmigung zum Inverkehrbringen und Verwenden (GIuV) zu erlangen. Für die EdB unter Aufsicht des EBA definiert die Sektorleitlinie [179] „die Prozesse der Zulassungsbewertung [...], die für die Beantragung einer ‚Genehmigung zum Inverkehrbringen und Verwenden‘ notwendig sind.“ Kern des Prozesses sind u. a. die drei Phasen Lastenheft, Pflichtenheft und Produkt, welche bei der Entwicklung neuer Produkte durchlaufen werden müssen.

Im Bereich der NE-Bahnen ist die Sektorleitlinie nicht anzuwenden, da sie nicht unter die EIGV fallen. Stattdessen wird die VDV-Schrift 334 „Richtlinie für die Zulassung und Abnahme von Bahnsignalanlagen bei Nichtbundeseigenen Eisenbahnen“ [223] herangezogen, welche aufgrund ihres Wesens als Konkretisierung relevanter, z. T. harmonisierter Normen als Pendant zur Sektorleitlinie gilt. Die VDV-Schrift 334 beschreibt entsprechende Verfahren für die Zulassung und die Abnahme unter Einhaltung der Rechtsvorschriften, anerkannter Regeln der Technik und Normen wie bspw. der DIN EN 50126 [170, 171] mit der Beschreibung des Lebenszyklus. Dabei wird unterschieden nach der Anlagenzulassung (Spezifik) und der Typ- und Produktzulassung (Generik). Notwendige Risikoanalysen werden auf Grundlage der VDV-Schrift 332 „Sicherheitsintegritätsanforderungen für Bahnsignalanlagen bei Nichtbundeseigenen Eisenbahnen“ [222] durchgeführt. Diese enthält beispielhafte Risikographen sowie

[7] Zahlreiche Länder machen von der Möglichkeit Gebrauch, diese Aufsicht an das EBA zu übertragen und unterhalten daher keine eigene LEA.

Sicherheitsintegritätsstufe (Safety Integrity Level (SIL)) für die unterschiedlichen Schutzeinrichtungen der Signalanlagen. Für eine Führerstandssignalisierung ergibt sich z. B. eine Sicherheitsintegritätsstufe von 3 bis 4.

Die Projektierung einzelner Ausrüstungen wie einer ETCS-Ausrüstung ist in Deutschland durch einschlägige Prüfsachverständige (PSV) gemäß Eisenbahn-Prüfsachverständigenverordnung (EPSV) [243] zu prüfen. Diese überprüfen neben der Einhaltung der zugrundeliegenden Projektierungsvorschriften (Planprüfung) auch die korrekte Ausführung der Anlagen (Abnahmeprüfung) sowie die Einhaltung nicht notifizierter technischer Regeln, vgl. Sektorleitlinie und VV BAU-STE [240, 179]. Ein PSV agiert hierbei ergänzend zum DeBo (siehe Seite 9), um eine vollständige Abdeckung der nationalen Vorschriften zu erreichen. Gemeinsam mit der NoBo-Bewertung erfolgt eine vollumfängliche Zulassungsbewertung.

Österreich

Als Mitgliedsstaat der EU findet auch in Österreich das EU-Recht Anwendung bzw. muss in nationalen Rechtsnormen umgesetzt werden.

Die nationale gesetzliche Grundlage für das Eisenbahnsystem in Österreich bildet als Bundesgesetz das Eisenbahngesetz (EisbG) [228]. Dieses enthält umfassende Regelungen zu allen Bereichen der Eisenbahn und setzt gleichzeitig eine Vielzahl der europäischen Richtlinien in national gültiges Recht um, bspw. zu Netzzugang, Fahrwegkapazität und Interoperabilität. Bezogen auf die Zugbeeinflussung definiert es das Vorgehen zum Erlangen einer Bauartgenehmigung eisenbahnsicherungstechnischer Anlagen im Einklang mit dem EU-Recht. Auf die Notwendigkeit und grundlegende, zu erfüllende Eigenschaften von Zugbeeinflussungssystemen wird nicht eingegangen.

Konkrete Festlegungen mit hoher Detailtiefe für alle Bestandteile des Eisenbahnsystems sind in der Eisenbahnbau- und -betriebsverordnung (EisbBBV) [259] enthalten. Diese gliedert sich u. a. in die Abschnitte Betriebsanlagen, Signale, Schienenfahrzeuge und Eisenbahnbetrieb, welche eine besondere Relevanz für die Zugsicherung und Zugbeeinflussung besitzen. Die EisbBBV definiert, wann eine Ausrüstung mit Zugbeeinflussung mit welchen minimalen Funktionen vorhanden sein muss und welche Auswirkungen sie z. B. auf den Schutzweg (vergleichbar mit dem deutschen Durchrutschweg) oder die zulässige Geschwindigkeit eines Zuges besitzt. Konkrete technische Lösungen sind in der Verordnung nicht enthalten. Des Weiteren werden in ihr das Aussehen und die Bedeutung von Signalen festgesetzt, ein Bezug zu ETCS (Halttafel oder Festlegungen zur Führerstandssignalisierung) ist jedoch nicht zu finden.

Die Eisenbahnverordnung (EisbVO) 2003 [257] enthält Bestimmungen zu allgemeinen Pflichten des Eisenbahnunternehmens und auch zu Dienstvorschriften und -anweisungen, welche sich auch auf die Sicherungstechnik beziehen können. Des Weiteren regelt sie die Betriebsaufsicht und die Anforderungen an Betriebsbedienstete. Festlegungen zu Signalen sind nach einer Änderung nicht mehr enthalten. Damit wird die Ausgestaltung der Ausrüstung mit

ETCS alleine durch EU-Vorgaben sowie durch Dokumente der Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU) definiert.

Schweiz

Die Schweizerische Eidgenossenschaft ist zwar kein EU-Mitglied, nimmt aufgrund ihrer geografischen Lage als Binnenland und ihrer Bedeutung für den transeuropäischen Transport jedoch eine besondere Rolle im Eisenbahnsystem ein. Um die Interoperabilität zu gewährleisten, finden die europäischen TSI und weitere Standards durch bilaterale Abkommen häufig Anwendung und auch in Zulassungsfragen besteht eine große Harmonisierung zwischen der Schweiz und den EU-Mitgliedstaaten.

Ähnlich zu Gesetzen vergleichbaren Rangs in Deutschland und Österreich enthält das direkt der Bundesverfassung untergeordnete Eisenbahngesetz (EBG) [245] keine unmittelbaren Regelungen zur Zugbeeinflussung. Es enthält stattdessen Bestimmungen u. a. zu Infrastrukturkonzessionen, zum Netzzugang sowie zur Finanzierung und zum Ausbau der Infrastruktur. Es stellt jedoch mit Art. 23a im Abschnitt zur Interoperabilität klar, dass die normalspurigen Bahnen im Regelfall technisch und betrieblich interoperabel zum „europäischen Eisenbahnsystem“ zu gestalten sind. Dies schließt die Zugbeeinflussung in Form von ETCS implizit mit ein.

Selbst die nachgeordnete Verordnung über Bau und Betrieb der Eisenbahnen (Eisenbahnverordnung) (EBV) [258] bleibt in ihren Aussagen vergleichsweise vage. Erklärtes Ziel der Sicherungsanlagen ist ein „sicherer und zuverlässiger Eisenbahnbetrieb“. Dabei sind auch die anerkannten Regeln der Technik wie bspw. Normen heranzuziehen. Durch die Verordnung wird zudem das Bundesamt für Verkehr (BAV) ermächtigt, Art und Kompatibilität von „Sicherungsanlagen und Telematikanwendungen“ zu verfügen.

Das BAV wiederum hat die technische Systemführerschaft an die Infrastrukturdivision der Schweizerische Bundesbahnen AG (SBB) übertragen, welche das System im Sinne der ERTMS-Strategie [16] und unter Aufsicht des BAV weiterentwickelt und ausrollt. Die Dokumente der Systemführerin besitzen jedoch nicht den Rang nationaler Gesetzgebung.

2.3 European Rail Traffic Management System

2.3.1 Bestandteile

ERTMS als einheitliches europäisches System zur Steuerung und zum Management des Eisenbahnverkehrs ist die technische Ausprägung der europarechtlich vorgeschriebenen Interoperabilität [271]. Es besteht aus drei Systemen: ETCS als Zugbeeinflussungssystem, Railway Mobile Radio (RMR) in den Ausprägungen Global System for Mobile Communications – Railways (GSM-R) und Future Railway Mobile Communication System (FRMCS) als Zugfunksystem und zur Übertragung von ETCS-Daten, sowie Automatic Train Operation (ATO) für den

automatisierten Zugbetrieb unter ETCS [272]. ETCS kann dabei als das Herzstück von ERTMS bezeichnet werden. Die Komponenten des RMR werden aufgrund der Fokussierung auf ETCS Level 1 in dieser Arbeit nicht weiter vertieft. Der automatisierte Betrieb wird in Kapitel 8 ab Seite 134 behandelt.

2.3.2 Grundlagen

ETCS soll gemäß des europäischen Rechtsrahmens (siehe Abschnitt 2.2.1 auf Seite 5) zukünftig das alleinige Zugbeeinflussungssystem in der EU darstellen und wird daher als einziges sogenanntes *Class A*-System bezeichnet. Wenn in Zukunft die gesamte Infrastruktur und alle Fahrzeuge mit ETCS ausgerüstet sind, wird nur noch dieses eine System benötigt, sodass die Komplexität massiv reduziert wird und mögliche Skaleneffekte besser zum Tragen kommen können als es mit den derzeitigen proprietären nationalen Systemen (*Class B*-Systeme) möglich ist. Als solches definiert ETCS den Zielzustand eines Zugbeeinflussungssystems für die europäische Eisenbahn, infrastrukturseitig und auf den Fahrzeugen.

Konzeptionell betrachtet ist ETCS eine positive Zugbeeinflussung, da eine MA genutzt wird, um die Bewegung eines Zuges bis zu einer definierten Position innerhalb eines spezifizierten Geschwindigkeitsbereichs zuzulassen [143, 144]. Eine MA bei ETCS umfasst immer mindestens die Distanz, die ein Zug autorisiert wird zu fahren, sowie die detaillierten Geschwindigkeits- und Gradientenprofile. Des Weiteren können über ETCS zusätzliche (Signal-)Informationen bereitgestellt werden. Im Gegensatz dazu sind negative Zugbeeinflussungssysteme abzugrenzen, bei welchen grundsätzlich eine freie, ungehinderte Fahrt möglich ist, solange keine Restriktionen wie beim Annähern an ein Halt zeigendes Signal auferlegt werden. In diese Kategorie fallen die meisten punktförmigen Bestandssysteme. Bei ETCS werden alle notwendigen Informationen den Tf auf dem harmonisierten Driver Machine Interface (DMI) [160] im Führerstand angezeigt. ETCS ist damit ein Vertreter der Führerstandssignalisierung. Die angezeigten Informationen umfassen u. a. die aktuelle Geschwindigkeit, die zulässige Geschwindigkeit, die Zielgeschwindigkeit und die Zieldistanz.

Die auf dem Zug benötigten Informationen werden entweder über Balisen (elektronische Transponder an festen Positionen im Gleis) oder über Funk an das Fahrzeug übertragen. Findet die Übertragung primär punktförmig mittels Balisen statt, wird dies als ETCS Level 1 bezeichnet, während die Nutzung von Funk als primäres kontinuierliches Übertragungsmedium den ETCS Level 2 definiert. In der vormals als Level 3 bezeichneten Ausprägung wird die Zugintegrität fahrzeugseitig überprüft, sodass keine streckenseitigen Gleisfreimeldesysteme benötigt werden und Fahren im wandernden Raumabstand bzw. Bremswegabstand (*Moving Block*) ermöglicht wird. Als Funksystem kommt derzeit GSM-R zu Einsatz, welches jedoch aus Obsoleszenzgründen in den kommenden Jahren durch den Nachfolger FRMCS abgelöst werden wird [59].

Bei ETCS Level 1 ist im Kapitel 3 des Subset 026 spezifiziert [145], dass Infill-Informationen über Balisengruppen (Eurobalisen), Euroloops oder Radio Infill (lokal begrenzter GSM-R-

Funk) an das Fahrzeug übertragen werden können. Die jeweils zugehörigen Spezifikationen finden sich in den Subsets 036, 044, 047 und 048 [152, 153, 168, 169]. Eurobalisen können Informationen ausschließlich an bestimmten Stellen (punktförmig) übertragen, während Euroloop und Radio Infill eine kontinuierliche Übertragung über eine begrenzte Distanz, beispielsweise im Annäherungsbereich eines Hauptsignals, gewährleisten können. Damit reduziert sich potenziell die Systemlatenz, nach welcher auf den Wechsel des Hauptsignals von einem Haltbegriff zu einem Fahrtbegriff reagiert werden kann. Dies kann positive Auswirkungen auf die Kapazität der Strecke und den Betriebsablauf haben.

Obwohl sowohl Euroloop als auch Radio Infill in Betrieb genommen wurden und zum Teil auch heute noch in Betrieb sind, nutzen alle neueren Ausrüstungen mit ETCS Level 1 ausschließlich Balisengruppen zur Übertragung von Infill-Informationen. Dies deutet auf ein besseres Verhältnis von Kosten bzw. von Komplexität zu Leistung im Vergleich zu den semi-kontinuierlichen Lösungen hin. Als Nachteil ist klar erkennbar, dass die Infill-Informationen bei Eurobalisen ausschließlich an den festen Orten der Infill-Balisengruppen übertragen werden können. Die aktuell gültigen TSI für Zugsteuerung, Zugsicherung und Signalgebung [236] verbieten die Inbetriebnahme neuer Euroloops oder Radio Infill Units (RIU).

ETCS Level 1 kann weiterhin außerhalb des TEN-Bereiches, insbesondere auf weniger belasteten Teilen der Eisenbahninfrastruktur mit geringeren Anforderungen und einfachen Betriebsverhältnissen, angewendet werden. Dabei werden neben bestehenden Stellwerkssystemen vor allem moderne, elektronische (ESTW) bzw. Digitale Stellwerke (DSTW), welche die gesteuerten Balisengruppen direkt ansteuern können [72], zum Einsatz kommen. Ein solch integriertes ETCS-Stellwerk für Level 1 ist z. B. seit 2022 in Luxemburg im Einsatz [41, 67]. Zusätzlich ermöglicht es gegenüber vielen Bestandssystemen den Einsatz automatisierter Funktionen. Als Trends des Level 1 hat Stadlbauer [122] bspw. verbesserte Diagnosemöglichkeiten, Eingabemöglichkeiten für Langsamfahrstellen und eine verbesserte Signalisierung über mehrere Abschnitte identifiziert.

Die detaillierte Systembeschreibung des Level 1 im Rahmen dieser Arbeit erfolgt in Abschnitt 3.1 auf Seite 23. Für eine darüber hinaus gehende Beschreibung vor allem in Bezug auf die Eigenschaften von ETCS Level 2 sei auf Schnieder [109] und Trinckauf et al. [127] verwiesen.

2.3.3 Entwicklung

Die Spezifikationen in ihrem aktuellen Stand haben eine Historie über die vergangenen 30 Jahre, in denen die Teilsysteme des Schienenverkehrs schrittweise harmonisiert wurden und werden. Daher spiegeln sich die Fortschritte bei der Harmonisierung des rechtlichen Rahmens (vgl. Abschnitt 2.2 auf Seite 5) auch in den Entwicklungsstufen der technischen Lösungen wider. Die ersten, als zwischenzeitlich finaler Stand bezeichneten Dokumente der ETCS-System Requirements Specifications (SRS) wurden im Jahr 1999 veröffentlicht (SRS-Version 1.0.0; siehe Änderungshistorie des Subset 026 [143]).

In der zeitlichen und insbesondere funktionalen Beschreibung der unterschiedlichen Systemstände von ETCS sind folgende Begrifflichkeiten abzugrenzen:

- Baseline,
- SRS-Version,
- Systemversion (SV),
- Set of Specification.

Die im Alltag bisher gebräuchlichste Unterscheidung sind die sogenannten *Baselines*, welche genaue Stände der Spezifikationen benennen. Bis heute wurden insgesamt drei *Baselines* mit diesem Begriff definiert (2, 3 und 4). Innerhalb einer *Baseline* können mehrere *Releases* vorkommen. Diese wurden unterschiedlich bezeichnet, beispielsweise als nummerierter *Maintenance Release* mit geringen Anpassungen gegenüber einem früheren Stand oder als nummerierter *Release*, um größere Änderungen kenntlich zu machen.

Jedem *Release* einer *Baseline* ist eine Version der SRS zugeordnet, umgekehrt ist dies jedoch nicht der Fall. Die SRS-Versionen bestimmen sich anhand der Versionsnummer des zentralen Subset 026 [143–151]. Die unterschiedlichen Versionen der SRS werden anhand des in der Softwareentwicklung weit verbreiteten Standards *Semantic Versioning* dreistufig mit durch einen Punkt getrennten Zahlen bezeichnet [278]. Dabei ist die Nomenklatur $Major.Minor.Patch$, um direkt anhand der Differenz der Versionsnummer die Tragweite enthaltener Änderungen ablesen zu können.

Die Systemversionen sind ebenfalls semantisch versioniert, allerdings lediglich zweistufig. Dafür wird in den Spezifikationen die Kurzform $X.Y$ genutzt, bei dem X als *System Version Number* bezeichnet wird. Sie gruppiert miteinander kompatible SV, also jene SV mit demselben X, aber unterschiedlichem Y. Alle Systemversionen sind grundsätzlich vollständig abwärtskompatibel und enthalten immer alle Funktionalitäten der niedrigeren SV. Der kleinste gemeinsame Nenner unterstützter SV von Fahrzeug und Infrastruktur bestimmt die SV, in der die beiden Teilsysteme kommunizieren und Funktionen nutzen können. Alle Details zum Management der SV sind im Subset 104 [161] enthalten.

Zum Einfrieren eines festen Standes der Spezifikationen aller Teilsysteme wurden in der Vergangenheit insgesamt drei *Sets of Specifications* festgelegt. Im Jahr 2006 wurde das *Set of Specifications 1* (*Baseline 2*) mit der SRS-Version 2.3.0 eingefroren. Das *Set of Specifications 2* als *Baseline 3 Maintenance Release 1* der SRS-Version 3.4.0 folgte 2014, bevor zwei Jahre später bereits das *Set of Specifications 3* mit der SRS-Version 3.6.0 als *Baseline 3 Release 2* folgte.

Die vorliegende Arbeit basiert auf der im September 2023 veröffentlichten, aktuellen SRS-Version 4.0.0 (*Baseline 4 Release 1*) von ETCS [143]. Neu wird dies als „*Single Set of Specifications*“ bezeichnet. Die darin enthaltenen Systemversionen (2.1, 2.2, 2.3 sowie 3.0) werden im Folgenden bei Bedarf differenziert betrachtet. Grundsätzlich entspricht die Systemversion 2.1 der bisherigen *Baseline 3 Release 2* (SRS-Version 3.6.0) mit Fehlerkorrekturen. Die Systemversion 2.2 enthält zusätzlich die Erweiterungen für ATO in den Grades of Automation (GoA) 1 und 2 sowie weitere Fehlerkorrekturen. Der neue Betriebsmodus *Supervised Manoeuvre (SM)*

ist ab der Systemversion 2.3 verfügbar. Die Systemversion 3.0 zuletzt enthält neben fahrzeugseitigen Verbesserungen auch Vorbereitungen für FRMCS. Das Subset 026-6 [148] definiert die Unterschiede der aktuell unterstützten SV der aktuellen Baseline 4. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden – sofern notwendig – die Unterscheidungen daher anhand der unterstützten SV vorgenommen.

Dass die vollständigen Spezifikationen von ETCS und aller seiner Teilsysteme und Bestandteile vollkommen öffentlich verfügbar sind, kann als großer Meilenstein in der Systementwicklung angesehen werden. Bisher wurden solche Spezifikationen oder die erstellten Lastenhefte solcher Systeme meistens gar nicht veröffentlicht, nur teilweise veröffentlicht oder erst am Ende des Lebenszyklus der Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Dies kann sicher als einer der Erfolgsfaktoren von ETCS angesehen werden, neben dem wirtschaftlichen Vorteil für Lieferanten und Besteller, eine entwickelte Lösung auf einem größeren Markt anbieten zu können. Dies führt dazu, dass ETCS seit einiger Zeit nicht nur innerhalb der EU, sondern praktisch weltweit zum Einsatz kommt oder der Einsatz geplant ist.

2.3.4 ETCS weltweit

Die meisten (europäischen) Staaten fokussieren sich bei der Einführung von ETCS auf den Level 2. Grund hierfür ist unter anderem die Ausrüstungsverpflichtung auf den wichtigen Korridoren (siehe Abschnitt 2.2 auf Seite 5), sodass im Sinne einer einheitlichen Technik auch die übrige Infrastruktur damit ausgerüstet wird. Des Weiteren ermöglicht Level 2 für die EIU die größte Reduktion der streckenseitigen Ausrüstung. So können bspw. komplexe Lichtsignale gegen einfache ETCS Marker Boards (gemäß [141]) getauscht werden. Zuletzt kann ETCS Level 2 auf hochbelasteten Mischverkehrsstrecken vorteilhaft für die Kapazität sein. Allerdings benötigen solche Infrastrukturen eine redundante Funkausleuchtung, um die notwendige kontinuierliche Kommunikation zu gewährleisten. Für kleinere bzw. nicht-staatliche EIU können solche Investitionen wirtschaftlich nicht sinnvoll oder nicht tragbar sein.

In den meisten Fällen ist die Ausrüstung mit ETCS aufgrund hoher Kosten und großer Komplexität des Systems deutlich langsamer als ursprünglich geplant. Ein Grund hierfür liegt unter anderem in der zwingenden Notwendigkeit, bestehende Stellwerke umfassend zu erneuern oder vollständig zu ersetzen. Eine Auswahl des streckenseitigen Umsetzungsstands einiger Länder wird im Folgenden gegeben.

In Österreich haben die staatlichen Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB) etwa 460 km ETCS Level 2 ausgerollt und planen, diese zum Jahr 2038 auf etwa 3700 km zu erhöhen. Damit soll das Kernnetz vollständig ausgerüstet sein [277]. Das restliche Netz wird voraussichtlich ebenfalls vollständig mit ETCS Level 2 ausgerüstet und Bestandstechniken abgelöst werden, sodass für das Jahr 2040 netzweit der Zustand „ETCS only“ erreicht sein soll [46].

Das belgische EIU Infrabel ist einer der Vorreiter in Bezug auf den Anteil der mit ETCS ausgerüsteten Strecken. Dabei wird die Strategie verfolgt, entsprechend der betrieblichen Erfordernisse eine abgestufte Ausrüstung anzuwenden. Dies führt dazu, dass auf 6399 km

auszurüstender Strecke die vier Ausprägungen Level 1 LS, Level 1 FS, Level 2 sowie eine Kombination aus Level 1 und 2 eingesetzt wird. Anfang Dezember 2025 waren 99 % des im Masterplan enthaltenen Streckennetzes mit ETCS in Betrieb. Damit ist die Vollausrüstung fast erreicht [275].

Der Infrastrukturbetreiber in Frankreich, Société Nationale des Chemins de Fer Français (SNCF) Réseau, hat bislang lediglich die sich aus der TEN-Verordnung ergebenden Zeitschienen zur Ausrüstung mit ETCS kommuniziert. Diese umfasst 17 100 km bis zum Jahr 2050 [281].

In Dänemark plant das staatliche EIU Banedanmark, die gesamte Infrastruktur bis 2033 mit ETCS Level 2 ausgerüstet zu haben [262]. Das norwegische EIU Bane NOR hat 2024 mit der Umrüstung auf ETCS begonnen. Bis 2034 sollen basierend auf dem aktuellen Plan [4] das aus über 4000 km Strecke und 300 Bahnhöfen bestehende Netz vollständig mit Level 2 ausgerüstet sein [261].

Finnland strebt an, unter dem Projektnamen „Digirail“ [267] das gesamte Eisenbahnnetz bis 2040 mit ETCS Level 2 auszurüsten [26]. In der Voranalyse waren aus wirtschaftlicher Sicht die untersuchten Lösungen mit Level 1 und Level 2 gleich auf, letztere bietet dem Infrastrukturbetreiber jedoch eine größere Flexibilität [99]. Als Besonderheit sollen die ETCS-Daten in Finnland nicht über GSM-R, sondern über die bereits vorhandenen drei öffentlichen Mobilfunknetze übertragen werden. Mit Ausnahme sehr weniger Stellen im Eisenbahnnetz konnte in einer landesweiten Untersuchung 2023 festgestellt werden, dass Abdeckung und Funknetzkapazitäten mehr als ausreichend sind, um alle Anforderungen der aktuellen Spezifikationen sowie der Spezifikationsentwürfe für FRMCS zu erfüllen [57]. Übergangsweise wird dort öffentliches Long Term Evolution (LTE) (4G) sowie teilweise 5G-Technik zum Einsatz kommen, bevor marktreife Produkte für einen vollständigen Roll-out von FRMCS über öffentliches 5G zur Verfügung stehen.

In Irland wird das Netz trotz abweichender Spurweite zukünftig mit Level 1 FS ausgestattet, um die bestehenden Systeme abzulösen [180].

Zu den Ländern, die bereits heute eine praktisch vollständige Ausrüstung mit ETCS auf dem regelmäßig befahrenen Normalspurnetz vorweisen können, gehören die Schweiz und Luxemburg. In der Schweiz wird auf dem Normalspurnetz von den SBB, der BLS AG und der Schweizerischen Südostbahn AG (SOB) eine Kombination von ETCS Level 2 und 1 angewendet. Level 1 kommt dabei in der Betriebsart LS zum Einsatz und ermöglichte eine schnelle Schaffung von Interoperabilität im Bestand ohne größere Anpassungen der bestehenden Sicherungstechnik. Die ERTMS-Strategie des BAV sieht im Zielbild eine vollständige Ausrüstung mit Führerstandssignalisierung vor [16]. Dies kann sowohl mit Level 2 als auch mit Level 1 erreicht werden, bedeutet aber auch mittelfristig den Ersatz der vorhandenen Level 1-LS-Ausrüstungen, da diese keine solche Führerstandssignalisierung bieten können. In Luxemburg hat sich die Société Nationale des Chemins de Fer Luxembourgeois (CFL) entschieden, landesweit ETCS Level 1 FS einzusetzen. Die Gründe für diese Entscheidung haben Arend et al. [2] dargelegt. Sie umfassen die Trennung der unterschiedlich langen Entwicklungszyklen von Funktechnik und Eisenbahnsicherungstechnik, den betrieblichen Wunsch nach veränderlichen Außensigna-

len für die Rückfallebene sowie marginale Vorteile gegenüber einer Lösung mit Level 2. Nach dem ersten Schritt der netzweiten Einführung von Level 1 FS mit Bestandsstellwerken zur deutlichen Erhöhung der Sicherheit wird derzeit eine neue Generation mit dem Ziel eines besseren Betriebs ausgerollt. Diese stellt de facto ein integriertes ETCS-Stellwerk für Level 1 dar [39].

Auch im nicht-europäischen Ausland hat sich ETCS etabliert und ist dort in mehr als 25 Staaten im Einsatz oder in der Ausführungsplanung. Die Staaten mit den meisten ETCS-Strecken nach Kontinent waren Ende 2023 gemäß [283]:

- Afrika: Saudi-Arabien, Algerien, Ägypten;
- Asien: Türkei, Südkorea, Taiwan;
- Australien: Australien, Neuseeland;
- Nordamerika: Mexiko;
- Südamerika: Brasilien, Uruguay, Chile.

ETCS Level 1 wird beispielsweise in Thailand für eine im Jahr 2021 neu in Betrieb genommene Stadtschnellbahn im Großraum Bangkok angewendet, eine weitere Ausrüstung des landesweiten Eisenbahnnetzes damit ist geplant [56].

2.3.5 ETCS in Deutschland

Das EBA wies im Nationalen Umsetzungsplan ETCS [30] mit dem Stand Oktober 2017 etwa 252 km mit ETCS ausgerüstete Eisenbahnstrecken aus. Dabei kam ausschließlich ETCS Level 1 LS oder Level 2 zur Anwendung. Level 2 sollte hauptsächlich als Ersatz für die abgekündigte Linienförmige Zugbeeinflussung (LZB) sowie zur Kapazitätssteigerung zum Einsatz kommen, Level 1 LS auf den übrigen Strecken, insbesondere zur schnellen Erreichung einer durchgehenden Befahrbarkeit der TEN-Korridore mit ETCS. Bis 2023 sollten laut desselben Umsetzungsplans weitere 1818 km Strecke ETCS erhalten, vorrangig im TEN-Korridor A „Rhein-Alpen“. Zusätzliche 202 km waren darüber hinaus für die Zukunft nach 2023 priorisiert. Demnach ergaben sich für einen nicht näher definierten Zeitpunkt nach 2023 2272 km geplante ETCS-Strecken in Deutschland, was einem Anteil von etwa 6 % des gesamten deutschen Schienennetzes entsprochen hätte.

Im folgenden Nationalen Umsetzungsplan Deutschland vom Juli 2024 [91] werden die mit ETCS ausgerüsteten Streckenkilometer zum Jahresende 2023 mit 555 km angegeben. Damit wurde von der ursprünglich angestrebten Menge lediglich knapp ein Viertel tatsächlich erreicht. Auf das Gesamtnetz der DB InfraGO AG bezogen waren also zum Ende des Jahres 2023 gut 1,5 % der Streckenkilometer mit ETCS ausgerüstet. Der weiterhin angestrebte Zielzustand von flächendeckendem ETCS Level 2 ohne Signale (oS) sollte im Jahr 2043 erreicht sein. Die Verzögerungen ergaben sich bisher aus der Komplexität der Aufgabe (gerade bei Doppelausrüstung der Infrastruktur mit ETCS und Punktförmiger Zugbeeinflussung (PZB)), der notwendigen Abstimmung der Ausrüstung von Infrastruktur und Fahrzeugen sowie insbesondere einer unklaren Finanzierungssituation sowohl strecken- als auch fahrzeugseitig.

In ihrer im Jahr 2024 veröffentlichten Migrationsstrategie plante die DB InfraGO AG für die Infrastruktur der EdB die Inbetriebnahmen von ETCS bis zum Ende des Jahres 2029. Bis dahin sollten Strecken mit einer summierten Länge von 5090 km mit ETCS ausgerüstet werden. Dies entsprach etwa 15 % der gesamten Streckenlänge der DB InfraGO AG von 34 065 km und sollte den Großteil des besonders belasteten und wichtigen Kernnetzes umfassen. Im Dezember 2024 wurde an selber Stelle mitgeteilt: „Aufgrund der fehlenden Bundeshaushaltsbeschlüsse und offener Fragen zur vorläufigen Haushaltsführung stehen aktuell wichtige Prämissen in der Finanzplanung der DB nicht fest.“ Eine aktualisierte Migrationsstrategie wurde im Juli 2026 veröffentlicht [264] und umfasst alle ETCS-Maßnahmen bis zum Jahresende 2031. Demnach wird angestrebt, bis dahin 525 km neu mit ETCS Level 2 auszurüsten sowie auf weiteren 217 km ein Upgrade bestehender ETCS-Ausrüstungen auf eine höhere Systemversion vorzunehmen.

Die circa 190 NE-EIU [31] sind daher derzeit zurückhaltend in Bezug auf ETCS, solange keine konkreten Planungen seitens der DB InfraGO AG für die anschließenden Strecken bestehen und die Finanzierung nicht gesichert ist. Der VDV als Dachverband treibt das Thema ETCS dennoch voran. Die Vorzugslösung der NE-EIU ist die Ausrüstung mit einem kostengünstigen System geringer Komplexität, das dennoch langfristig auch national den interoperablen Betrieb ermöglicht. Daher planen viele NE-Bahnen den Einsatz von ETCS Level 1 in der Betriebsart FS. Ein erstes Projekt inklusive Erstellung eines Lastenhefts bei einer NE [88] wurde jedoch nicht weiter verfolgt und mündete daher auch nicht in einer Ausrüstung. Aktuell werden unter der Federführung des VDV einheitliche, nationale Planungsregeln und Lastenhefte für ETCS Level 1 FS erstellt [137], die in weiten Teilen auf den in dieser Arbeit vorgestellten Überlegungen basieren.

2.4 Betriebliches Regelwerk

Neben der technischen Komponente besitzt ETCS als Zugsicherungssystem direkte Wechselwirkungen mit dem betrieblichen Regelwerk. Das betriebliche Regelwerk sind Vorschriften des EIU und z. T. auch des Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU), wie sich Betriebspersonal zu verhalten und wie es technisch Einrichtungen zu bedienen hat, um einen sicheren Eisenbahnbetrieb zu gewährleisten. Im Kontext von ETCS betrifft dies insbesondere die Fahrdienstvorschriften, in denen die EIU ihre Regeln sowohl für die Fdl als auch für die Tf festschreiben. Das betriebliche Regelwerk muss dabei nicht nur den Regelbetrieb, sondern auch den gestörten Betrieb bzw. den Betrieb in der Rückfallebene sowie den Übergang zwischen beiden Regimen umfassen. Die bisherigen betrieblichen Regeln unterscheiden sich im Bestand von Land zu Land und teilweise auch zwischen zwei EIU im selben Land mitunter erheblich, da auch in diesem Themenfeld die Entwicklung bisher stark national geprägt war.

Wie in Abschnitt 2.2.1 auf Seite 5 eingeführt, werden neben den technischen Aspekten auch betriebliche Themen schrittweise europaweit harmonisiert. Die TSI OPE [230, 233, 234] enthält daher Festlegungen zu Prozessen im Betrieb mit ETCS. Diese gelten jedoch nicht un-

mittelbar, sondern müssen in die Betriebsregelwerke der einzelnen EIU überführt werden. Bestandteile der TSI OPE sind Betriebsgrundsätze und -Vorschriften beim Betrieb mit ETCS, allgemeine Betriebsvorschriften und betriebliche Grundsätze und Festlegungen zur sicherheitsrelevanten Kommunikation zwischen am Betrieb beteiligten Personen.

Im Anwendungsfall Deutschland ist das grundlegende betriebliche Regelwerk, die Fahrdienstvorschrift, selbst im Bereich der normalspurigen Eisenbahnen nicht vereinheitlicht, sondern unterscheidet sich in Abhängigkeit des Eigentums der Infrastruktur und des angewendeten Betriebsverfahrens. Der weit überwiegende Teil der deutschen Eisenbahninfrastruktur wird im Zugmeldebetrieb nach der Richtlinie (Ril) 408 der DB InfraGO AG [190] betrieben. Die Richtlinien dieser Richtlinienfamilie enthalten Vorschriften für die Fdl und Tf. Im Zuge der fortschreitenden Digitalisierung des Eisenbahnsystems war geplant gewesen, die Ril 408 schrittweise durch die neu entwickelte Ril 400 als „Fahrdienstvorschrift für den digitalen Bahnbetrieb“ abzulösen [266]. Dieses Projekt wurde jedoch zwischenzeitlich zurückgestellt. Wie die Bedienung der Zugbeeinflussungsanlagen auf dem Fahrzeug bei ETCS vorzunehmen ist, regelt für die EdB die Ril 483.0701 [198].

Auf Infrastrukturen von NE kommt die entsprechende Fahrdienstvorschrift für Nichtbundeseigene Eisenbahnen (FV-NE) [221] zur Anwendung. Aktuell enthält diese noch keine Festlegungen für einen Betrieb mit ETCS, da bisher keine Infrastruktur, auf der sie zur Anwendung kommt, mit ETCS ausgerüstet ist. Für den Bereich des Zugleitbetriebs mit oder ohne technischen Unterstützung sowie den Signalisierten Zugleitbetrieb mit oder ohne ESTW existieren eigene Regelwerke. Bei Zugleitbetrieb (ZLB) im Bereich der DB InfraGO AG kommt als Fahrdienstvorschrift die Ril 438 [195] zur Anwendung. Diese entspricht inhaltlich vollständig der FV-NE [221]. Weitere relevante Richtlinien der DB sind die Ril 436 [181] mit allgemeinen Regeln zum ZLB sowie die Ril 437 [182] zum Signalisierten Zugleitbetrieb.

Teile des betrieblichen Regelwerks sind nach dem Stand der Technik auch weitere Richtlinien der DB sowie Schriften des VDV. Sowohl EVU als auch EIU geben ihren jeweiligen Mitarbeitenden sowie im Falle der EIU auch den Mitarbeitenden der auf ihrer Infrastruktur verkehrenden EVU weitere Regeln zur Gewährleistung eines sicheren Bahnbetriebs vor. Diese können beispielsweise örtliche, technische oder betriebliche Besonderheiten betreffen.

2.5 Technisches Regelwerk

Im technischen Regelwerk werden die Auslegung, die Planung und auch der Bau und die Inbetriebnahme von Anlagen und Komponenten des Eisenbahnsystems beschrieben. Auch das technische Regelwerk des deutschen Eisenbahnsystems ist der Trennung in EdB und NE unterworfen.

Für die Infrastruktur der DB ist die Richtlinienfamilie 819 [217] Planungsgrundlage für alle Anlagen der Leit- und Sicherungstechnik (LST) und damit auch für ETCS. Die Inhalte sind in die einzelnen Richtlinien thematisch unterteilt. Historisch bedingt wird ETCS dort in den

beiden Ausprägungen Level 1 LS – auch bezeichnet als ETCS Signalgeführt (ESG) – und Level 2 behandelt. Aufgrund der technischen Verwandtschaft, Funktionalitäten und Arbeitsumgebung sind vor allem die grundlegenden Richtlinien zu Level 2 für die vorliegende Arbeit von Interesse. Konkret sind dies:

- Ril 819.1340 | Grundsätze für die Ausrüstung mit ETCS [208];
- Ril 819.1343 | Grundsätze zur Erstellung der Entwurfsplanung zur Ausrüstung von Strecken mit ETCS Level 2 [209];
- Ril 819.1344 | Grundsätze zur Erstellung der Ausführungsplanung PT1 für ETCS Level 2 [210];
- Ril 819.1347 | Vorgaben bei Doppelausrüstung (ETCS und PZB/LZB) [211];
- Ril 819.1350 | Balisengestützter Systemwechsel von Class-B Systemen (ETCS-basierte Transition) Grundsätze für das Ausrüsten von Strecken [212].

Ergänzt wird die Richtlinienfamilie 819 um die sich im Aufbau befindliche Richtlinienfamilie 848 [218] für den Themenkomplex „Digitale Bahntechnik“.

Bedingt durch die bisherige Zurückhaltung können die NE aktuell kein technisches Regelwerk vorweisen, welches über ESTW und konventionelle Zugbeeinflussungssysteme hinausgeht. Entsprechende Arbeiten zur Veröffentlichung einer initialen VDV-Mitteilung mit Festlegungen zu ETCS Level 1 FS sollen im zweiten Halbjahr 2026 abgeschlossen sein [137]. Bisher bekannte Stellwerks- und Zugbeeinflussungstechnik wird bei den NE anhand der VDV-Schrift 361 [225] ausgeführt.

3 Stand der Technik und Forschung

3.1 Systembeschreibung ETCS

3.1.1 Teilsysteme

Im Subset 026 der ETCS-Spezifikationen [143] werden die beiden Teilsysteme Fahrzeug und Strecke des ETCS-Systems definiert. Nicht alle spezifizierten Bestandteile sind in allen Anwendungsfällen obligatorisch (siehe auch Abschnitt 3.1.2 auf Seite 26). Die Systemumgebung von ETCS wird komplettiert durch das Triebfahrzeug bzw. den Zug mit den fahrzeugseitigen Schnittstellen, den Tf und durch externe Systeme der streckenseitigen LST wie Stellwerke und Leitstellen. Die Spezifikationen decken weiterhin die jeweiligen Schnittstellen zwischen ETCS und Zug, Tf sowie den weiteren Komponenten und Systemen auf Seite des Fahrzeugs ab. Nicht Teil der ETCS-Spezifikationen sind hingegen die Anbindung an Stellwerke und Leitstellen. Abbildung 3.1 zeigt eine schematische Darstellung der grundlegenden Systemarchitektur von ETCS mit seinen Teilsystemen und jeweiligen Komponenten.

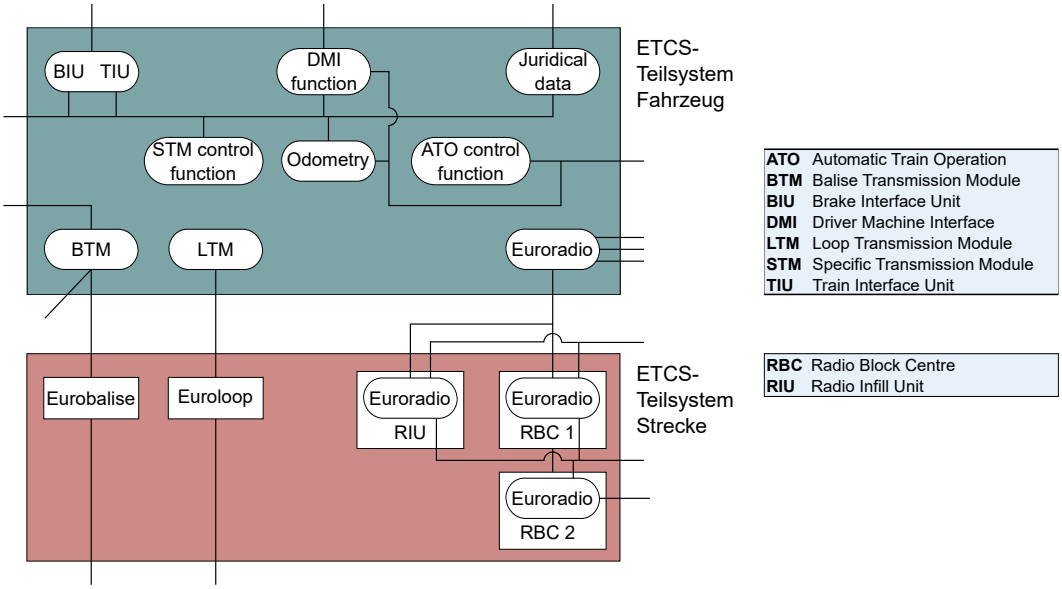


Abb. 3.1: Vereinfachte Systemarchitektur von ERTMS/ETCS. Nicht alle dargestellten Komponenten sind verbindlich vorgeschrieben. Eigene Darstellung in Anlehnung an [144].

Teilsystem Strecke

Zentraler Bestandteil der streckenseitigen ETCS-Ausrüstung sind die Eurobalisen [152]. Diese Transponder im Gleis werden von der Fahrzeugantenne durch Induktion mit Energie versorgt und senden Informationen (Telegramme) von der Strecke an das sie überfahrende

Fahrzeug. Diese Übertragungsrichtung wird als *up-link* bezeichnet. Eine umgekehrte *down-link*-Übertragung vom Fahrzeug an die Strecke und weiter an ein Stellwerk oder weitere angeschlossene Systeme über Balisen ist in den Spezifikationen nicht mehr vorgesehen. Diese Funktionalität wurde bereits in der frühen Systementwicklung wieder verworfen.

Die Balisen können entweder stets das gleiche Telegramm übertragen (Festdatenbalise bzw. ungesteuerte Balise) oder je nach Zustand anderer streckenseitiger Systeme unterschiedliche Telegramme senden (Transparentdatenbalise bzw. gesteuerte Balise). Festdatenbalisen werden beispielsweise zur Ortungskorrektur genutzt oder um nicht veränderliche Streckeneigenschaften (z. B. Neigungsverhältnisse) zu übertragen. Festdatenbalisen sind rein passive Elemente und besitzen weder eine Energie- noch eine Datenverbindung, sodass sie vor der Inbetriebnahme einmalig programmiert werden müssen. Änderungen des Baliseninhalts sind danach nur noch per Neuprogrammierung im Feld oder Tausch der Balise möglich.

Transparentdatenbalisen hingegen können auch veränderliche Informationen wie eine MA übertragen. Die notwendigen Telegramme werden dabei direkt im Stellwerk oder in einer Line side Electronic Unit (LEU) ausgewählt. Dabei nutzt die LEU vorliegende Informationen aus den Signalstellungen per Abgriff der Signallampenströme oder Flügelschalter sowie ggf. aus Weichenlagensensoren. Die einzelnen Balisen werden in Gruppen aus bis zu acht Balisen [145] in einer beliebigen Kombination aus Fest- und Transparentdatenbalisen zusammengefasst und als Balisengruppe (BG) bezeichnet. Sobald innerhalb einer Balisengruppe mindestens eine gesteuerte Balise enthalten ist, wird auch die BG als „gesteuert“ bezeichnet; andernfalls ist sie „ungesteuert“.

Die Übertragung jeglicher Informationen rein punktuell über Balisengruppen, was Kernmerkmal des Level 1 ist, kann in gewissen Anwendungen betriebliche und kapazitive Nachteile bringen, da das System eine hohe Latenz bei Signalaufwertungen aufweisen kann. Um diesem entgegenzuwirken, wurden Euroloops und Radio Infill entwickelt und spezifiziert. Euroloops gemäß [153] sind im Gleis verlegte Leckkabel, welche in einem begrenzten Bereich – typischerweise an einem Bahnsteig oder im Annäherungsbereich eines Hauptsignals – eine kontinuierliche bzw. ständige Datenübertragung an das Fahrzeug ermöglichen. Funktional betrachtet die gleiche Aufgabe übernehmen RIU, jedoch mit dem Unterschied, dass die Datenkommunikation zwischen Zug und Strecke per Funk über GSM-R erfolgt. Auch hier ist die Reichweite dieser semi-kontinuierlichen Ergänzung im Regelfall auf den Bahnsteigbereich oder auf den Annäherungsbereich eines Hauptsignals begrenzt. Beide semi-kontinuierlichen Lösungen sind für Neuausrüstungen gemäß TSI nicht mehr zugelassen und werden daher im weiteren Verlauf dieser Arbeit auch nicht berücksichtigt.

Im Level 2 erfolgt eine bidirektionale Kommunikation zwischen Zug und Strecke über eine dauerhaft vorhandene Funkverbindung. Streckenseitig kommuniziert das Fahrzeug mit dem jeweils zuständigen Radio Block Centre (RBC), von dem es als primäre Information seine MA erhält. Das RBC selbst generiert diese MA durch das Auswerten der Stellwerksinformationen angeschlossener Stellwerke. Die Kommunikation erfolgt derzeit über GSM-R und zukünftig über FRMCS.

Teilsystem Fahrzeug

Zentrale Komponente einer jeden ETCS-Fahrzeugausrüstung ist der European Vital Computer (EVC), der als sicheres Rechnersystem die Software enthält und mit allen angeschlossenen Komponenten und vorhandenen Schnittstellen kommuniziert. Das Euroradio ist für die Kommunikation über Funk zwischen Fahrzeug und Infrastruktur verantwortlich und kann mit den aktuellen Spezifikationen entweder GSM-R oder FRMCS als Übertragungstechnik nutzen. Zur kontinuierlichen Funkverbindung im Level 2 muss das Euroradio zwei gleichzeitige Verbindungen zu zwei unterschiedlichen RBC ermöglichen, damit ein nahtloser Wechsel (*Hand-off*) durchgeführt werden kann. Wird GSM-R oder FRMCS zusätzlich als Träger für digitalen Zugfunk genutzt, so erfolgt diese Verbindung außerhalb des ETCS-Systems über separate Technik.

Zwischen Fahrzeug und Strecke findet der Datenaustausch über die Komponenten Balise Transmission Module (BTM) (für Eurobalisen), Loop Transmission Module (LTM) (für Euroloops; optional) sowie die Antennen des Euroradio (für RBC und RIU) statt. Die entsprechenden Luftschnittstellen sind als Form Fit Function Interface Specification (FFFIS) spezifiziert. Innerhalb des Fahrzeugs können je nach Ausstattung National Train Control Systems (NTC) (*Class-B*-Systeme) über spezielle Specific Transmission Modules (STM) angebunden werden.

Um seine Funktion als Zugbeeinflussungssystem erfüllen zu können, besitzt die ETCS-Onboard Unit (OBU) direkten Zugriff auf die Bremsen. ETCS kann daher das Anlegen der Bremsen kommandieren und den Zustand der Bremsen überwachen. Technisch wird dies auf dem Fahrzeug über die Brake Interface Unit (BIU) gelöst. Die genaue Implementierung ist fahrzeugabhängig. Im einfachsten Fall wird die Hauptluftleitung (HL) des Triebfahrzeugs geöffnet, um die indirekten Bremsen anzulegen. Die Ansteuerung ggf. zusätzlich vorhandener Bremssysteme ist ebenfalls fahrzeugabhängig.

Weitere Fahrzeugfunktionen können über die Train Interface Unit (TIU) mittels elektrischer Schnittstellen oder Zugriff auf die Fahrzeugleittechnik direkt durch ETCS angesteuert werden. Dies umfasst beispielsweise das automatische Ein- und Ausschalten des Hauptschalters, das Heben und Senken des Stromabnehmers oder die Wahl des Stromsystems bei elektrischen Triebfahrzeugen mit Speisung aus der Oberleitung auch während der Fahrt. Nicht alle Funktionen sind auf jedem Fahrzeug implementiert. Die vollen Spezifikationen hierfür sind im Subset 034 [156] enthalten.

Essenziell für die korrekte Funktion von ETCS ist eine hinreichend genaue Ortung des Fahrzeugs in Bezug auf die befahrene Infrastruktur. Diese Odometrie nutzt im Regelfall eine Kombination unterschiedlicher Sensoren, um die Anforderungen an Genauigkeit und Sicherheit zu erfüllen. Grundlegend werden Wegimpulsgeber an den Radsätzen genutzt, um die Radumdrehungen zu zählen. Diese werden ergänzt beispielsweise durch Radare oder Beschleunigungssensoren. Die ausgewerteten Odometriedaten werden über eine definierte Schnittstelle an den EVC des Fahrzeugs weitergegeben.

Zuletzt zeichnet ein mit ETCS ausgestattetes Fahrzeug umfangreiche Daten über den Zustand des Zuges und sicherheitsrelevante Ereignisse auf. Dazu gehören unter anderem die

gefahrene Geschwindigkeit, der Zustand sicherheitsrelevanter Systeme sowie bestimmte Bedienhandlungen des Tf oder Systemeingriffe des Zugbeeinflussungssystems. Die Daten werden von der Juridical Recording Unit (JRU) [154] aufgezeichnet und zur späteren Auswertung beispielsweise nach einem Unfall auf einem geschützten Datenträger gespeichert.

Dem Tf steht als zentrale Ein- und Ausgabeschnittstelle des fahrzeugseitigen ETCS das einheitliche, zentrale Display im Führerstand, das DMI gemäß [160] zur Verfügung. Das DMI zeigt unter anderem die aktuelle Geschwindigkeit, ggf. aktuell ablaufende Bremskurven mit Zielentfernung und -geschwindigkeit, Level und Betriebsart, Text- und Warnmeldungen sowie eine abstrahierte Streckenvorschau an. Die Vorschau zeigt die vorausliegenden Neigungsverhältnisse und Geschwindigkeitsreduktionen an und kann ergänzt sein um weitere Streckenmerkmale wie bspw. Stellen, an denen der Stromabnehmer gesenkt oder der Hauptschalter ausgeschaltet sein muss. Über das DMI erfolgt auch die Eingabe von Zug- und Tf-Daten. Des Weiteren ist ein Quittierungstaster auf dem Führerpult vorhanden, mit dem bestimmte Zustände und Aktionen durch die Tf aktiv quittiert werden müssen.

3.1.2 Level und Betriebsarten

Um als universelles Zugbeeinflussungssystem auf theoretisch allen europäischen Strecken unterschiedlicher Charakteristiken und betrieblicher wie technischer Anforderungen einsetzbar zu sein, sind die vier Anwendungslevel („ERTMS/ETCS Application Level x“, bzw. in Kurzform „ETCS Level x“) 0, 1, 2 und NTC spezifiziert. Der Wechsel zwischen zwei der Level wird als *Level Transition* bezeichnet.

Level 0

Im Level 0 wird ein mit ETCS ausgerüstetes Fahrzeug auf einer Strecke betrieben, welche weder mit ETCS noch mit einem nationalen System ausgestattet ist oder auf der beides aktuell nicht in Betrieb ist, vgl. Abbildung 3.2 auf der nächsten Seite. Dadurch kann systembedingt lediglich eine statische, maximal zulässige Geschwindigkeit technisch überwacht werden. Die Höhe dieser Geschwindigkeit ergibt sich aus den dort gültigen National Values (NV) anhand der Maximalgeschwindigkeit in *Unfitted Areas*. Eine weitergehende Anzeige oder Überwachung von Signalbegriffen oder Geschwindigkeiten findet nicht statt, die Verantwortung für deren Beachtung liegt vollständig beim Tf. Die Gleisfreimeldung erfolgt – sofern vorhanden – konventionell über Achszähler oder Gleisstromkreise außerhalb des ETCS-Systems. Das fahrzeugseitige BTM ist aktiv, um mögliche *Level Transitions* aufnehmen und verarbeiten zu können. Außerdem müssen auch im Level 0 alle für ETCS relevanten Zugdaten eingegeben und bestätigt sein, um solche Transitionen fehlerfrei und ohne Halt durchführen zu können.

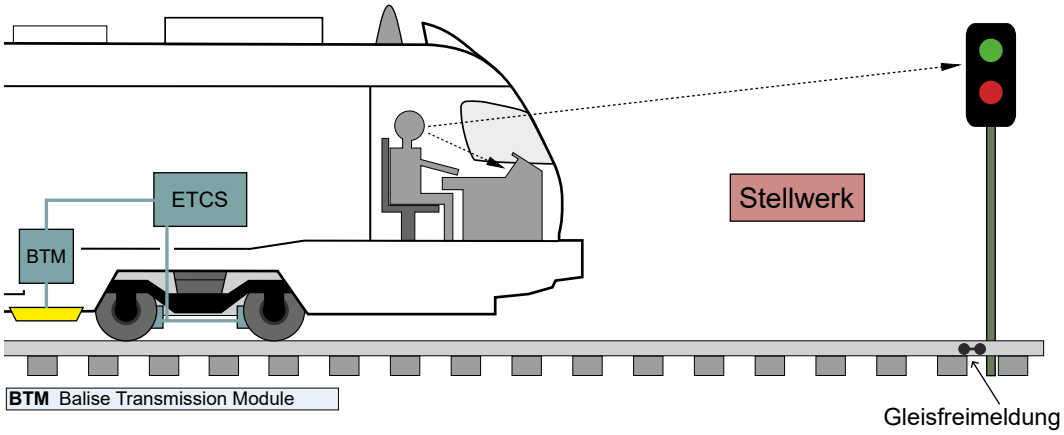


Abb. 3.2: Schema von ETCS Level 0. Eigene Darstellung in Anlehnung an [144].

Level 1

Der Level 1 ist definiert durch eine punktförmige Übertragung mittels Balisengruppen im Gleis und eine konventionelle, streckenseitige Gleisfreimeldung auf Basis von Achszählern oder Gleisstromkreisen. Bedingt durch die Übertragung über Balisengruppen können die Fahrzeuge nicht explizit adressiert werden; dem ETCS-System ist also nicht bekannt, welcher exakte Zug die bereitgestellten Informationen erhält. Es besitzt auch erstmal keine Kenntnis über die Zugeigenschaften. ETCS-Informationen können im Level 1 ausschließlich von der Strecke an das Fahrzeug übermittelt werden (unidirektional), es besteht kein Rückkanal.

Ohne kontinuierlichen technischen Infill (siehe weiter unten) sind veränderliche Außensignale notwendig, um optischen Infill unmittelbar vor dem Signalstandort und die Zustimmung zur Fahrt bei Halt vor einem Signal anzeigen zu können, vgl. Abbildung 3.3 auf der nächsten Seite. Technischer Infill kann ausschließlich über Balisengruppen an diskreten Stellen übertragen werden. Aus dieser Eigenschaft ergibt sich die zwingende Notwendigkeit, mit Release Speeds (RS) größer als 0 km/h zu projektieren. Abseits davon ist eine vollständige Führerstandssignalisierung mit der Anzeige von Führungsgrößen realisierbar. Das Fahrzeuggerät überwacht im Regelbetrieb kontinuierlich die zulässigen Geschwindigkeiten, Bremskurven und verhindert ein Überschreiten der Fahrterlaubnis.

Im Level 1 kann im Bestand mithilfe von Euroloops oder RIU ein semi-kontinuierlicher technischer Infill realisiert sein. Dies ist in Abbildung 3.4 auf der nächsten Seite dargestellt. In einem solchen System wird auf die veränderlichen Außensignale vollständig verzichtet, wenn diese auch in der Rückfallebene entbehrlich sind. Die RS kann bis auf 0 km/h gesenkt werden; ebenso ist eine technische Anfahrverhinderung bei Halt zeigenden Signalen realisierbar.

Level 2

Der Level 2 zeichnet sich dadurch aus, dass die Kommunikation zwischen Strecke und Zug funkbasiert ist. Hierfür kommt bisher GSM-R zum Einsatz, zukünftig FRMCS. Übergreifend

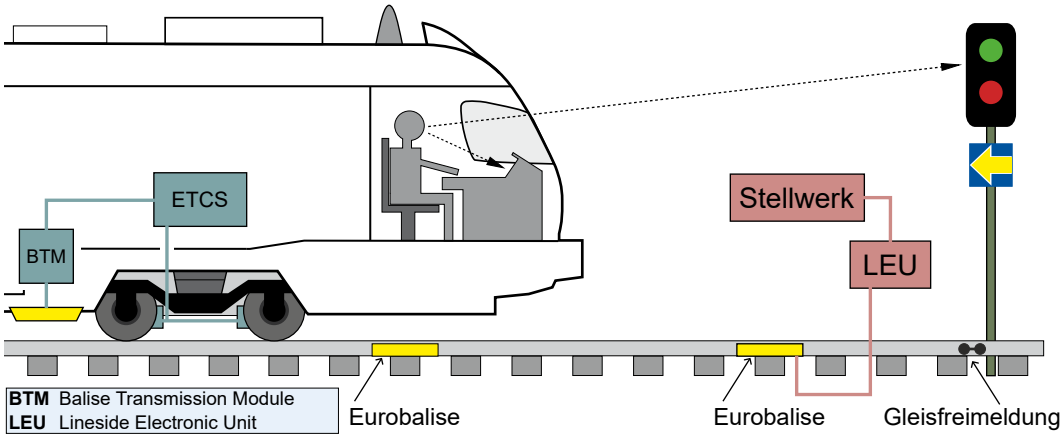


Abb. 3.3: Schema von ETCS Level 1 mit Infill via Eurobalisen. Eigene Darstellung in Anlehnung an [144].

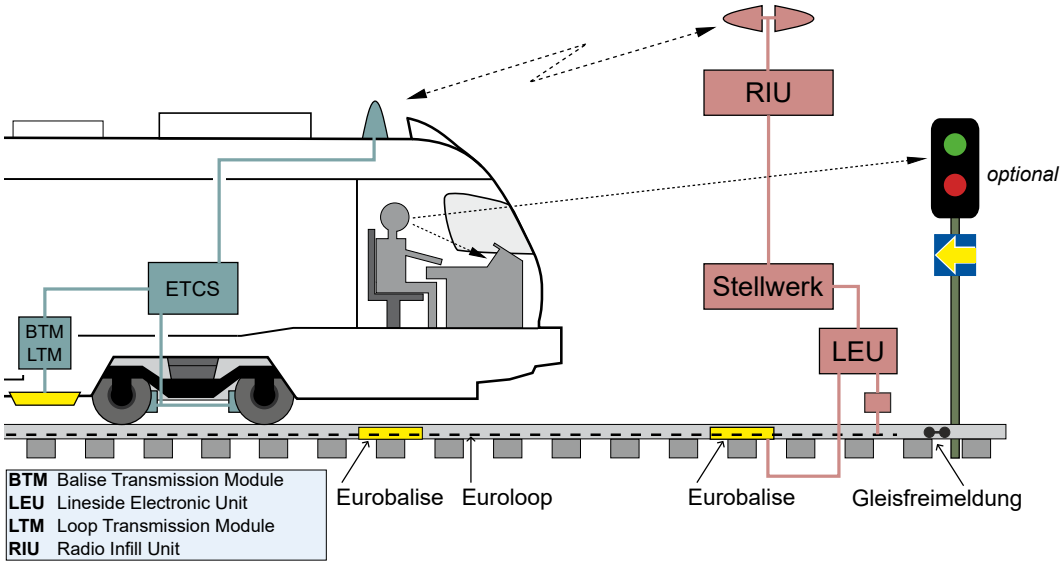


Abb. 3.4: Schema von ETCS Level 1 mit Infill via Euroloop oder RIU. Eigene Darstellung in Anlehnung an [144].

wird dies auch Euroradio oder RMR genannt. Die Funkverbindung besteht im Regelfall dauerhaft zwischen Fahrzeug und RBC und ermöglicht eine bidirektionale Kommunikation. Durch regelmäßige Positionsmeldungen der Fahrzeuge sind dem RBC stets die genauen Positionen der angemeldeten Fahrzeuge bekannt. Die ETCS-Daten werden explizit an die einzelnen Fahrzeuge adressiert. Balisengruppen kommen im Wesentlichen zu Ortungszwecken sowie zur Sicherung nicht am RBC angemeldeter Fahrzeuge zum Einsatz. Sie bestehen daher aus ungesteuerten Festdatenbalisen. Veränderliche Außensignale sind optional, beispielsweise als Rückfallebene oder wenn auch nicht mit ETCS ausgerüstete Züge auf der Strecke verkehren sollen (Doppelausrüstung). Sofern diese Aspekte nicht relevant sind, sind die ETCS *Stop Marker* ausreichend. Dies dient auch einer erheblichen Reduktion der Komplexität.

Die Gleisfreimeldung kann im Level 2 entweder konventionell streckenseitig über Achszähler bzw. Gleisstromkreise realisiert werden (siehe Abbildung 3.5) oder zugseitig erfolgen (siehe Abbildung 3.6 auf der nächsten Seite). Letzteres war früher auch als Level 3 bekannt.

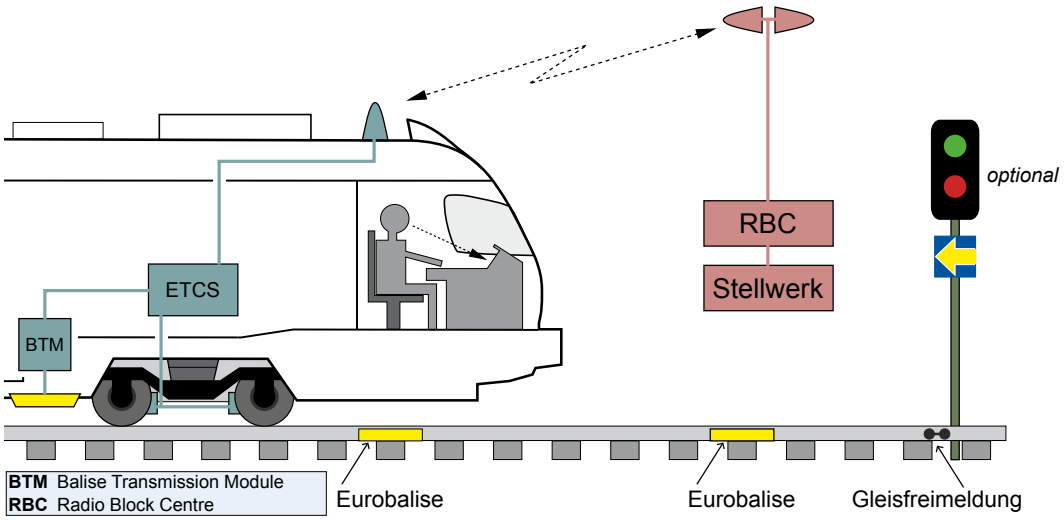


Abb. 3.5: Schema von ETCS Level 2 mit streckenseitiger Gleisfreimeldung. Eigene Darstellung in Anlehnung an [144].

Für eine zugseitige Gleisfreimeldung müssen die Fahrzeuge nicht nur regelmäßig die ermittelte Position der Zugspitze, sondern gleichzeitig auch eine sichere Position des eigenen Zugschlusses an das RBC senden, damit dieses daraus die Gleisbelegung ableiten kann. Voraussetzung hierfür ist die Ausrüstung der Züge mit einem Train Integrity Monitoring System (TIMS), welches dauerhaft und signaltechnisch sicher feststellen kann, dass der Zug vollständig (integer) ist und keine unbeabsichtigte Zugtrennung stattfand. Mit einer zugseitigen Gleisfreimeldung kann das Fahren im wandernden Raumabstand bzw. im Bremswegabstand (*Moving Block*) realisiert werden. Fest definierte Blockabschnitte sind weiterhin möglich und werden dann als „virtuelle Blöcke“ bezeichnet.

Level NTC

Der Level NTC kommt zur Anwendung, wenn ein mit ETCS ausgerüstetes Fahrzeug auf einer Infrastruktur verkehrt, auf der ausschließlich ein nationales Zugbeeinflussungssystem vorhanden und in Betrieb ist. Die Informationen des nationalen Systems werden über ein systemspezifisches STM zur weiteren Verarbeitung durch den EVC und zur Anzeige auf dem DMI übersetzt, siehe Abbildung 3.7 auf der nächsten Seite. Das ETCS-Fahrzeuggerät ist in diesem Betriebszustand aktiv, die Funktionalitäten und Überwachungen ergeben sich aus den Eigenschaften des nationalen Systems und befinden sich außerhalb der ETCS-Spezifikationen. Die Ausrüstung der Infrastruktur mit veränderlichen Signalen und Gleisfreimeldung ergibt sich aus den Anforderungen des jeweiligen nationalen Systems und liegt außerhalb des Regelungsbereichs von ETCS. Das ETCS-Fahrzeuggerät besitzt in diesem Zustand als einzig aktive ETCS-Funktion das

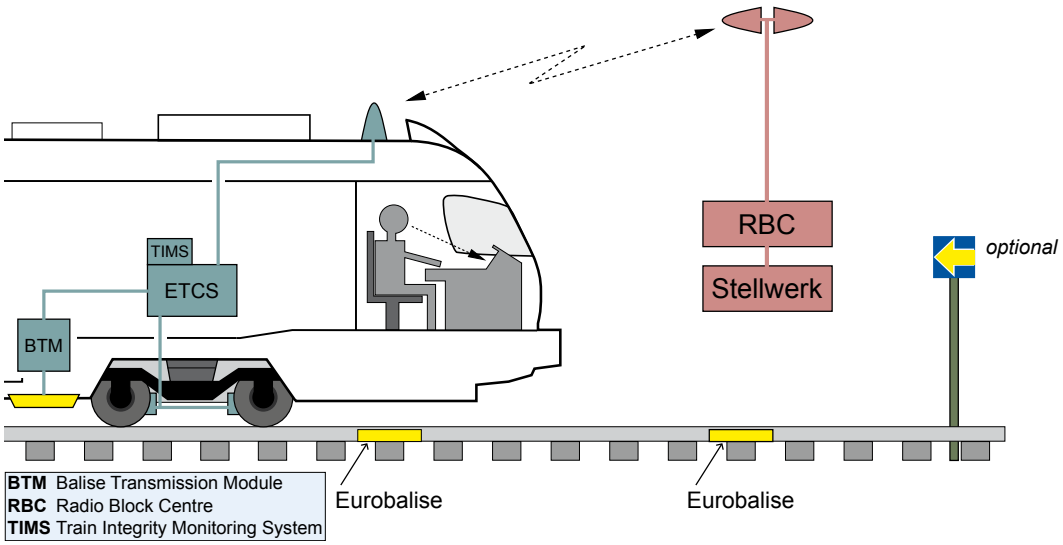


Abb. 3.6: Schema von ETCS Level 2 mit zugseitiger Gleisfreimeldung. Eigene Darstellung in Anlehnung an [144].

Lesen und Auswerten von Balisengruppen, damit eine balisenbasierte *Level Transition* in einen anderen ETCS-Level oder ein anderes NTC möglich ist.

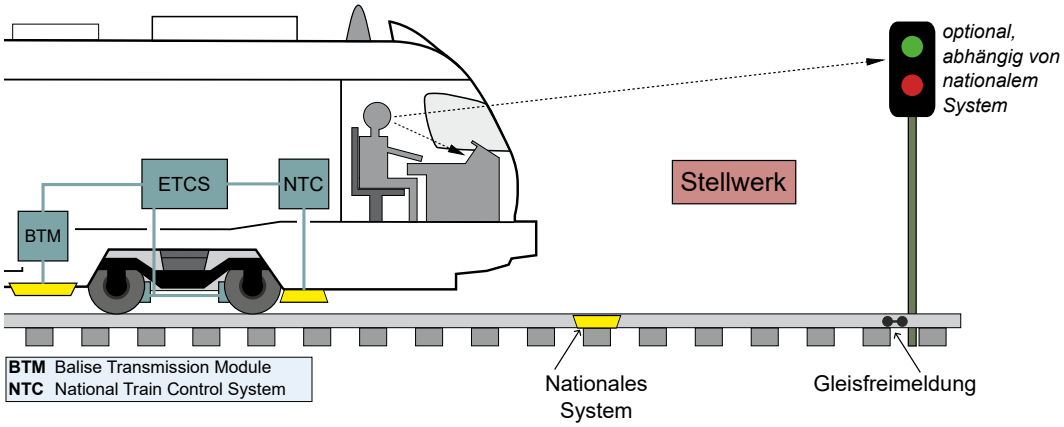


Abb. 3.7: Schema von ETCS Level NTC. Eigene Darstellung in Anlehnung an [144].

Betriebsarten

Neben den beschriebenen Leveln existieren weiterhin 19 Betriebsarten [146], welche den Systemzustand der ETCS-OBU genauer beschreiben. Ein Fahrzeug mit aktivem ETCS-Fahrzeuggerät befindet sich immer in genau einem der Level und genau einer zugehörigen Betriebsart. Die möglichen Kombinationen aus Level und Betriebsart sind in Tabelle 3.1 auf der nächsten Seite aufgeführt, da nicht alle Betriebsarten in allen Leveln möglich oder technisch sinnvoll sind. Die im Level 1 relevanten Betriebsarten werden im Anhang A vorgestellt und ihre möglichen Anwendungsszenarien generisch aufgezeigt.

Tab. 3.1: Verfügbarkeit (X) der ETCS-Betriebsarten nach Level, siehe [146].

Betriebsart	Kurzform	Level			
		0	1	2	NTC
Isolation	**IS**	X	X	X	X
No Power	**NP**	X	X	X	X
System Failure	**SF**	X	X	X	X
Sleeping	**SL**	X	X	X	X
Stand By	**SB**	X	X	X	X
Shunting	**SH**	X	X	X	X
Full Supervision	**FS**	–	X	X	–
Unfitted	**UN**	X	–	–	–
Staff Responsible	**SR**	–	X	X	–
On Sight	**OS**	–	X	X	–
Trip	**TR**	X	X	X	X
Post Trip	**PT**	–	X	X	–
Non Leading	**NL**	X	X	X	X
Automatic Driving	**AD**	–	X	X	–
National System	**SN**	–	–	–	X
Reversing	**RV**	–	X	X	–
Limited Supervision	**LS**	–	X	X	–
Passive Shunting	**PS**	X	X	X	X
Supervised Manoeuvre	**SM**	–	–	X	–

3.1.3 Fahrterlaubnis und Geschwindigkeitsüberwachung

Unter ETCS benötigt ein Fahrzeug, das eine Fahrt mit Überwachung durch das System durchführen soll, eine ETCS-Fahrterlaubnis, die MA. Nur mit einer gültigen MA ist eine Fahrt in den Betriebsarten FS, On Sight (OS) oder LS möglich. Das MA-Paket, das von der Infrastruktur bereitgestellt wird, enthält die Länge der Fahrterlaubnis, eine signalabhängige zulässige Höchstgeschwindigkeit sowie Informationen über das Ende der MA, siehe [145]. Eine MA kann an ihrem Ende mit einer Zielgeschwindigkeit von 0 km/h enden. Dies wird als End of Authority (EOA) bezeichnet. Bei einer Zielgeschwindigkeit größer als 0 km/h wird von einem Limit of Authority (LOA) gesprochen. Dies tritt beispielsweise bei Transitionen in Richtung eines nationalen Zugbeeinflussungssystems oder einer Infrastruktur ohne Zugbeeinflussungssystem (Level 0) auf.

Bei einem EOA ist aus Sicht von ETCS auch Kenntnis über die sogenannte Supervised Location (SvL) notwendig. Diese kennzeichnet den Punkt am EOA bzw. in Fahrtrichtung hinter dem EOA, bis zu dem der Fahrweg frei und gesichert ist. Stellwerkstechnisch betrachtet kennzeichnet die SvL das Ende des Durchrutschweges (sofern vorhanden) oder die Lage des maßgebenden Gefahrpunktes. Dieser Punkt kann von einem Zug erreicht werden, ohne eine andere Fahrt zu gefährden.[1] Ein Durchrutschweg wird unter ETCS als Overlap (OL) bezeichnet, ein Gefahrpunkt als Danger Point (DP). Für jede MA wird projektiert, ob und mit welcher Distanz OL und bzw. oder DP vorhanden sind. Es ist auch möglich, beides anzugeben. In diesem Fall ist der größere Wert maßgebend und kennzeichnet die aktuelle SvL. Der OL kann entweder

[1] Hiermit sind Verbremsen, Durchrutschen und ähnliche ungewollte Vorfälle abgesichert, nicht eine intendierte Bewegung über das EOA hinaus.

zeitgesteuert (analog zu einer Durchrutschweg-Auflösezeit im Stellwerk) oder nach einem Halt des Zuges inaktiv gesetzt werden, sodass er in der Bremskurvenberechnung (siehe Abschnitt 3.1.4) nicht mehr berücksichtigt wird. Eine MA kann in mehrere Abschnitte unterteilt werden, diese werden als *Sections* bezeichnet. Dies ist beispielsweise relevant, wenn eine MA über mehr als eine Fahrstraße vergeben wird. Auch andere, praktisch beliebige Unterteilungen sind möglich. Jeder Abschnitt kann mit einem Timer belegt sein, nach dessen Ablauf dieser und alle folgenden Teile der MA nicht mehr zur Verfügung stehen.

Das ETCS-Fahrzeuggerät berechnet aus dem von der Infrastruktur bereitgestellten Static Speed Profile (SSP) und Gradient Profile (GP), der eingegebenen Zuglänge und ggf. weiteren geschwindigkeitseinschränkenden Zug- und Infrastruktureigenschaften das Most Restrictive Speed Profile (MRSP). Dieses muss stets über die gesamte Länge der aktuell gültigen MA vorhanden sein und gibt für jeden Punkt die maximal zulässige Geschwindigkeit bei statischer Betrachtung an. Daraus wird mit dem bekannten Bremsvermögen des Zuges das dynamische Geschwindigkeitsprofil berechnet, welches die individuellen Bremskurven enthält. Das Geschwindigkeitsprofil kann bezogen auf die Distanzen exakt (technisch möglich bis auf 10 cm genau, üblicherweise metergenau) und damit elementscharf sowie bezogen auf die Geschwindigkeiten auf 5 km/h genau angegeben werden. Alleine dadurch ist im Vergleich zu vielen Bestandssystemen eine geringe Geschwindigkeitserhöhung erreichbar, da konventionell häufig Geschwindigkeiten in Schritten von 10 km/h sowie mit geringerer örtlicher Granularität signalisiert werden.

3.1.4 Bremskurven

Direkt verknüpft mit der Fahrterlaubnis und der Geschwindigkeitsüberwachung bei ETCS sind die Bremskurven, welche abgestufte Überwachungs- und Eingriffsschwellen bei Geschwindigkeitsüberschreitungen definieren. Die Überwachung findet kontinuierlich statt und unterscheidet in der Betriebsart FS zwischen dem Ceiling Speed Monitoring (CSM) und dem Target Speed Monitoring (TSM). CSM bezeichnet eine Fahrt mit gleichbleibender zulässiger Geschwindigkeit, während TSM die Fahrt auf einen Zielpunkt (dies kann z. B. ein Halt oder ein Geschwindigkeitswechsel sein) bezeichnet, auf den entsprechende Bremskurven berechnet werden.

Da die Bremskurven bei ETCS dynamisch und zugspezifisch berechnet werden, ist neben der Kenntnis über die Streckeneigenschaften auch eine gute Modellierung der Zugeigenschaften und insbesondere der Bremssysteme notwendig. Grundlegend wird bei ETCS zwischen Emergency Brake (EB) (Schnellbremsung) und Service Brake (SB) (Vollbremsung) unterschieden. Relevantester Unterschied zwischen diesen beiden ist, dass die EB eine sichere Verzögerung bietet, die im Rahmen des zugrundeliegenden Konfidenzintervalls („Confidence level for emergency brake safe deceleration on dry rails“; NV *M_NVEBCL*) im Bereich 50 % bis 99,9999999 % gewährleistet wird [149]. Daher müssen alle hierauf ungünstig einwirkenden Faktoren berücksichtigt werden und nicht alle Bremssysteme können zur Berechnung herangezogen werden.

Die SB hingegen unterliegt keinen solch starken Sicherheitsanforderungen, sodass entsprechend keine Worst-Case-Betrachtungen vorgenommen werden und auch sogenannte „nicht sichere“ Bremsen angerechnet werden dürften. Die EB steht auf jedem mit ETCS ausgerüsteten Triebfahrzeug (Tfz) zur Verfügung, während die SB eine fahrzeugspezifische Funktion und nicht obligatorisch ist. Auf die konkreten Modelle zur Überführung des Bremsvermögens in die ETCS-Welt wird in Abschnitt 3.1.5 auf Seite 35 eingegangen.

Die Abbildung 3.8 und die Abbildung 3.9 auf Seite 35 zeigen beispielhaft ETCS-Bremskurven bei Fahrt in Richtung eines EOA als *Target*, anhand derer die markanten Punkte sowie die verschiedenen Überwachungs- und Interventionskurven im TSM erläutert werden. Diese Erläuterungen basieren auf [145, 159].

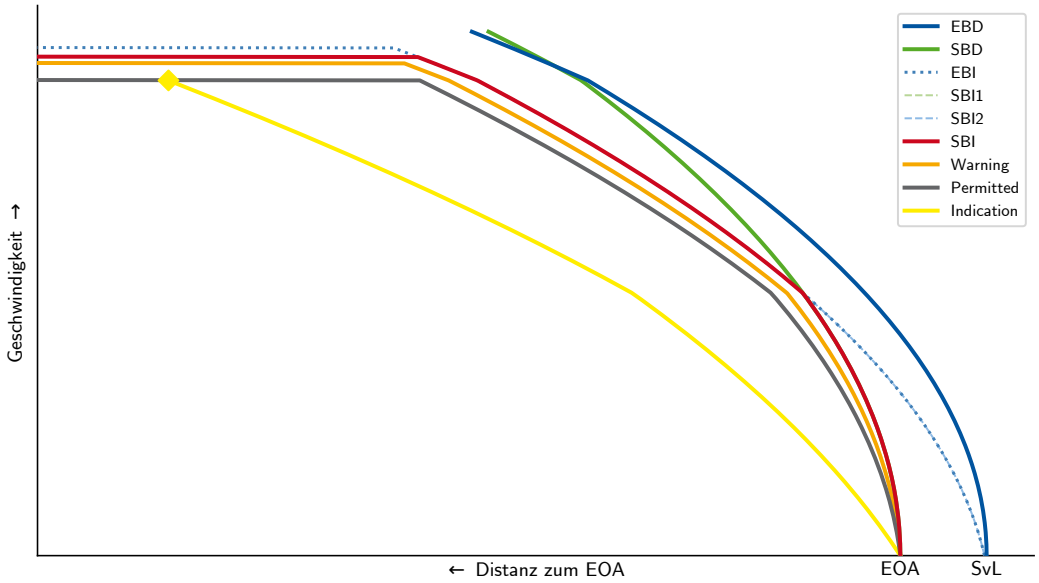


Abb. 3.8: Beispielhafte ETCS-Bremskurven ohne Release Speed. Eigene Darstellung auf Basis einer Berechnung mit [32].

Basis der Kurvenschar bildet die deterministische Emergency Brake Deceleration curve (EBD), welche auf der SvL fußt und aus den Streckeneigenschaften und dem Bremsvermögen der EB des Zuges berechnet wird. Je größer das Bremsvermögen der EB ist, desto steiler wird diese Kurve. Ausgehend von dieser wird unter Berücksichtigung der Bremsaufbauzeit, der aktuellen Beschleunigung und der aktuellen Geschwindigkeit des Zuges dynamisch das Emergency Brake Intervention supervision limit (EBI) mit dem notwendigen Abstand zu EBD ermittelt. Überschreitet der Zug das EBI, so erfolgt ein Systemeingriff, der eine Bremsung entlang der EBD im Rahmen der definierten Wahrscheinlichkeit gewährleisten kann.

Die Service Brake Deceleration curve (SBD) fußt immer auf dem EOA und beschreibt die Verzögerung bei Einsatz der SB. Als zugehörige Interventionskurve existiert die Service Brake Intervention supervision limit (SBI), die entsprechend die Bremsaufbauzeit der SB berücksichtigt. Die SBI wiederum wird dabei als restriktivste Kombination aus der SBI1 und der SBI2 gebildet. Dies wird auch als First Line of Intervention (FLOI) bezeichnet. Die SBI1 wird aus

der SBD mit Fußpunkt am EOA gebildet, während die SBI2 aus der EBD mit Fußpunkt auf der SvL berechnet wird. Das EIU kann die Nutzung der SB durch entsprechende NV unterbinden. Im Allgemeinen führt dies zu einer Kapazitätssteigerung, da sich die Annäherungsfahrzeit reduziert.

EBD und SBD können sich in der grafischen Darstellung schneiden oder die SBD auch dauerhaft oberhalb der EBD liegen. Dies ist möglich aufgrund der ihnen inhärenten Sicherheitsüberlegungen.

Die *Permitted Speed* ist keine Bremskurve im eigentlichen Sinne, sondern bildet stets die aktuell maximal zulässige Geschwindigkeit in Abhängigkeit der vorliegenden Randbedingungen ab. Zwischen *Permitted* und SBI ist die *Warning Curve* zu finden. Sie dient als weitere Schwelle in Richtung einer Geschwindigkeitsüberschreitung und alarmiert den Tf zusätzlich zur farbigen Anzeige auf dem DMI mit einer akustischen Warnung.

Die *Indication Curve* gibt dem Tf ausreichend Zeit, die SB zu nutzen, um die zulässige Geschwindigkeit (*Permitted*) einzuhalten, auch wenn letztere im TSM zu sinken beginnt. Sie dient de facto als Vorankündigung kommender Änderungen der zulässigen Geschwindigkeit. Der Schnittpunkt der *Indication Curve* mit der aktuellen Geschwindigkeit ist der Indication Point (IP) und fordert den Tf auf, eine Bremsung einzuleiten. Er ist ungefähr vergleichbar mit dem Bremseinsatzpunkt der deutschen LZB, der unter anderem durch Aufleuchten des Leuchtmelders „G“ angekündigt wird [197]. Der IP wird beim Fahren mit menschlichem Tf im Regelfall herangezogen, um die Annäherungsfahrzeit im Sperrzeitenmodell nach Happel [53] zu bestimmen. Er kennzeichnet den Ort, an dem einem Zug spätestens eine neue, verlängerte MA vorliegen muss, um keinen Bremsvorgang einzuleiten. Im Level 2 kann der IP durch die kontinuierliche Übertragungsmöglichkeit der MA über RMR direkt für diesen Zweck herangezogen werden. Im Level 1 hingegen bedingen die diskreten Übertragungsorte der BG, dass der Beginn der Annäherungsfahrzeit und damit auch das Vorliegen einer weiterführenden MA an der letzten, in Fahrtrichtung unmittelbar vor dem IP liegenden BG gewährleistet sein muss. Daraus resultiert eine ggü. dem eigentlichen IP vergrößerte Annäherungsstrecke und damit auch eine effektiv leicht vergrößerte Annäherungsfahrzeit.

Der *Indication Curve* vorgelagert existiert die optionale *Guidance Curve*, welche ein komfortables, verschleißarmes Bremsen erlauben soll, indem sie beispielsweise so parametrisiert wird, dass rein elektrisches Bremsen zur Einhaltung ausreicht. Damit einher geht ein deutlich steigender Kapazitätsverbrauch, da deutlich früher gebremst wird als technisch notwendig und kapazitiv optimal wäre. Das jeweilige EIU kann die Nutzung der *Guidance Curve* durch Anpassung der NV unterbinden. Die *Guidance Curve* ist in den Abbildungen 3.8 und 3.9 auf der vorherigen Seite und auf der nächsten Seite nicht dargestellt.

Die bisherigen Erläuterungen gingen von einer Projektierung ohne RS aus, erkennbar an den bis zum EOA herunterlaufenden Kurven in Abbildung 3.8 auf der vorherigen Seite. Im ETCS Level 1 ohne semi-kontinuierlichen Infill ist es jedoch erforderlich, stets eine RS von größer als 0 km/h zu projektieren, um die Aufnahme einer neuen MA an der BG am EOA zu ermöglichen. Die RS kann auch genutzt werden, um die durch die Odometrieungenauigkeit

ggf. auftretende, sehr restriktive Annäherung an ein EOA abzumildern und so eine schnellere Zufahrt zu ermöglichen. Die RS bricht die ablaufenden Kurven effektiv ab und erlaubt eine Annäherung an das EOA mit der projektierten Geschwindigkeit. Wird das EOA überfahren, ohne dass eine neue MA aufgenommen wurde, wird auch im Release Speed Monitoring (RSM) ein Trip als höchste Sicherheitsreaktion mit Zwangsbremsung bis zum Stillstand ausgelöst.

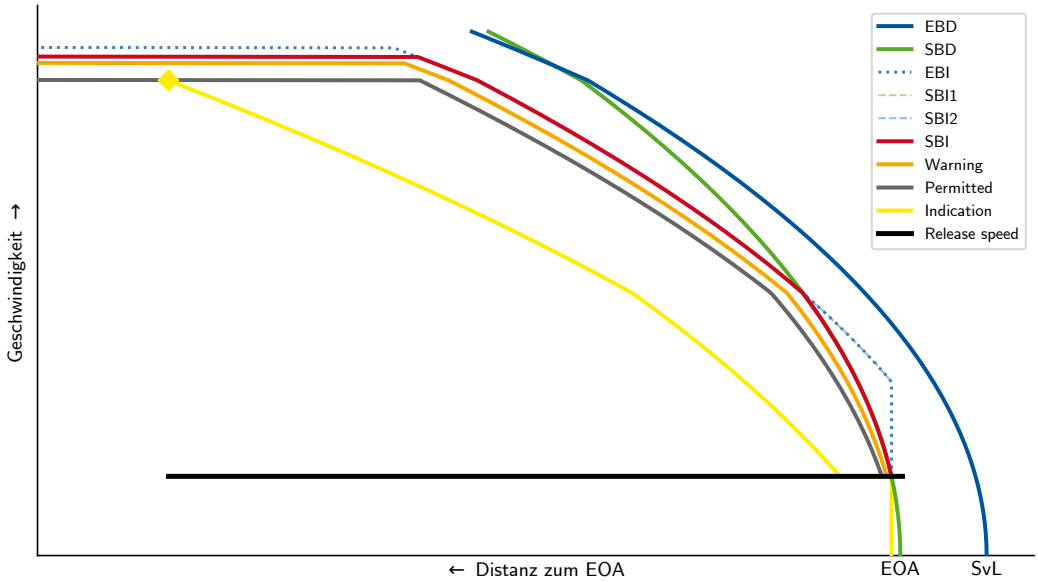


Abb. 3.9: Beispielhafte ETCS-Bremskurven mit Release Speed. Eigene Darstellung auf Basis einer Berechnung mit [32].

Im CSM, also der Fahrt ohne *Target* mit konstanter, zulässiger Geschwindigkeit werden die vier Überwachungsschwellen *Permitted*, *Warning*, SBI und EBI genutzt. Dabei werden die letzten drei jeweils aus der zulässigen Geschwindigkeit (*Permitted*) in definierten Abständen berechnet. Die Darstellung auf dem DMI sowie die Systemeingriffe entsprechen denen der korrespondierenden Kurven im TSM. Im Gegensatz zu einigen anderen Zugbeeinflussungssystemen kann ein Bremseingriff des Systems aufgrund Überschreitens der zulässigen Geschwindigkeit automatisch wieder aufgelöst werden, wenn die aktuelle Geschwindigkeit wieder unter die maximal zulässige Geschwindigkeit gefallen ist.

3.1.5 Modellierung des Bremsvermögens

Zur Modellierung des Bremsvermögens eines Zuges für ETCS stehen mit dem Lambda- und dem Gamma-Modell zwei Methoden zur Verfügung. Das Lambda-Modell basiert auf der bisherigen Methodik zum Beschreiben des Bremsvermögens eines Zuges. Hierfür werden die Bremshundertstel, die Bremsstellung sowie die Zuglänge benötigt. Mit diesen Größen kann mit dem *Conversion Model* der Union Internationale de Chemins de Fer (UIC) [220] eine angenäherte, erwartete Bremsbeschleunigung als Funktion der Zuggeschwindigkeit berechnet werden. Dieses Modell kann für praktisch alle Züge genutzt werden, besondere Relevanz besitzt es bei wechselnden Zugzusammenstellungen wie beispielsweise im Güterverkehr oder im

Reisezugverkehr mit Lok-Wagen-Zügen. Bedingt durch die notwendige Umrechnung und inhärenten Unsicherheiten kann es zu sehr langen berechneten Bremswegen führen. Des Weiteren kann es nur für Geschwindigkeiten bis 200 km/h und in festen Grenzen des Bremsvermögens (30 % bis 250 %) sowie maximalen Zuglängen von 900 m bei Reisezügen und 1500 m bei Güterzügen angewendet werden [159]. Demgegenüber steht das Gamma-Modell, welches eine deutlich genauere und feinere Modellierung der Bremssysteme und des resultierenden Bremsvermögens ermöglicht. Hierfür sind genaue Kenntnisse über die Wirkung der Bremssysteme notwendig, welche nicht allgemeingültig angegeben werden können. Für feste bzw. regelmäßig wiederkehrende Zugkompositionen (z. B. Einzel- und Mehrfachtraktionen) können die Bremsverzögerungen als Stufenfunktion über die Geschwindigkeit ermittelt und in der OBU hinterlegt werden.

Für die Anwendung bei der S-Bahn Stuttgart haben Förster et al. [42] Untersuchungen zu den Unterschieden der beiden Modelle durchgeführt. In den dort untersuchten Fällen und Fahrzeugen zeigte sich, dass das Lambda-Modell bei höheren Geschwindigkeiten und großen Gefällen kürzere Zugfolgezeiten erlaubt als das Gamma-Modell. Dieses wiederum stellte sich als vorteilhafter heraus im mittleren Geschwindigkeitsbereich und bei größeren Steigungen. Die Tendenzen werden überlagert von dem Effekt, dass das Gamma-Modell seine Stärken vor allem bei Doppel- und Dreifachtraktionen ausspielt, während bei Einfachtraktionen das Lambda-Modell sich als vorteilhafter zeigte.

3.1.6 Datenkommunikation

Zwischen Strecke und Fahrzeug erfolgt der Informationsaustausch über eine eigene ETCS-Sprache. Jede einzelne Balise überträgt ein sogenanntes *Telegram* (Telegramm). Die Telegramme aller ein bis maximal acht Balisen einer Balisengruppen werden anhand der Nummerierung innerhalb der Balisengruppe in der dadurch definierten Reihenfolge zu einer *Message* (Nachricht) zusammengesetzt. Bei der Nutzung von Euroloops und der funkbasierten Kommunikation über GSM-R bzw. FRMCS wird die Zwischenebene der Telegramme nicht benötigt, sie übertragen immer vollständige *Messages* [150]. Im Gegensatz zur Funkübertragung erfolgt die Kommunikation zwischen Balisen und Fahrzeug nicht kryptografisch verschlüsselt oder signiert. Daher ist es aus Gesichtspunkten der *Security* vorstellbar, dass eine Manipulation stattfinden kann, wie Poschinger et al. [98] darlegen.

Unterhalb der Ebene der Telegramme existieren die *Packets* (Pakete). Diese fassen mehrere Variablen in einer definierten Struktur zusammen und bilden jeweils einen abgeschlossenen funktionalen Block. Die aktuellen SRS enthalten in [149] derzeit 57 Pakete für die Übertragung von der Strecke an das Fahrzeug (*Up-link-Packets*) und zehn Pakete für die Übertragung vom Fahrzeug an die Strecke (*Down-link-Packets*, nur relevant im Level 2). Die Pakete setzen sich aus unterschiedlich vielen Variablen zusammen. Die aktuell 237 Variablen als kleinste Einheit der ETCS-Sprache sind ebenfalls in [149] definiert. Diese besitzen eine Länge zwischen 1 und 64 bit und sind anhand ihres Namenspräfixes in zwölf Kategorien untergliedert, siehe Tabelle 3.2 auf der nächsten Seite.

Tab. 3.2: Kategorien der ETCS-Variablen nach Präfix, siehe [149].

Präfix	Kategorie	Präfix	Kategorie
A_	Acceleration	NC_	Class Number
D_	Distance	NID_	Identifier Number
G_	Gradient	Q_	Qualifier
L_	Length	T_	Time/date
M_	Miscellaneous	V_	Speed
N_	Number	X_	Text

3.2 Betriebsverfahren

Betriebsverfahren sind eine prozessuale Beschreibung von Regelungen, um die Schutzziele der Eisenbahn zu gewährleisten [81]. Aus ihnen wird das jeweilige betriebliche Regelwerk abgeleitet. Die grundlegenden Betriebsverfahren werden in Deutschland in der EBO [239] in ihren Grundzügen beschrieben; diese sind der Zugmelde- sowie der Zugleitbetrieb. Ähnliche Unterscheidungen existieren vergleichbar in den meisten Staaten Europas. In Bezug auf ETCS Level 1 findet bei beiden Betriebsverfahren im Regelfall das Fahren im festen Raumabstand statt. Einige Betriebsfälle erfordern das Fahren auf Sicht. Das Fahren im Bremswegabstand (*Moving Block*) ist technisch bedingt im Level 1 nicht möglich.

3.2.1 Zugmeldebetrieb

Im Zugmeldebetrieb sind auf der Seite der Infrastruktur die Fdl und Weichenwärter (Ww) mit ihren jeweiligen Stellwerken für die Sicherung des Zugbetriebs zuständig. Stellwerke stellen hierbei technische Abhängigkeiten zwischen Signalen und Fahrwegelementen her, um die Schutzziele des sicheren Eisenbahnbetriebs zu gewährleisten. Die Gleisfreimeldung erfolgt entweder durch die Fdl und Ww „durch Hinsehen“ oder durch technische Einrichtungen wie Achszähler oder Gleisstromkreise. Die Zulassung einer Fahrt erfolgt durch veränderliche Signale. Betrieblich wird zwischen Betriebsstellen, welche die Reihenfolge der Züge regeln (Zugmeldestellen), und solchen, welche die Folge der Züge regeln (Zugfolgestellen) unterschieden. Zwischen den Fdl benachbarter Betriebsstellen werden Zugmeldungen ausgetauscht. Dies erfolgt entweder fernmündlich oder mithilfe einer technischen Zugnummernmeldeanlage (ZNA).

Häufig geht der Zugmeldebetrieb mit einem Zugbeeinflussungssystem einher, welches umfangreiche Funktionen bietet, die über eine reine Fahrsperrenfunktion – also das Verhindern einer unzulässigen Vorbeifahrt an einem Halt zeigenden Signal – hinausgehen. Über eine vom Fahrplan abweichende Reihenfolge der Züge entscheidet, sofern vorhanden, ein Disponent, sonst der Fdl [81].

3.2.2 Zugleitbetrieb

Kennzeichnend für den ZLB ist die Regelung der Zugfahrten mittels Fahrerlaubnissen [81]. Dies erfolgt durch den Zugleiter, der für die Betriebsstellen der Zugleitstrecke zuständig ist und damit die Sicherheit der Fahrten gewährleisten muss. Er darf Fahrten nur dann zulassen, wenn eine Gefährdung anderer Fahrten (oder Dritter) ausgeschlossen ist. Die Kommunikation der Fahrerlaubnis erfolgt heute in der Regel fernmündlich über den analogen oder digitalen Zugfunk, in seltenen Fällen auch noch mündlich. Die Tf müssen ihre Standorte melden, z. B. wenn sie mit ihrem Zug vollständig in einer Betriebsstelle angekommen sind. Der ZLB kommt in Deutschland nur auf Nebenbahnen mit geringen Belastungen zur Anwendung.

Als Zwischenebene zwischen dem klassischen ZLB und dem Zugmeldebetrieb existiert der sogenannte „Signalisierte Zugleitbetrieb“. Hierbei kommen technische Hilfsmittel in Form von Signalen, Gleisfreimeldung oder Zugschlusssendern zum Einsatz. Die Sicherheitsverantwortung liegt hier weiterhin vollständig beim Zugleiter, jedoch kann die Anzahl der notwendigen Gespräche zwischen Zugleiter und Tf reduziert und so der Betrieb flüssiger gestaltet werden.

Kommt im ZLB eine Zugsicherung zum Einsatz, so beschränkt sich deren Aufgabe in den meisten Anwendungen auf die Unterbindung nicht zugelassener Fahrten sowie die Sicherung von Bahnübergängen. Hierfür ist eine binäre Fahrsperrenlösung ausreichend, weitergehende Funktionalitäten kommen nicht zur Anwendung. In Deutschland wird dies als Technisch unterstützter Zugleitbetrieb (TuZ) bezeichnet. Im Signalisierten Zugleitbetrieb (SZB) hingegen nähern sich die Aufgaben eines Zugbeeinflussungssystems denen beim Zugmeldebetrieb an.

3.3 Stand der Forschung

Wie bereits im Überblick der Entwicklung von ETCS in Abschnitt 2.3.3 auf Seite 15 erkennbar ist, kann das System ETCS nicht als statisch angesehen werden. Durch die Ergänzung weiterer Funktionalitäten und Fehlerkorrekturen, den technischen Fortschritt und neue Erkenntnisse aus einer größer werdenden Anzahl an Ausrüstungen sind die Spezifikationen einer stetigen Weiterentwicklung unterworfen. Diese (möglichen) Weiterentwicklungen betreffen selbstverständlich auch den rechtlichen Rahmen, innerhalb dessen ETCS eingesetzt wird und spiegeln zudem die jeweils aktuell wichtigen Themen im Eisenbahnsektor wider. Auch betriebliche Regelwerke unterliegen einem kontinuierlichen Verbesserungsprozess, gerade bei der Einführung neuer Technologien wie ETCS.

Forschung und Literatur explizit zu ETCS Level 1 ist im Vergleich zu Level 2 rar gesät, besonders im wissenschaftlichen Kontext. Aus dieser geringen Verfügbarkeit von Forschungen zu ETCS Level 1 ergibt sich der Bedarf, die Recherchebreite thematisch zu erweitern. Daher werden ebenso Entwicklungen im Level 2 und ausgewählte Entwicklungen außerhalb von ETCS sowie nicht begutachtete Fachartikel aufgegriffen. In den folgenden Abschnitten wird lediglich auf grundlegende Arbeiten eingegangen. Zur Verbesserung der Nachvollziehbarkeit

wird weitere relevante Literatur in den jeweiligen Kapiteln kontextbezogen vorgestellt und diskutiert. Während der Recherche konnten die folgenden Schwerpunkte identifiziert werden:

- Optimierung der Blockteilung unter Berücksichtigung der Eigenschaften von ETCS;
- Vergleich der Leistungsfähigkeit von ETCS in verschiedenen Ausprägungen mit Bestandssystemen;
- Optimierung der Infill-BG bei Anwendung von ETCS Level 1;
- Weiterentwicklung von ETCS Level 1 und entsprechender Stellwerkssystemen sowie der Balisenansteuerung;
- Einführung von ETCS Level 2 mit fahrzeugseitiger Gleisfreimeldung bzw. einer Kombination aus streckenseitiger und fahrzeugseitiger Gleisfreimeldung („ETCS Level 2 Hybrid“);
- Implementierung von Funktionen der Automatisierung, insbesondere *ATO over ETCS*;
- Entwicklung neuer, innovativer Fahrweg- und Zugsicherungslösungen abseits klassischer Stellwerke (unter teilweiser Nutzung von ETCS-Funktionen oder ETCS-Technik).

3.3.1 Optimierung der Blockteilung

Ein wesentlicher Hebel zur Steigerung der Leistungsfähigkeit von Eisenbahninfrastruktur ist die Anpassung der Blockteilung. Bei der Ausrüstung mit ETCS sollte daher mit Blick auf das Gesamtsystem geprüft werden, wie die Blockteilung optimal gestaltet werden kann. Durch die Führerstandssignalisierung bietet ETCS hier im Allgemeinen größere Freiheiten als Systeme mit Außensignalisierung. Erkenntnisse aus Studien des Level 2 lassen sich in vielen Fällen auch mit geringen Anpassungen auf Level 1 FS übertragen. Praktisch betrachtet sind sehr enge Blockteilungen beim Level 1 durch die notwendigen Streckeneinrichtungen technisch (minimale Signalabstände und notwendige Signalsichten) und wirtschaftlich (Investitions- und Instandhaltungskosten der Lichtsignale) nicht zielführend.

Ein iteratives Vorgehen beschreiben Vignali et al. [130]. In diesem Beitrag werden Anforderungen an die Mindestzugfolgezeiten gestellt und durch eine Rückwärtsrechnung geeignete Kandidaten der Infrastrukturausrüstung erzeugt. Diese werden mit den Eingangsdaten der Züge und des Betriebsprogramms auf die Erfüllung der Anforderungen getestet. Am Ende der Iteration erhält man eine Ausgabe über die Blockteilung sowie die Belegungen und die zu erwartende Betriebsqualität.

Einen weiteren Ansatz zur Optimierung der Blockteilung zur Kapazitätserhöhung im Level 2 haben Grubor et al. [47] entwickelt und mit vielversprechenden Ergebnissen erprobt. Auch für den Level 1 können solche Ansätze genutzt werden, um einen Hochleistungsblock einzurichten, wie Schmidt [108] gezeigt hat.

In seiner Arbeit zu ETCS-Bremskurven konzentriert sich Fehlauer [35] auf deren Auswirkungen auf die sogenannten „zeitabhängigen Streckenausrüstungen“. Hierunter fasst er alle Systeme und Komponenten zusammen, „deren [...] Anordnung am Gleis [...] direkt von sich aus der Fahrt des Zuges ergebenden, zeitlichen Berechnungen abhängt“. Dabei fokussiert er sich auf die Dimensionierung von ETCS-Teilblöcken bei Anwendung von Hochleistungsblock

mit Level 2, auf die Einschaltstrecken von Bahnübergänge (BÜ) sowie auf die Ausgestaltung der Zuglenkung bei ETCS im Vergleich zu bisherigen Zugbeeinflussungssystemen.

Aufbauend auf dieser Arbeit zeigen Fehlauer und Kahl [36] komprimiert entstehende betriebliche Einschränkungen durch die ETCS-Bremskurven auf. Ohne Anpassung der Blockteilung kann bei der Migration von PZB auf ETCS die Kapazität signifikant sinken. An BÜ mit Überwachungssignal (ÜS) können aufgrund der längeren Bremskurven Fahrzeitverlängerungen entstehen, wenn zur Gewährleistung der systemischen Sicherheit die Geschwindigkeit vor einem BÜ reduziert werden muss. Alternativ können die Überwachungssignale versetzt werden, dies bedeutet jedoch einerseits erhöhte Schließzeiten für die Straßenverkehrsteilnehmenden, andererseits umfangreiche Anpassungen an der Bahnübergangssicherungsanlage (BÜSA). Zuletzt bestehen vor allem im Level 2 Wechselwirkungen mit der Zuglenkung und den vorher genutzten Anstoßpunkten (konventionell oder über ETCS), welche in einigen Fällen zu unerwünschten Effekten mit betrieblichen Einschränkungen führen können. In der Entwicklung von Projektierungsregeln und auch in der projektspezifischen Projektierung sind solche kritischen Punkte frühzeitig zu ermitteln und Gegenmaßnahmen zu erarbeiten, um das volle Potenzial von ETCS auszunutzen und die vorhandene Infrastruktur bestmöglich zu nutzen.

3.3.2 Leistungsfähigkeit

Im Rahmen der Entwicklung und Einführung von ETCS lag und liegt die Kernfrage aus eisenbahnbetriebswissenschaftlicher Sicht darin, wie sich das neue System und der Betrieb damit im Vergleich zu den unterschiedlichen Bestandssystemen verhalten. Oder andersherum betrachtet, wie die Ausrüstung mit und die Projektierung von ETCS ausgestaltet werden müssen, um bspw. eine gleiche oder bessere Leistungsfähigkeit zu erzielen.

Vor dem netzweiten Rollout von ETCS Level 1 FS wurde eine gesamthafte Leistungsfähigkeitsuntersuchung für die CFL durchgeführt. Die Ergebnisse davon präsentieren Feltz et al. [40]. In weiten Teilen konnte für die Strecken eine optimale Betriebsqualität nachgewiesen werden, an einigen Stellen wurde Anpassungsbedarf wie das Ergänzen eines neuen Blocksignals identifiziert. Diese kritischen Stellen sind jedoch kein direktes Resultat der Einführung von ETCS. Ein direkter Vergleich mit dem Bestandssystem wurde von den Autoren nicht veröffentlicht. In den Knotenbereichen zeigten die Ergebnisse, dass die geplanten Maßnahmen zur Engpassauflösung zielführend sind.

Für die deutsche Ausprägung von ETCS Level 1 LS, ESG, zeigte Büker [14], dass die damals geplante Projektierung im Mittel nicht schlechter ist als das Bestands- und Referenzsystem PZB, wobei bei moderater Überarbeitung der Lastenhefte und Gewöhnung der Tf an die neuen Überwachungsfunktionen zusätzliche Potenziale zu heben seien.

In einer umfangreichen Studie haben Landex und Jensen [70] die Kapazität von ETCS Level 2 und Level 1 miteinander verglichen. Dabei untersuchten sie sowohl generische Strecken mit vorgegebenen Blocklängen als auch reale Strecken mit entsprechend variierenden Blocklängen. Auf den generischen Strecken wurden die Blocklängen im Bereich 500 m bis 4000 m

und die Streckengeschwindigkeit im Bereich 60 km/h bis 200 km/h variiert. In beiden Fällen wurden Züge mit maximalen Geschwindigkeiten von 90 km/h bis 220 km/h betrachtet. Im Ergebnis zeigen die generischen Untersuchungen, dass Level 2 das Potenzial besitzt, eine um 17 % bis 20 % höhere Kapazität zu bieten. Level 1 stellte sich vor allem bei einem homogenen Zugmix sowie Blocklängen, die in etwa den Bremswegen der Züge entsprechen, als vorteilhaft heraus. Auf den realen Strecken hingegen betrug der Unterschied im Mittel nur noch 3 % zugunsten des Level 2.

Geschwindigkeitswechsel unter ETCS lagen im Fokus von Arbeiten von Busse und Dambon [17]. Sie zeigen die Besonderheiten der individuellen Berechnung der Bremskurven bei Geschwindigkeitszielbremsungen im Gegensatz zu den Überwachungskurven der PZB auf. Außerdem entwickeln sie ein vereinfachtes Formelwerk, mit dem der Ort, an dem die durch ETCS überwachte, niedrigere Geschwindigkeit erreicht sein muss, bestimmt werden kann. Dieser Ort fällt durch die in den Bremskurven enthaltenen Zeitanteile und Sicherheitszuschläge nicht mit dem eigentlich projektierten Ort des Geschwindigkeitswechsels zusammen. Diese Effekte besitzen eine direkte Auswirkung auf die Leistungsfähigkeit, da sie die Vorteile eines Geschwindigkeitswechsels unmittelbar vor einer abzweigend befahrenen Weiche ggü. einem Geschwindigkeitswechsel am vorherigen Hauptsignal reduzieren oder bei kurzen Abständen auch umkehren können.

Vor allem im Zusammenhang mit ETCS Level 2 zeigte sich anfangs, dass die Systemlaufzeiten der beteiligten Komponenten bei hohen Leistungsanforderungen signifikante negative Einflüsse auf die Performance haben. Für das Projekt Digitaler Knoten Stuttgart (DKS) wurde daher besonderes Augenmerk auf eine schnelle LST gelegt, um die Kapazität zu steigern. Behrens et al. [7] zeigen die erzielbaren Gewinne und Wirkmechanismen in ihrer Arbeit auf. Im Level 1 hingegen ist der Einfluss der LST-Geschwindigkeit im Regelfall deutlich weniger relevant, da weniger Systeme beteiligt sind und diese häufig eine geringere Latenz aufweisen. Dennoch sollten auch bei Level 1 die erzielbaren Zeitgewinne nicht außer Acht gelassen werden. Werden diese nicht in eine Kapazitätserhöhung umgesetzt, so stehen sie immer noch zur Verbesserung der Robustheit und Verringerung der Verspätungsübertragung zur Verfügung.

Einen systemischen Gesamtüberblick über die Ausgestaltung moderner digitaler LST geben Kümmling und Wanstrath [68] ebenfalls im Kontext DKS. Um einen leistungsfähigen Ersatz der Bestandssysteme durch ETCS zu erreichen, ist die Anpassung diverser Stellschrauben möglich und sinnvoll. Neben den oben beschriebenen technischen Laufzeiten gehören dazu u. a. die Verkürzung der Annäherungsfahrzeit sowie die Optimierung der Blockteilung. Der Einsatz optimierter Leit- und Dispositionssysteme kann zudem dazu beitragen, die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems zu steigern, indem beispielsweise durch das Wissen um die Stromabnehmerposition im Zug bestehende Restriktionen aus Schaltabschnittsgrenzen der Oberleitung abgemildert werden können.

Ranjbar et al. [100] untersuchten u. a. ETCS Level 2 und verglichen die Mindestzugfolgezeiten mit dem schwedischen Bestandssystem ATC. Level 2 führte zu einer Reduktion der Mindestzugfolgezeiten von 10 %.

Düpmeier [28] zeigt mit seinem Beitrag einen möglichen Weg der Weiterentwicklung der Sicherungslogik von Stellwerken auf. Mit einer generischen, regelbasierten, geometrischen Sicherungslogik ließen sich in Kombination mit der Führerstandssignalisierung von ETCS Kapazitätsvorteile erzielen.

3.3.3 Optimierung der Infill-Balisengruppen

Durch die balisenbasierte Informationsübertragung bei ETCS Level 1 spielen Anzahl und Positionen der Infill-Balisengruppen eine wichtige Rolle. Durch sie wird die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems sowohl im Regelbetrieb als auch bei Verspätungen und Störungen beeinflusst. Bedingt durch die vergleichsweise geringe Verbreitung des Level 1 wurden daher nur sporadisch Arbeitsergebnisse und Erkenntnisse veröffentlicht. Zum Teil können jedoch zusätzlich aus allgemeinen Untersuchungen der Leistungsfähigkeit Rückschlüsse über die Bedeutung der Infill-Balisengruppen gezogen werden.

Bereits im Jahr 2006 definierte Wendler [133] das sogenannte „Pufferzeitäquivalent“. Er baute damit auf der Arbeit von Schwanhäußer [112] auf und nutzt es zur Berechnung optimaler Abstände der Infill-BG. Daraus wurden einfache Faustregeln für die Platzierung der Infill-BG abgeleitet, welche auf dem Verhältnis zwischen Position der Balisengruppen und dem IP basieren. Bedingt durch den damaligen Spezifikationsstand konnten die neuen harmonisierten Bremskurven der SRS-Version 3.0.0 noch nicht berücksichtigt werden, sodass für eine Übertragung der Ergebnisse auf die aktuellen Verhältnisse eine Validierung benötigt wird.

In einer Studie des Verkehrswissenschaftlichen Instituts der RWTH Aachen im Auftrag des UIC [128] wurden Vergleichsrechnungen zum Kapazitätsverbrauch unterschiedlicher Ausprägungen von ETCS auf generischen Strecken durchgeführt. Dabei wurden auch unterschiedliche Szenarien von Level 1 mit Infill-BG betrachtet. Im Ergebnis wurde im besten untersuchten Szenario (zwei Infill-BG) eine um 3 % bis 12 % geringere Kapazität als bei Level 2 festgestellt. Die Autoren schreiben, dass der tatsächliche Nutzen von Level 2 in der Praxis noch höher ausfallen könnte, wenn die Varianz der Zugeigenschaften und Fahrdynamiken zunehmen. Weitere, optimierte Level 1-Szenarien wurden nicht untersucht, zudem entsprechen die hinterlegten Bremsmodelle durch die Weiterentwicklung von ETCS ebenso nicht mehr dem aktuellen Stand.

Eine weitere Studie im Auftrag des UIC befasste sich mit den Auswirkungen von ETCS auf die Leistungsfähigkeit von Knoten [129]. Die Autoren der VIA Consulting & Development GmbH legten in den Level 1-Szenarien ebenfalls die maximale Anzahl an Infill-BG auf zwei fest. Diese wurden anhand des größten sowie des mittleren IP aller betrachteten Züge platziert. Eine weitere Optimierung fand nicht statt. Als Ergebnis stellten die Autoren fest, dass der Kapazitätsvorteil des Level 2 ggü. dem Level 1 in den untersuchten Fällen stets unterhalb von 5 % lag. Dabei ist zu beachten, dass die unterstellten Projektierungen im Level 2 die Geschwindigkeitswechsel am Weichenbeginn annehmen, im Level 1 jedoch am vorausliegenden Hauptsignal. Level 1 FS kann analog zu Level 2 projektiert werden, sodass bei einer optimierten Ausrüstung von noch geringeren Vorteilen des Level 2 auszugehen ist.

Zur integrierten Analyse von Infrastrukturen mit ETCS Level 1 wurde von Soler et al. [120] ein Simulationsmodell erstellt. Dieses ist unter anderem in der Lage, Aussagen über die Blocklängen und Blockverteilung zur Minimierung der Mindestzugfolgezeiten zu treffen. Eine detaillierte Beschreibung der zugrundeliegenden Algorithmen, die über die Modellierung der physikalischen Eigenschaften gehen, ist jedoch nicht veröffentlicht.

Nikolov und Ganchev [94] entwickelten einen mathematischen Ansatz zur Optimierung der Infill-BG. Dabei arbeiten sie mit näherungsweisen Beschleunigungskurven, welche in Szenarien mit konstanten sowie mit variablen Verzögerungswerten unterteilt sind. Das Modell wurde in eine Software überführt, welche die optimale Position einer einzelnen Infill-BG zwischen Vorsignal und EOA berechnet und visualisiert.

Einen anderen Ansatz verfolgte Shanker [117]. Er nutzt grundlegende Bewegungsgleichungen sowie Wahrscheinlichkeiten, um optimale Positionen von Infill-BG zu bestimmen. Dafür unterteilt er den Annäherungsbereich vor dem EOA in einzelne Segmente unter der Maßgabe, dass die Fahrzeit in jedem dieser Segmente gleich sein soll. Die Beschleunigungsphase nach dem Erhalt einer Infill-MA berücksichtigt er in seinem Modell jedoch nicht.

3.3.4 Weiterentwicklung des Level 1

In den vergangenen Jahren nimmt – vermutlich auch durch Verzögerungen und Hürden in diversen Level 2-Projekten – das Interesse an ETCS Level 1 als leistungsfähiges, vollständig interoperables System überschaubarer Komplexität zu. Dies zeigt sich auch in entsprechenden Forschungsarbeiten und Entwicklungstätigkeiten seitens der Signalindustrie.

Morast et al. [86] zeigen anhand eines Projekts für Level 1 FS in Luxemburg mögliche Restriktionen und Lösungsstrategien bei der Projektierung auf. Ebenso wird kurz aufgezeigt, wie die einzelnen Pakete auf die Balisen einer BG verteilt werden können, um möglichst keine betrieblichen Nachteile zu erhalten. Eine detaillierte Beschreibung dieser Herausforderung ist in Abschnitt 5.3 auf Seite 100 zu finden.

Mit dem Fokus der NE-Bahnen hat Siebert [118] ein Ausrüstungskonzept mit ETCS entwickelt. Im Ergebnis kommt er zu dem Schluss, dass ETCS Level 1 in der Betriebsart FS zielführend ist und alle Anwendungsfälle der NE abdecken kann. Einige Betriebsfälle werden prototypisch vorgestellt und die notwendige Ausrüstung und Projektierung erläutert.

Luxemburg, das zu den Vorreitern bei der ETCS-Ausrüstung zählt, nimmt seit dem Jahr 2022 die zweite Generation der Streckenausrüstung in Betrieb. In einem Fachartikel geben Feltz und Arend [39] aus Sicht eines EIU ihre Einblicke in die Motivation, Funktionen und ersten Erfahrungen eines integrierten ETCS-Stellwerks für ETCS Level 1 FS. Durch die Steuerung der Balisen direkt durch das Stellwerk anstatt dezentraler LEUs kann das Signalsystem vereinfacht und reduziert werden. Gleichzeitig werden dadurch neue Funktionen wie z. B. das Management von Temporary Speed Restrictions (TSR), ein ETCS-basierter Nothalt, fahrwegspezifische Projektierung und zentrale Programmierung ermöglicht. Aus Sicht des Systemlieferanten in

Luxemburg beschreiben Klöters et al. [65] und Wenning et al. [134] das System und seine Funktionalitäten, welche sich an Lösungen für das Level 2 annähern sollen.

Auch Kerekeš und Stadlbauer [62] beschreiben aus der Sicht eines Stellwerksherstellers, wie insbesondere die Ansteuerung der Balisen verbessert werden kann, sodass sich das System in den technischen Fähigkeiten bezüglich Wartung, Diagnose, Performance und Management von TSR einem Level 2-System annähert. Sie sehen auch längerfristig einen Markt für Level 1 im Bereich von Nachrüstungen sowie auf Nebenstrecken mit dem zusätzlichen Gewinn einer verbesserten Sicherheit gegenüber vielen Bestandssystemen.

3.3.5 Fahrzeugseitige Gleisfreimeldung

Aus Sicht der Infrastruktur stellt eine teilweise oder gar vollständige Gleisfreimeldung auf Basis fahrzeugseitig bereitgestellter Informationen einen erstrebenswerten Zustand dar, da damit die Streckenausrüstung und Feldelemente auf das absolute Minimum reduziert werden können. In den aktuell gültigen Spezifikationen ist dies als Teil des Level 2 enthalten, zuvor war es als Level 3 bekannt.

Kuttig-Trölenberg et al. [69] beschreiben einen möglichen Migrationspfad von ETCS Level 2 oS hin zu einem hybriden System, bei dem die Gleisfreimeldung teilweise streckenseitig und teilweise zugseitig erfolgt. Dies war früher unter dem Begriff „Level 3 Hybrid“ bekannt und fällt aufgrund der Zusammenfassung der Level 2 und 3 mit ersterem zusammen als „Level 2 Hybrid“ oder auch Hybrid Train Detection (HTD). Nach Aussagen der Autoren ist die Hochrüstung zu Level 2 Hybrid ohne streckenseitige Hardwareanpassungen möglich und soll so zukünftig schnell und flächendeckend umsetzbar sein mit den entsprechenden Kapazitätsgewinnen.

Im Kontext der hohen Belastung des italienischen Eisenbahnknotens von Rom zeigen Baglivo et al. [3] und Cuppi et al. [18] auf, welche Vorteile mit einer hybriden Gleisfreimeldung im Level 2 möglich sind. Diese nutzt je nach Anforderungen und Örtlichkeit klassische streckenseitige Technik von in diesem Fall Gleisstromkreisen oder virtuellen Blöcken basierend auf einer zugseitigen Gleisfreimeldung mittels TIMS.

3.3.6 Automatisierung

Auch wenn die Systemeigenschaften Spurführung und externe Fahrwegbildung und -sicherung ein automatisiertes Fahren deutlich begünstigen, zeigen die Besonderheiten des Schienenverkehrs noch immer viele offene Forschungsfragen bezüglich des automatisierten Fahrens. Diese lassen sich untergliedern in rechtliche, technische und betriebliche Aspekte sowie menschliche Faktoren. Die rechtlichen und regulativen Aspekte des automatisierten Fahrens sollen an dieser Stelle nicht vertieft werden. Es sei auf Morast [85] und Spiegel und Hauswald [121] verwiesen. Einen technischen Überblick über ATO geben Yin et al. [140] und auch Spiegel und Hauswald [121]. Letztere zeigen ebenso auf, welche Rahmenbedingungen und Herausforderungen der Sektor im Kontext von ATO derzeit vorfindet.

In einem zeitlich frühen Überblick zeigen Pelz und Dickgießer [97], wie bisherige Lösungen des automatisierten Fahrens aus dem Metrobereich auch bei der Vollbahn angewendet werden können und welche Rolle die Standardisierung der Technik im Allgemeinen und ETCS im Speziellen hierbei spielen. Dabei gehen sie auch auf eine der ersten Anwendungen von *ATO over ETCS* bei *Thameslink* in London ein.

Der weit überwiegende Teil zukünftig automatisiert fahrender Schienenfahrzeuge wird nicht „auf der grünen Wiese“ gebaut, sondern in bestehende Techniken, Strukturen und Betriebe integriert werden müssen. Hierfür ist es notwendig, angepasste Migrationsstrategien zu entwickeln. Meyer zu Hörste [83] leitete hierfür drei grundlegende Strategien ab. Bei den überlagernden Ansätzen werden bestehende Assistenztechniken wie die Automatische Fahr- und Bremssteuerung (AFB) schrittweise zu Automatisierungstechniken hochgerüstet, welche auf der Verknüpfung bereits vorhandener Daten arbeiten. Notwendige Voraussetzung hierfür ist das Vorhandensein eines entsprechend leistungsfähigen Systems mit umfangreichen Daten, wie dies mit ETCS der Fall ist. Die intermittierenden Ansätze beruhen auf der Prämisse, möglichst frühzeitig eine umfangreiche Automatisierung zu erreichen. Dabei wird mit Netzbereichen begonnen, in denen eine Automatisierung „relativ einfach“ ist, Technik und Betrieb also von geringer Komplexität sind (z. B. auf der freien Strecke). In Netzbereichen hoher Komplexität und Schwierigkeit (z. B. in Knotenbereichen) wird vorerst ein manueller Betrieb umgesetzt. Damit lassen sich Erfahrungen mit der Technik und allen weiteren Aspekten sammeln, um daraus Schlüsse zu ziehen für die Automatisierung der anspruchsvollen Bereiche. Die reduzierenden Ansätze als letzte Strategie gehen den Weg, vor der Automatisierung einen möglichst einfachen Betrieb geringer Komplexität zu erreichen, um die Anforderungen an ein Automatisierungssystem zu reduzieren. Ausgangspunkt können auch hier Netzbereiche sein, in denen bereits a priori ein vergleichsweise einfacher Bahnbetrieb mit einem geringen Umfang an betrieblichen Anforderungen besteht.

Hampel et al. [51] zeigen anhand der Aufgabe „Streckenbeobachtung“ auf, welche Anforderungen bei einem automatisierten Betrieb ohne Tf zu erfüllen sind.

Ausgehend von den Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten im Rahmen des Programms von „Shift2Rail“ [270] zeigt Bienfait [11] auf, welche Relevanz ATO insbesondere in Kombination mit ETCS für die zukünftige Mobilität besitzt. Daraus ergibt sich die Kernforderung, dass die ATO-Technik im Bereich der Vollbahnen interoperabel gestaltet sein muss, ansonsten ist eine weitreichende Automatisierung nicht erreichbar. Mit Veröffentlichung der ETCS-Baseline 4 ist ATO im GoA 2 spezifiziert, die GoA 3 und 4 sollen in den kommenden Jahren folgen.

Vor der finalen Veröffentlichung der neusten ETCS-Spezifikationen ordnete Doppelbauer [27] die erreichten technischen Fortschritte in die strategische Ausrichtung des Eisenbahnverkehrs in der EU ein. Für die Zukunft soll der Rollout von ETCS forciert und beschleunigt werden, vgl. Abschnitt 2.2.1 auf Seite 5. Auf technischer Seite sieht er mit ATO und FRMCS „Gamechanger“. Vor allem im Güterverkehr seien mit der angestrebten Einführung der Digitalen Automatischen Kupplung (DAK) und des virtuellen Rangierens große Potenziale zu heben, den Schienenverkehr effizienter durchzuführen.

Mit einer Differenzialanalyse der betrieblichen Tätigkeiten zeigen Schöne et al. [110] auf, wie sich der Umgang mit Störfällen durch die Automatisierung wandelt und welche Auswirkungen sich daraus auf die technische Auslegung der Systembestandteile ergibt.

Auch in einem automatisierten Schienenverkehrssystem, bei dem vielleicht für die Reisenden keine direkten Interaktionen mit Personalen des EIU oder EVU stattfinden, werden weiterhin Menschen benötigt, um einen sicheren und reibungslosen Betrieb zu gewährleisten. Gerade in der kreativen Problemlösung zeigt der Mensch herausragende Eigenschaften, welche (noch) von keinem technischen System übernommen werden können. Entscheidend wird hier sein, die Kompetenzen von Mensch und Technik bestmöglich zu verzahnen, siehe hierzu auch Brandenburger und Naumann [12]. Beispiele hierzu existieren bereits in Piloten von Systemen zur Unterstützung von Dispositionsentscheidungen. Der Computer kann unter Berücksichtigung des aktuellen Betriebsgeschehens und der Störlage unterschiedliche Szenarien und deren Auswirkungen berechnen. Diese werden dem Disponenten dargestellt, welcher eine Entscheidung trifft, die sofort an alle angeschlossenen Beteiligten weitergegeben wird.

Die erste Realisierung und der erste Fahrgasteinsatz der Technik *ATO over ETCS* in Deutschland erfolgte im Rahmen des Pilotprojekts der „Digitalen S-Bahn Hamburg“ im Jahr 2021, wie Schröder et al. [111] berichten. Zum Einsatz kommt Level 2 mit GoA 2. Perspektivisch soll das gesamte Hamburger S-Bahn-Netz digitalisiert und für das automatisierte Fahren ausgerüstet werden [274].

3.3.7 Innovative Lösungen

Auch außerhalb der aktuellen Spezifikationen finden sich zahlreiche Forschungsaktivitäten, welche darauf abzielen, mit unterschiedlichen Weiterentwicklungen das System der Zugsicherung und Zugbeeinflussung zu revolutionieren.

Mit dem Fokus auf Regionalstrecken haben Kipshagen [63] und Laumen et al. [73] ein „dynamisches ETCS“ auf Basis des Level 1 und damit ohne die Notwendigkeit einer Funkverbindung für die Zugbeeinflussung erarbeitet. Notwendige Voraussetzung für die dynamische Erstellung der Balisentelegramme ist eine digitale Kommunikation zwischen Stellwerk und Feldelementen, wie dies einige ESTW sowie DSTW beherrschen. Die Baliseninhalte sollen in einer solchen Architektur nicht nur signalabhängig, sondern auch fahrweg- und zugspezifisch generiert werden. Damit öffnen sich weitere Möglichkeiten, von einem ETCS-basierten Gegenfahrschutz, über eine optimierte Einschaltung und Sicherung von BÜ bis hin zur technischen Überwachung von Bedarfshalten. Mit der (Wieder-)Einführung von *Up-Link*-BG, welche Informationen vom Fahrzeug an die Infrastruktur übertragen können, ließe sich damit sogar eine balisenbasierte Gleisfreimeldung im Level 1 entwickeln, sofern die Fahrzeuge mit einem TIMS ausgestattet sind.

Das Forschungsprojekt „Neue Sekundärbahn“ [282] in den Jahren 2018 und 2019 zielte darauf ab, ein neues Systemkonzept für die Fahrweg- und Zugsicherung auf wenig belasteten Strecken im ländlichen Raum zu entwickeln. Dabei soll die streckenseitige Ausrüstung

möglichst reduziert werden, sodass ortsfeste Signale und klassische Stellwerke nicht mehr notwendig sind. Die Gleisfreimeldung soll über ein Global Navigation Satellite System (GNSS) wie beispielsweise Global Positioning System (GPS) oder *Galileo* erfolgen. Dennoch sollte die Kompatibilität zu ETCS zur Herstellung der Interoperabilität sichergestellt werden. In einem Fachartikel berichten Menzel et al. [82] über wesentliche Erkenntnisse, wie beispielsweise das Konzept virtueller Balisen, bei denen ETCS-Inhalte anhand der Ortungsinformationen an das Fahrzeug gesendet und dort wie physische Balisen behandelt werden. Die sicherungstechnischen Funktionen sollen bei der „Neuen Sekundärbahn“ dezentral und fahrzeugseitig umgesetzt werden, sodass auf monolithische Stellwerke verzichtet werden kann. Im kleinen Maßstab wurde das Systemkonzept in einem Eisenbahnbetriebsfeld als technischer Demonstrator umgesetzt. Lübs [76] fokussierte sich in seiner Arbeit auf die Entwicklung eines möglichen Betriebsverfahrens. Weitere direkte Folgearbeiten sind nicht bekannt.

Zugsicherungssysteme mit punktförmiger Übertragung benötigen prinzipbedingt physische Informationspunkte, um Informationen zu übertragen. Santiso et al. [106] schlagen die Erweiterung um „virtuelle Balisen“ vor, deren vordefinierte Inhalte denen von physischen Balisen entsprechen. Wann diese Informationen dem Fahrzeug bekannt gemacht werden, soll in diesem Konzept durch eine GNSS-Einheit auf dem Fahrzeug ausgelöst werden, der die exakten Positionen von Zug und virtuellen Balisen bekannt sind. Im Kontext von ETCS bietet eine solche Lösung auch aus Sicht der Autoren keine Vorteile, da in vielen Fällen der Übertragungsort der Informationen nicht mit dem Wirkungsort derselben zusammenfallen muss und daher die wesentliche Neuerung der virtuellen Balisen hierfür obsolet ist.

Dennoch ist die Weiterentwicklung der Ortung bei ETCS relevant für die Verbesserung der Systemperformance. Mit den aktuellen Anforderungen an die Genauigkeit von 5 m zuzüglich 5 % des zurückgelegten Weges [166] steigt das Konfidenzintervall ohne Neuortung an einer BG stark an. Dies bedingt restriktivere Überwachungen als notwendig wären, wenn eine genauere Ortung garantiert wäre. Hierfür präsentieren Gaebler und Krahl [45] unterschiedliche Ansätze, welche die ETCS-Ortung verbessern oder vollständig ersetzen könnten. Mit aktueller Technik sind im Rahmen der gültigen Spezifikationen mittlerweile Genauigkeiten von mindestens 1 m zuzüglich 1 % des zurückgelegten Weges [25] erreichbar.

Sélley et al. [116] haben im Auftrag des Deutschen Zentrums für Schienenverkehrsforschung (DZSF) den Einsatz von ETCS und DSTW auf deutschen Nebenbahnen untersucht. Hierzu wurden die als relevant für diese Fragestellung identifizierten Strecken anhand von Kennzahlen der erforderlichen Funktionalitäten von Stellwerk und Zugbeeinflussung in vier „Sicherungsstufen“ eingeteilt. Einen Überblick über die wichtigsten Ergebnisse geben Maschek et al. [80] auch in ihrem Fachartikel. Die Autoren kommen zu dem Ergebnis, dass die zwei Kategorien mit den höchsten Anforderungen mit ETCS Level 2 oS (analog der Ausrüstungsstrategie der EdB) ausgerüstet werden sollten, die nächstniedrigere Stufe mit Level 3 (!) mit einem noch zu entwickelnden „Limited RBC“. Die niedrigste Stufe soll weiterhin ohne Zugbeeinflussung auf Sicht bzw. im Einzugbetrieb betrieben werden. Für Verbindungsstrecken in Knoten ergibt sich die Ausrüstung anhand der Ausrüstung angrenzender Strecken. Die notwendige Zugintegrität auf einigen Strecken soll mittels manueller Bestätigung durch die Tf erfolgen,

bis auch für Güterzüge auf Basis der DAK eine technische Lösung für das TIMS verfügbar ist. Als Funksystem sollen in allen Fällen die öffentlichen Mobilfunknetze auch für die ETCS-Daten genutzt werden. Beide technischen Lösungen sind jedoch noch (deutlich) von einer Serienreife oder gar einem Rollout entfernt.

Aufbauend auf den Arbeiten im vorgenannten Forschungsprojekt präsentieren Maschek und Kahl [79] eine auf ETCS basierende Lösung für den ZLB mit dem Namen „Limited Radio Block Centre (LRBC)“. Voraussetzungen hierfür sind mit ETCS und TIMS ausgerüstete Fahrzeuge sowie eine Funkausrüstung im Bereich der Betriebsstellen. Auf Basis der Positionsmeldungen kann das lokale LRBC der einzelnen Betriebsstellen die Gleisbelegungen ermitteln und Fahrterlaubnisse vergeben. Vorteilhaft an dieser Lösung ist der vollständige Verzicht auf gesteuerte BG und veränderliche Außensignalisierung.

Erneut mit dem Fokus auf die Ausrüstung von Regionalstrecken mit ERTMS haben D'Alcide et al. [19] ein eigenes Konzept entwickelt. Dies hat zum Ziel, die Feldelemente sowie die Telekommunikations- und Stromverteilungsinfrastruktur zu reduzieren. Die Ortung soll unter Zuhilfenahme von GNSS genauer und einfacher werden und die Ansteuerung der Feldelemente drahtlos (Daten) und dezentral autark (Energie) erfolgen.

3.3.8 Betriebliche Aspekte

Neben den rechtlichen und technischen Aspekten sind im Zusammenhang mit ETCS auch die betrieblichen Regeln in die Untersuchung einzubeziehen und bei Bedarf bereits frühzeitig anzupassen. Idealerweise wird ein Zielbild definiert, welches die technischen und betrieblichen Aspekte vereint, sodass eine optimale Ausrüstung und ein optimaler Betrieb erreicht werden können.

Aus Luxemburger Perspektive ruft Feltz [38] dazu auf, mit der anstehenden flächendeckenden Einführung von ETCS die Betriebsprozesse grundlegend zu überarbeiten und dabei zu vereinfachen. Zukünftig soll damit ein Eisenbahnbetrieb erreicht werden, der deutlich anpassungsfähiger und standardisierter ist als der heutige.

Das dänische EIU Banedanmark nutzt als Vorreiter bereits in Teilen ein neues, prozessorientiertes Regelwerk als Fahrdienstvorschrift [5]. Hierbei werden die Verantwortlichkeiten und Schutzziele betrieblicher Situationen deutlicher benannt als in älteren Regelwerken, zugleich soll die Lesbarkeit verbessert worden sein.

Altmann et al. [1] beschreiben die Methodik und die Entwicklung einer neuen Fahrdienstvorschrift für den digitalen Bahnbetrieb bei der DB InfraGO AG in Deutschland. Diese wurde unter dem Arbeitstitel „Richtlinienfamilie 400“ geführt und sollte in Bereichen mit ETCS in der Ausprägung Level 2 oS die bisherige Fahrdienstvorschrift der Richtlinienfamilie 408 [190] ersetzen. Die Entwicklung ging von dem definierten betrieblichen Zielbild aus und sollte als rein digitales Medium verfügbar gemacht werden. Gegenüber dem heutigen, funktions- und handlungsorientierten sollte ein prozess- und schutzzielorientiertes Regelwerk geschaffen werden, u. a. mit dem Ziel, die Anwendungsfreundlichkeit und Übersichtlichkeit deutlich zu verbessern.

3.4 Untersuchungsgegenstand

Die Analyse der verfügbaren Literatur zeigt, dass der aktuelle Stand der Forschung weitgehend mit dem Stand der Technik zusammenfällt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bislang nur wenige wissenschaftliche Arbeiten zu ETCS im Allgemeinen sowie ETCS Level 1 im Besonderen existieren und die einschlägigen Quellen überwiegend als praxisnahe Fachbeiträge einzuordnen sind. Die fehlende theoretische Durchdringung und empirische Validierung begründen einen weiteren Forschungsbedarf, den diese Arbeit adressiert.

Vor diesem Hintergrund wird in dieser Arbeit am Beispiel Deutschland untersucht, wie ETCS in der Ausprägung Level 1 FS ausgehend von den betrieblichen Anforderungen technisch auszulegen und zu konfigurieren ist. Die Systemgestaltung erfolgt dabei als Basis für eine zukünftige Sicherheitsbewertung.

In einem ersten Schritt wird die für die Erfüllung der betrieblichen und sicherheitlichen Anforderungen notwendige Infrastrukturausrüstung abgeleitet. Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf der Optimierung der Infill-BG, für die ein Rahmenkonzept zur Bestimmung der Anzahl sowie ihrer optimalen Positionen entwickelt werden muss. Ziel ist die Erarbeitung anwendbarer Regeln für die vollständige Infrastrukturausrüstung aller generischen Betriebsfälle für ETCS Level 1 FS.

Neben der Hardware ist auch die Projektierung der Balisengruppeninhalte von Relevanz. Dabei müssen die Ebenen der verfügbaren Balisenkapazität und der einzelnen Pakete der ETCS-Sprache analysiert und zu einem konsistenten Gesamtkonzept zusammengeführt werden.

Da mit Änderungen der Infrastruktur und der Einführung neuer Zugbeeinflussungssysteme auch Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit verbunden sein können, werden die entwickelten Konzepte und Regeln anhand anerkannter Methoden der Eisenbahnbetriebswissenschaft hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit untersucht und bewertet.

Zuletzt wird ETCS Level 1 als eine Basis für eine spätere Integration von Automatisierungsfunktionen des Bahnbetriebs betrachtet. Die entwickelten Lösungen dürfen diese nicht einschränken. Die in dieser Arbeit entwickelten Konzepte werden daher unter dem Gesichtspunkt einer langfristigen Systemfähigkeit betrachtet.

4 Infrastrukturausrüstung

4.1 Ausrüstungs- und Technikvarianten

Zur Beschreibung und Unterscheidung der streckenseitigen technischen Komponenten und deren Eigenschaften werden im Folgenden die Begriffe „Ausrüstungsvariante“ und „Technikvariante“ eingeführt und genutzt.

Die Ausrüstungsvariante beschreibt, in welcher Form ETCS Level 1 angewendet wird. Hierbei werden im weiteren Verlauf zwei Ausprägungen der Infrastruktur unterschieden:

1. Doppelausrüstung,
2. ETCS only.

Doppelausrüstung bedeutet, dass ETCS als weiteres Zugbeeinflussungssystem auf einer Infrastruktur genutzt wird, auf der zeitgleich mindestens ein anderes (in der Regel nationales) Zugbeeinflussungssystem installiert und in Betrieb ist.[1] Dies geht in den meisten Fällen einher mit einer umfangreichen bis vollständigen Außensignalisierung. Gleichzeitig können sich dadurch Restriktionen bei der Ausrüstung und Projektierung von ETCS ergeben. Um auf einer Infrastruktur mit Doppelausrüstung fahren zu können, müssen die Fahrzeuge (und Personale), für die eine Ausrüstung mit einem Zugbeeinflussungssystem vorgeschrieben ist, mindestens eines der installierten und in Betrieb befindlichen Systeme beherrschen. ETCS only im Gegensatz dazu bedeutet, dass neben ETCS kein weiteres Zugbeeinflussungssystem vorhanden bzw. in Nutzung ist. Dementsprechend können Signalisierung, Infrastrukturausrüstung und Projektierung auf die Eigenschaften von ETCS zugeschnitten werden. Alle auf dieser Infrastruktur verkehrenden Fahrzeuge müssen – sofern für sie eine aktive Zugbeeinflussung obligatorisch ist – mit ETCS ausgerüstet sein. Etwaige Zwischenzustände, die sich im Rahmen der schrittweisen Migration einer Bestandsinfrastruktur ergeben können, sind zwischen diesen beiden Ausrüstungsvarianten einzuordnen. Eine Doppelausrüstung – ganz gleich, ob streckenseitig oder fahrzeugseitig – sollte im Kontext eines einheitlichen europäischen Eisenbahnraumes immer als notwendige Übergangslösung und nicht als Zielzustand verstanden werden.

Als zweites Unterscheidungsmerkmal werden drei Technikvarianten der Ansteuerung von Eurobalisen definiert:

1. zentrale Ansteuerung,
2. dezentrale Ansteuerung mit Fahrweginformationen,
3. dezentrale Ansteuerung ohne Fahrweginformationen.

[1] Eine Doppelausrüstung ist auch fahrzeugseitig möglich und üblich. Entsprechende Fahrzeuge sind neben ETCS mit einem oder mehreren nationalen Systemen ausgerüstet, welche bspw. über ein STM an den EVC angebunden sind. Damit ist ein grenzüberschreitender Verkehr möglich. Allerdings bedeutet eine Doppelausrüstung größere Aufwände für Konstruktion und Instandhaltung des Fahrzeugs sowie für die Ausbildung des Personals, welche weiterhin mehrere nationale Systeme beherrschen müssen.

Bei der zentralen Ansteuerung der Eurobalisen werden alle gesteuerten BG durch eine zentrale Komponente angesprochen. Im Regelfall ist diese Komponente ein Teil des zugehörigen Stellwerks. Die Informationen über die eingestellten Fahrwege sind in einem solchen System vollständig vorhanden und für das ETCS-System nutzbar. Im Feld werden die einzelnen gesteuerten Balisen der gesteuerten BG über aktive Komponenten an das Datennetz des Stellwerks angeschlossen und erhalten aus diesem die Befehle, welches Telegramm übertragen werden soll. Eine direkte elektrische Verbindung zwischen BG und Signalen oder beweglichen Fahrwegelementen ist weder vorgesehen noch notwendig. Es besteht daher die Möglichkeit, die Außensignalisierung auf die Bedürfnisse des Betriebes unter ETCS zuzuschneiden. In der Projektierung findet eine Zuordnung der Balisengruppentelegramme zu Fahrweginformationen (ggf. auch über mehrere Fahrstraßen hinweg) statt. Hierbei existieren ausschließlich fest definierte Zustände in Abhängigkeit der eingestellten Fahrwege. Zusätzlich können weitere Eigenschaften des eingestellten Fahrwegs berücksichtigt werden. Die Ansteuerung der Balisen erfolgt technisch parallel zu ggf. vorhandenen Signalen. Zeitlich müssen die BG an Haupt- und Sperrsignalen vor diesen angesteuert werden. Damit wird sichergestellt, dass ein Signal das Vorliegen einer die Weiterfahrt erlaubenden MA nur dann anzeigt, wenn eine solche auch bereits an der BG verfügbar ist. Andernfalls besteht ein Restrisiko, dass der Fahrweg stellwerksseitig eingestellt und gesichert ist, das entsprechende Signal einen Fahrtbegriff anzeigt bzw. die Erlaubnis zur Annäherung gibt, die BG jedoch beim Überqueren die neuen Informationen noch nicht oder aufgrund eines technischen Fehlers gar nicht bereitstellen kann.

Aus demselben Grund müssen die vorgelagerten Infill-BG nach dem Einstellen und Sichern des Fahrwegs von der Signal-BG ausgehend entgegen der Fahrtrichtung angesteuert werden. Tritt an einer Stelle ein Fehler auf, wird der Prozess abgebrochen und alle weiter entfernt liegenden BG verbleiben in der Grundstellung und kündigen einen Halt an. Damit kann der Betrieb unter Inkaufnahme von Verzögerungen durch eine verspätete Aufwertung aufrechterhalten werden, ohne dass unbeabsichtigte Zwangsbremsungen aufgrund einer plötzlich verkürzten MA auftreten.

Bei einer dezentralen Ansteuerung wird die Entscheidung darüber, welches Telegramm an welcher Balise übertragen wird, dezentral in den im Feld installierten LEUs getroffen. LEUs sind damit meistens einem Signal zugeordnet und steuern die diesem Signal logisch zugehörigen BG an. Die LEUs werten im Regelfall als führendes Merkmal das Signalbild der physisch vorhandenen Außensignalisierung aus. Dies betrifft im Mindestumfang sowohl Haupt- als auch stellenweise die Rangiersignale. Vorsignale können zur Optimierung der Verkabelung genutzt werden, sodass beispielsweise Infill-BG darüber angesteuert werden und nicht direkt anhand der Stellung des angekündigten Hauptsignals. Zusätzlich zur Auswertung der aktuellen Signalstellung über Signallampenströme (bei Lichtsignalen) bzw. Flügelschalter (bei Formsignalen), werden an ausgewählten Weichen deren Lagen ausgewertet. Dies ist notwendig, um vollständige Fahrweginformation zu erhalten. In vielen Fällen kann aus einem Signalbild alleine kein eindeutiger Rückschluss auf den eingestellten Fahrweg gezogen werden. Aus logischer Sicht fungiert die Außensignalisierung damit als mittelbarer Vermittler der Fahrweginformationen zwischen dem Stellwerk und dem ETCS-System. Dies ahmt in gewisser Weise die Aufgaben

eines menschlichen Tf nach. Als Folgerung ergibt sich, dass eine umfangreiche Außensignalisierung benötigt wird, um ETCS mit den erforderlichen Daten zu versorgen. Die Projektierung erfolgt auf der Ebene der LEU. In jeder LEU findet dezentral die Zuordnung der Balisengruppentelegramme zu Signalbildern und Weichenlagen statt. Damit stehen Fahrweginformationen mindestens für die folgende Fahrstraße bereit, nach Fähigkeiten des Signalsystems auch über mehrere Fahrstraßen hinweg. Nachteilig hat sich in einigen Anwendungen herausgestellt, dass bei dem Wechsel des Signalbildes (undefinierte) Zwischenzustände auftreten können, bei denen kurzzeitig Signallampen leuchten, welche kein konsistentes Signalbild ergeben. In der LEU müssen diese Zwischenzustände – sofern sie regelmäßig und vorhersehbar auftreten – explizit berücksichtigt werden, damit dennoch stets ein konsistentes Telegramm erzeugt werden kann. Andernfalls können sie zu ungewollten Zwangsbremsungen von Fahrzeugen führen, wenn genau zu diesem Zeitpunkt versucht wird, den Inhalt einer BG aufzunehmen.

Werden keine Weichenlagen genutzt, sondern ausschließlich die Signalstellungen ausgewertet, so wird dies als dezentrale Ansteuerung ohne Fahrweginformationen beschrieben. Im Gegensatz zur vorherigen Ausrüstungsvariante kann nicht in allen Fällen eine exakte Zuordnung zwischen Signalbild und Fahrweg vorgenommen werden. In solchen Fällen ist ein besonderes Vorgehen notwendig, um die Sicherheit des Bahnbetriebs durch eine Betrachtung der Kombination der ungünstigsten Fahrwegeigenschaften sicherzustellen. Die Projektierung der LEU ordnet den Signalbildern die Balisengruppentelegramme zu. Auch hier ist die Granularität und Reichweite der ermittelbaren Informationen abhängig vom vorhandenen Signalsystem.

Die beschriebenen Technik- und Ausrüstungsvarianten sind ohne Beschränkung miteinander kombinierbar. Nach den betrieblichen Anforderungen der Infrastruktur sind auch abschnittsweise unterschiedliche Lösungen innerhalb eines Ausrüstungsbereiches möglich.

4.2 Signalisierung

Für den Betrieb mit ETCS Level 1 ist stets eine gewisse veränderliche Signalisierung durch Außensignale notwendig. Dies ergibt sich aus den technischen Eigenschaften, nach denen eine Informationsübertragung von der Infrastruktur an das Fahrzeug ausschließlich an den Standorten der BG möglich ist. Daher muss davon ausgegangen werden, dass die Fahrzeuge im Stillstand keine Informationen erhalten können, sondern dafür die nächste BG erst vollständig überfahren müssen. Daraus leitet sich die Notwendigkeit von veränderlichen Anzeigen oder Signalen ab, die dem Tf anzeigen, ob an der vorausliegenden BG eine Fahrterlaubnis vorliegt. Im Regelbetrieb ist diese Information nicht sicherheitsrelevant, da die Sicherheit durch ETCS gewährleistet wird. In der Rückfallebene hingegen, wenn ETCS keine oder nur noch rudimentäre Sicherungsaufgaben übernimmt, kann eine signaltechnisch sichere Ausführung der veränderlichen Anzeige der Außenanlage vorteilhaft oder gar notwendig sein. Zugleich können die Anforderungen an die Sichtbarkeit und Sichtweite dieser Signalisierung reduziert werden, da die Information einer solchen vereinfachten Signalisierung nur bei geringen Geschwindigkeiten (*Release Speed* oder Fahrten in der Rückfallebene) erfasst werden muss.

Diese überschreiten in der Regel 40 km/h nicht. Damit kann auch eine Signalverdichtung zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit beispielsweise im Bahnhofsbereich einhergehen.

Im einfachsten Fall besteht die Notwendigkeit, mit ETCS verkehrenden Fahrzeugen eine rein binäre Information (Fahrtfreigabe vorhanden oder Fahrtfreigabe nicht vorhanden) bereitzustellen. Die Signalisierung kann dementsprechend auf zwei Signalbegriffe reduziert werden. Soll darüber hinaus vorab aus dem Signalbegriff ableitbar sein, ob eine Fahrtfreigabe für eine Bewegung unter vollständiger Überwachung (also in den Betriebsarten FS oder OS) oder die Bewegung in einer Betriebsart mit größerer Verantwortung durch die/den Tf (also in den Betriebsarten Staff Responsible (SR) oder Shunting (SH)) durchgeführt werden soll, so werden in Summe für den Regelbetrieb drei unterschiedliche Signalbegriffe benötigt. Dies stellt gegenüber den meisten aktuellen Signalbegriffen eine wesentliche Reduktion dar, welche prinzipbedingt eine höhere Informationsmenge repräsentieren müssen. Insbesondere die in den meisten Signalsystemen vorhandenen Anzeigen von Geschwindigkeiten, Richtungsinformationen etc. können entfallen. Die physischen Signale können daher insgesamt kompakter und leichter konstruiert werden, was wiederum positive Auswirkungen auf die Anforderungen an die Aufhängung (z. B. Mast oder Bahnsteigdach) oder die Gründung sowie die Instandhaltung besitzt.

Eine digitale Lösung über das Senden einer Nachricht an beispielsweise ein persönliches Endgerät des Tf mit einem Abfahrauftrag bzw. der Aufforderung, an die BG zum Zweck der Aufnahme einer MA heranzufahren, wird an dieser Stelle nicht weiter vertieft. Ein solches System benötigt eine (sichere) Kenntnis über die Standorte der Züge, um die Fahrtstellung eines virtuellen Signals dem richtigen Zug und damit dem richtigen Endgerät zuordnen zu können, vgl. Digitaler Befehl [50]. Im Level 1 besitzt die Infrastruktur außerhalb des nichtsicheren Systems ZNA jedoch keine Kenntnis darüber, welcher Zug sich an welcher Stelle befindet oder ob dieser überhaupt unter der Überwachung und Führung von ETCS ist. Hierfür wäre die Entwicklung einer technischen Lösung, beispielsweise auf Basis eines modernen Leitsystems oder ZNA notwendig.

Aus demselben Grund ist eine Dunkelschaltung von Signalen nicht möglich. Die Bewertung, ob auftretende Differenzen zwischen der Führerstandssignalisierung und der Außensignalisierung als Signalisierungswiderspruch zu werten sind, muss durch die EIU in Abstimmung mit der jeweils zuständigen Aufsichtsbehörde geklärt werden. Hierbei ist auch das betriebliche Regelwerk einzubeziehen, welches Festlegungen enthalten muss, in welcher Situation welche Art der Signalisierung beachtet werden muss und welche maßgebend ist. Im Sinne des anzustrebenden Zielbildes sollte die Führerstandssignalisierung in Bezug auf die Geschwindigkeitssignalisierung Vorrang besitzen, da sonst wertvolle Potenziale nicht ausgenutzt werden können. Eine Gefährdung des Bahnbetriebs tritt dabei nicht auf, da das System ETCS genauso wie die konventionelle Technik signaltechnisch sicher ausgeführt ist und darüber hinaus den Vorteil besitzt, jegliche Geschwindigkeit individuell und exakt zu überwachen und ggf. eine Sicherheitsreaktion auslösen kann.

Für den reinen ETCS-Betrieb werden sämtliche Vorsignale nicht benötigt, da einerseits die Informationen auf dem DMI angezeigt werden, andererseits der Beginn eines notwendigen Bremsvorgangs individuell für jeden Zug berechnet wird und nicht mehr allgemeingültig festgelegt ist.

Im Anwendungsfall Deutschland bildet die ESO [244] die rechtliche Grundlage zur Ausgestaltung der Signalisierung. Die ESO erfährt nur selten Änderungen. So sind beispielsweise die seit dem Aufkommen der ESTW zum Standard gewordenen Ks-Signale weiterhin nicht in der aktuellen ESO enthalten, sondern sind durch Bescheid des EBA als „Betriebsversuch“ genehmigt [241]. Im Bereich der DB InfraGO AG wird die ESO durch das Signalbuch (Richtlinie 301) [213] konkretisiert und erweitert. Dies betrifft die betrieblichen Auswirkungen und Handlungen, die sich aus den beschriebenen Signalbegriffen ergeben, und umfasst auch Orientierungszeichen. Diese sind den Signalen untergeordnet und können grundsätzlich von jedem EIU selbst entwickelt und angewendet werden.

4.3 Balisengruppen

4.3.1 Allgemeines

BG werden bei der Anwendung von ETCS Level 1 benötigt, um Informationen von der Infrastruktur an das Fahrzeug zu übertragen. Eine BG bezeichnet nach Subset 023 [155] eine oder mehrere Balisen, welche dieselbe Referenzposition besitzen. Jede BG darf nach Abschn. 3.4.1.1 Subset 026 [145] maximal 8 Balisen umfassen. Wenn nicht anders angegeben, wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit immer von BG bestehend aus zwei Balisen ausgegangen.

Aus der alleinigen Nutzung von BG zur Informationsübertragung von der Infrastruktur an das Fahrzeug ergeben sich Orte, an denen BG obligatorisch sind. Hierbei gilt zu beachten, dass Informationen nicht zwangsläufig an ihrem Wirkungsort übertragen werden müssen, sondern auch bereits vorher übertragen werden können, was die Anzahl notwendiger BG reduziert. Dies gilt insbesondere für die Geschwindigkeits- und Gradientenprofile. Auch die meisten weiteren Pakete bieten die Möglichkeit, den Übertragungsort vom Wirkungsort durch eine passende Projektierung zu trennen. Einige Informationen müssen jedoch zwangsläufig genau dort übertragen werden, wo sie benötigt werden, da ansonsten kein Betrieb möglich ist. Diese umfassen in erster Linie die Grenzen von Zugfolgeabschnitten, also bei konventioneller Technik die Standorte der Hauptsignale. Die Hauptsignale werden ergänzt durch vorgelagerte BG, den sogenannten Infill-Balisengruppen, welche eine Vorankündigung bzw. Vorsignalisierung bereitstellen. Auch weitere veränderliche Signale wie Überwachungssignale oder Rangiersignale müssen bzw. können mit einer zugehörigen BG ausgerüstet werden, um ihre Informationen in die Welt der Führerstandssignalisierung von ETCS zu überführen. Da bestimmte BG auch zum Zurücksetzen des Konfidenzintervalls der Ortung genutzt werden (dies sind alle durch *Linking* angekündigten BG), sind auch hierfür stellenweise eigene BG notwendig. Weitere notwendige und optionale BG ergeben sich aus den gewünschten Funktionalitäten sowie den Örtlichkeiten.

Eine detaillierte Auflistung mit zugehörigen Erläuterungen möglicher BG-Typen erfolgt im nächsten Abschnitt.

4.3.2 Typisierung

Im Sinne einer effizienten Beschreibung und Planung der BG ist es sinnvoll, die Vielzahl möglicher BG und deren Funktionen zu reduzieren, zu typisieren und damit die Projektierung möglichst generisch zu beschreiben. Die Typisierung erfolgt funktional und korrespondiert in vielen Fällen mit den Standorten der BG.

Im Folgenden werden Balisengruppentypen mit diesen Funktionen unterschieden:

- ETCS Stop Marker bzw. Hauptsignal,
- ETCS Stop Marker bzw. Hauptsignal mit „Infill“-Funktion,
- Sperr- bzw. Rangiersignal,
- Zugdeckungssignal,
- Rangierhalttafel,
- Infill,
- Überwachungssignal und Überwachungssignalwiederholer,
- Ortungskorrektur,
- Ankündigung und Aufhebung Langsamfahrstelle,
- Textmeldung,
- Track Condition,
- Repositioning,
- vorbereitendes Gradienten- und statisches Geschwindigkeitsprofil,
- sicherer Halteplatz,
- Erhöhung und Reduktion der SR-Geschwindigkeit,
- maximal zulässiger Bremsweg,
- Ankündigung einer Transition,
- Transition.

Mit diesen Grundtypen werden praktisch alle generischen Anwendungsfälle abgedeckt. Die für die jeweiligen Grundtypen relevanten Zustände und ETCS-Pakete werden nachfolgend in Reihenfolge obiger Liste vorgestellt. Eine physische BG kann auch die Funktionen mehrerer Typen übernehmen. In solchen Fällen müssen die unten angegebenen Pakete und Zustände aller relevanten Grundtypen kombiniert werden. Die nachfolgenden Absätze greifen zum Teil späteren Ergebnissen dieses Kapitels vor.

Die Ausrüstung aller Hauptsignale bzw. ETCS *Stop Marker* mit BG ist obligatorisch. Tabelle 4.1 auf der nächsten Seite zeigt die benötigten Pakete. Dabei entspricht das Default-Telegramm einem Haltbegriff ergänzt um die Kennzeichnung als ebensolches (Paket 254) und eine Textmeldung (Paket 73). Bei Halt des zugehörigen Signals muss zur Gewährleistung eines *Trip* bei jeglicher unberechtigter Vorbeifahrt eine vollständige, konsistente MA übertragen werden. Diese umfasst die Distanz zwischen dem Referenzpunkt der Signal-BG und

dem Signalstandort als Länge sowie die Angabe des maßgebenden DP. Ein OL wird hier nicht angegeben, da dieser nicht dauerhaft zur Verfügung steht. Eine *Level Transition Order* (Paket 41) kommandiert eine sofortige Transition zum Level 1, um auch OBU im falschen Level wie gewünscht zu beeinflussen. Fahrzeuge in den Betriebsarten SR und SH werden durch die entsprechenden Pakete 132 und 137 an einer Vorbeifahrt gehindert. Bei Fahrtstellung mit eingestellter Zugstraße wird die entsprechende MA übertragen, ergänzt um die *Linking Information* des Pakets 5. Fahrzeuge in der Betriebsart SR dürfen die BG überqueren, solche in der Betriebsart SH werden an einer Vorbeifahrt gehindert.

Tab. 4.1: ETCS-Pakete für BG des Typs „ETCS Stop Marker bzw. Hauptsignal“.

	5	**12**	**21**	**27**	**41**	**65**	**73**	**132**	**137**	**254**
Halt	–	X	X	X	X	–	–	X	X	–
Default	–	X	X	X	X	–	X	X	X	X
Zugstraße	X	X	X	X	–	(x)	(x)	X	X	–

Hochstehende Lichtsperrsignale, die Start oder Ziel von Zugstraßen sein können, werden analog zu Hauptsignalen ausgerüstet.

Sperr- bzw. Rangiersignale können optional mit BG ausgerüstet werden. Bei solchen, die Zugstraßen sichern oder selbst innerhalb von Zugstraßen liegen, sollte eine Ausrüstung angestrebt werden. Die notwendigen Pakete (siehe Tabelle 4.2) ergeben sich aus der Notwendigkeit, Fahrten in den Betriebsarten FS, OS, SR und SH zu beeinflussen. Bei Halt werden jegliche Fahrten unterbunden und analog einem Hauptsignal eine *Level Transition Order* in den Level 1 kommandiert. Bei eingestellter Rangierstraße erlaubt das Paket 132 eine Vorbeifahrt für Fahrzeuge in der Betriebsart SH. Finden in der betroffenen Betriebsstelle Rangierbewegungen auch in der Betriebsart SR statt, so ist dies in der Projektierung zu berücksichtigen. Bei eingestellter Zugstraße werden Fahrten in der Betriebsart SH unterbunden, in der Betriebsart SR erlaubt und für Fahrten in den Betriebsarten FS und OS werden keine Informationen übertragen, sodass die BG für diese praktisch ohne Einfluss ist.

Tab. 4.2: ETCS-Pakete für BG des Typs „Sperr- bzw. Rangiersignal“.

	12	**21**	**27**	**41**	**73**	**132**	**137**	**254**
Halt	X	X	X	X	–	X	X	–
Default	X	X	X	X	X	X	X	X
Rangierstraße	X	X	X	X	–	X	X	–
Zugstraße	–	–	–	–	(x)	X	X	–

Wird zur Ansteuerung der BG lediglich das Signalbild ausgewertet (dezentrale LEU), so kann keine Unterscheidung zwischen Zug- und Rangierstraße getroffen werden, sodass bei Signal Sh 1 sowohl Zug- als auch Rangierfahrten erlaubt werden müssen.

Zugdeckungssignale werden mit einer gesteuerten BG ausgerüstet. Diese überträgt bei Kennlicht an allen Balisen ein Leertelegramm, enthält also keine Informationen. In Haltstellung entsprechen die übertragenen Pakete denen eines Sperrsignals (siehe oben).

Die Rangierhalttafel (Ra 10) als Grenze von Rangierfahrten in Richtung der freien Strecke kann optional mit ungesteuerten BG ausgerüstet werden, siehe Tabelle 4.3. Damit kann eine rudimentäre Sicherung beteiligter Fahrten gegen unberechtigtes Überfahren umgesetzt werden. Fahrten in der Betriebsart SH werden mit dem Paket 132 gestoppt; mit dem Paket 73 kann eine ergänzende Textnachricht übertragen werden. Das Paket 137 zum Stoppen von Fahrten in der Betriebsart SR kann nur angewendet werden, wenn statt einer ungesteuerten eine gesteuerte BG zum Einsatz kommt, siehe Tabelle 4.4. Bei eingestellter Ausfahrzugstraße unterbindet sie Fahrten in der Betriebsart SR nicht, da diese autorisiert sein können. Wie auch bei Sperrsignalen kann trotz Zwangsbremseingriff eine Gefährdung gerade bei geschobenen Rangierfahrten systembedingt nicht ausgeschlossen werden.

Tab. 4.3: ETCS-Pakete für ungesteuerte BG des Typs „Rangierhalttafel“.

	73	**132**	**137**
Festdaten	X	X	(x)

Tab. 4.4: ETCS-Pakete für gesteuerte BG des Typs „Rangierhalttafel“.

	73	**132**	**137**
Grundstellung	X	X	X
Default	X	X	X
Ausfahrzugstraße	X	X	–

Infill-BG übernehmen die Funktion einer Vorsignalisierung und spiegeln im einfachsten Fall die Informationen, die an der BG des nächsten Hauptsignals bzw. *ETCS Stop Marker* zu erwarten sind. Daher sind sie grundsätzlich schaltbar auszuführen. Infill-Informationen werden in der ETCS-Sprache dadurch gekennzeichnet, dass sie im jeweiligen Telegramm der Balisen nach dem Paket 136 angeordnet sind. Dieses legt den Referenzort der nachfolgenden Informationen fest. Als Referenzort wird eine BG angegeben, eindeutig identifiziert durch ihre *NID_BG* (ggf. in Kombination mit einer *NID_C*). Diese BG muss selbstverständlich durch das Vorliegen von *Linking Information* bekannt sein. Eine Übersicht der Pakete gibt Tabelle 4.5.

Tab. 4.5: ETCS-Pakete für BG des Typs „Infill“.

	136	**12**	**21**	**27**	**65**	**254**
Halt	X	X	X	X	–	–
Default	x	X	X	X	–	X
Zugstraße	X	X	X	X	(x)	–

Der Referenzort einer Infill-BG kann auch variabel sein, wenn diese in Abhängigkeit des eingestellten Fahrwegs unterschiedlichen Hauptsignalen bzw. *ETCS Stop Marker* vorgelagert ist.

Die BG von Überwachungssignalen (siehe Tabelle 4.6 auf der nächsten Seite) vor BÜ übermitteln den aktuellen Sicherungszustand des zugehörigen BÜ. Dies erfolgt mit dem Paket 88. Für Fahrten in der Rückfallebene in der Betriebsart SR wird bei nicht ausreichend gesichertem

BÜ eine TSR nebst zugehörigem, maßgebender Gradiente (Pakete 65 und 141) übertragen. Optional ist die Vorgabe des maximal zulässigen Bremswegs (Paket 52) enthalten. Über die konkrete Anwendung dieser Option ist im Einzelfall zu entscheiden. Weitere Informationen hierzu gibt Abschnitt 4.5.5 auf Seite 88.

Tab. 4.6: ETCS-Pakete für BG des Typs „Überwachungssignal“.

	52	**65**	**88**	**141**	**254**
BÜ nicht ausreichend gesichert	(x)	X	X	X	–
Default	(x)	X	X	X	X
BÜ gesichert	–	–	X	–	–

Die BG eines Überwachungssignalwiederholers (siehe Tabelle 4.7) unterscheidet sich von der eines Überwachungssignals in der Hinsicht, dass sie im Falle des gesicherten BÜ die vorher kommandierte TSR mit dem Paket 66 widerrufen kann, um auch für Fahrten in der Betriebsart SR einen flüssigeren Betriebsablauf zu erlauben. Die übrigen Inhalte entsprechen dem der ÜS-BG.

Tab. 4.7: ETCS-Pakete für BG des Typs „Überwachungssignalwiederholer“.

	52	**65**	**66**	**88**	**141**	**254**
BÜ nicht ausreichend gesichert	(x)	X	–	X	X	–
Default	(x)	X	–	X	X	X
BÜ gesichert	–	–	X	X	–	–

Muss zur Ortungskorrektur eine BG eingeplant werden, so besteht diese aus einer einzelnen, ungesteuerten Balise. Die Balise enthält außer ihrem *Header* und dem Abschlusspaket 255 keine weiteren Daten.

Langsamfahrstellen oder andere Geschwindigkeitseinschränkungen, welche nicht Teil des SSP sind, werden mit dem Paket 65 kommandiert. Gleiches gilt auch für Restriktionen, die technisch überwacht werden sollen, auch wenn Fahrten nicht unter Vollüberwachung von ETCS stehen. Hierfür ist es notwendig, die Distanz bis zum Beginn sowie die Länge und die zulässige Geschwindigkeit der Einschränkung zu projektieren. Zur lokal eindeutigen Identifikation muss jede TSR eine *NID_TSR* erhalten. Wird zu einem späteren Zeitpunkt eine TSR mit derselben *NID_TSR* übertragen, so überschreibt diese die erste TSR. Zuletzt ist festzulegen, ob die Geschwindigkeit der TSR über die gesamte Zuglänge oder nur für die Zugspitze überwacht werden soll. Ersteres kann als Standardfall angesehen werden, letzteres kommt bspw. bei BÜ zu Einsatz, bei dem nach dem Sichern und dem Befahren der ersten Hälfte zügig beschleunigt werden soll. Die Berechnung der Bremskurven und des dynamischen Geschwindigkeitsprofils unter Berücksichtigung der TSR erfolgt wie bei anderen Restriktionen als Kernfunktion auf dem Fahrzeug. Um jedoch auch für Fahrten z. B. in der Betriebsart SR, welche potenziell kein Gradientenprofil vorliegen haben, eine sichere Bremskurve berechnen zu können, muss mit jedem Paket 65 auch ein Paket 141 übertragen werden. Dieses legt eine Standardneigung fest, welche bei der Berechnung der Bremskurven heranzuziehen ist, wenn kein Gradientenprofil vorhanden ist. Das Paket 141 muss die restriktivste Neigung (die kleinste Steigung oder das

größte Gefälle) enthalten, welches zwischen Ankündigung und Beginn der TSR anzutreffen ist.

Die Aufhebung einer Langsamfahrstelle, welche mit dem Paket 65 kommandiert wurde, ist mit dem Paket 66 möglich. Das Widerrufen ist unmittelbar gültig und erfolgt anhand der vergebenen, lokal eindeutigen *NID_TSR*. Anwendungsmöglichkeiten für die Aufhebung einer Langsamfahrstelle sind beispielsweise das vorzeitige, seitliche Ausfahren aus einer bestehenden Langsamfahrstelle oder der Wegfall der Notwendigkeit einer Langsamfahrstelle, möglicherweise auch noch vor ihrem Beginn.

Textmeldungen werden mit dem Paket 73 übertragen. Weitere Pakete sind hierfür nicht notwendig. Wird dieser Typ nicht mit einem anderen kombiniert, entscheidet der jeweils konkrete Anwendungsfall darüber, ob die BG gesteuert oder ungesteuert ist. Grundsätzlich ist eine gesteuerte BG nur dann notwendig, wenn wechselnde Textmeldungen in Abhängigkeit des Zustands anderer Elemente oder Systeme übertragen werden müssen. Andernfalls kann eine ungesteuerte BG eingesetzt werden.

Diverse Infrastruktureigenschaften können mit dem Paket 68 bekannt gemacht werden, große Metallmassen (siehe hierzu auch Abschnitt 4.3.3 auf Seite 61) werden mit dem Paket 67 angekündigt. Beide dieser Pakete benötigen keine weiteren Pakete und müssen nicht am Wirkungsort übertragen werden, sodass sie in vielen Fällen mit anderen BG-Typen zusammengefasst werden können. Je nach konkreter Anwendung kommen gesteuerte oder ungesteuerte BG zum Einsatz. Relevant für die Positionierung sind die minimal einzuhaltenden Ankündigungszeiten bei maximal örtlich zulässiger Geschwindigkeit gemäß dem projektierten SSP. Diese sind im Subset 040 [165] definiert zu:

- 17 s vor stromlosen Abschnitten, die mit gesenktem Stromabnehmer zu befahren sind,
- 11 s vor stromlosen Abschnitten, die mit ausgeschaltetem Hauptschalter zu befahren sind,
- 17 s vor dem Wechsel des Stromsystems,
- 10 s vor Bereichen, in denen das Fahrzeug druckdicht sein muss und
- 10 s vor Bereichen, in denen zusätzliche Bremssysteme ausgeschaltet sein müssen.

Für alle anderen Eigenschaften sind die normalen, maximalen Latenzen bei der fahrzeugseitigen Verarbeitung der empfangenen Informationen zu berücksichtigen.

Repositioning muss nur angewendet werden, wenn das infrastrukturseitige ETCS-System keine oder nur eingeschränkte Kenntnisse der eingestellten Fahrwege besitzt. In solchen Fällen müssen die MA und zugehörige Pakete als restriktivste Kombination aller möglichen Fahrwege projektiert werden, vgl. Abschn. 3.8.3.5 [145]. Mit dem Paket 16 wird dann nach einer Fahrwegverzweigung, nach welcher der Fahrweg eindeutig ist oder weniger Varianzen aufweisen kann, die aktuelle *Section* der MA angepasst, um bspw. das Erreichen eines weiter entfernt stehenden Signals zu ermöglichen. Ergänzt werden kann dieses Paket um die Pakete 21 und 27, um das auf dem Fahrzeug vorliegenden Gradienten- und Geschwindigkeitsprofil zu aktualisieren und so eine genauere Abbildung der Infrastruktureigenschaften zu erreichen. In vielen

Fällen können die Repositioning-BG als ungesteuerte BG ausgeführt werden. Zudem sind mit dem Paket 5 aktualisierte *Linking Information* zu übertragen.

Um bei startenden Zügen einen möglichst frühzeitigen Wechsel in die Vollüberwachung der Betriebsart FS zu erreichen, können vorbereitende Gradienten- und Geschwindigkeitsprofile angewendet werden. Der Wechsel in die Betriebsart FS kann erst erfolgen, wenn beide Profile mindestens über die gesamte Zuglänge bekannt sind. Diese Profile werden mit den regulären Paketen 21 und 27 in Bereichen mit häufig startenden Zügen übertragen, um die Distanz bis zur BG am Hauptsignal zu überbrücken. Durch die Projektierung muss sichergestellt werden, dass ein- und durchfahrende Züge durch die zusätzlichen Profile nicht in ihrer Fahrt eingeschränkt werden. Dies kann bspw. durch Maskieren erreicht werden. Dabei wird eine spezifizierte Eigenschaft des *Linking* genutzt, dass die OBU *Messages* von als verlinkt gekennzeichneten BG, die nicht über *Linking Information* (Paket 5) angekündigt wurden, nicht verarbeitet, siehe Abschn. 3.4.4.2 Subset 026 [145]. Besonders bei vorhandenen Halteplatz-BG (siehe nachfolgender Absatz) können die vorbereitenden Streckendaten ohne zusätzliche Hardware und in vielen Fällen mit geringem Zusatzaufwand in der Projektierung übertragen werden.

Halteplatz-BG dienen der Sicherung startender Züge und werden als gesteuerte BG unmittelbar hinter notwendigen sicheren Halteplätzen von Reisezügen installiert. Die notwendigen ETCS-Pakete in Abhängigkeit des Zustands ergeben sich aus Tabelle 4.8. Das Paket 3 mit den NV wird in zwei Ausprägungen genutzt. Bei eingestellter Zugstraße am folgenden Hauptsignal werden die regulären Werte übertragen, in allen anderen Zuständen diejenigen mit abgesenkter SR-Geschwindigkeit. Mit dem Paket 66 wird eine vorher vergebene TSR aufgehoben, um den Betrieb zu beschleunigen. Für die Herleitung der Funktionen und vertiefte Details sei auf Abschnitt 4.3.4 auf Seite 64 verwiesen.

Tab. 4.8: ETCS-Pakete für BG des Typs „Halteplatz“.

	3	**66**	**254**
Halt	X	–	–
Default	X	–	X
Rangierstraße	X	–	–
Zugstraße	X	X	–

Auf längeren Abschnitten ohne Weichen und andere Zwangspunkte kann die zulässige Geschwindigkeit in der Betriebsart SR ggü. dem normalerweise gültigen Wert angehoben werden, um den Betrieb in der Rückfallebene zu beschleunigen. Die eigentliche Erhöhung der SR-Geschwindigkeit erfolgt mit einem Paket 3 mit angepasstem Wert der Variablen *V_NVSTFF*. Darüber hinaus übertragen solche BG auch eine TSR mit dem Paket 65, welche mit unendlicher Länge an dem Punkt beginnt, an dem die Erhöhung endet. Die TSR enthält dieselbe Geschwindigkeit wie die nachfolgende SR-Geschwindigkeit, um eine geregelte Führung auf die Absenkung der zulässigen Geschwindigkeit zu erreichen. Ergänzend ist ein Paket 141 zur Angabe der maßgebenden Neigung in diesem Abschnitt zwingend notwendig. Da diese TSR nur auf Fahrzeuge in der Betriebsart SR wirken soll, muss die BG maskiert sein und kann

nicht mit z. B. einer Signal-Balisengruppe kombiniert werden. Alternativ ist es möglich, das Paket 3 an der Signal-BG zu übertragen und für die Übermittlung der TSR eine gesonderte BG vorzusehen, welche aus Sicherheitsgründen jedoch doppelt ausgeführt werden muss.

Am Ende von Bereichen mit erhöhter SR-Geschwindigkeit muss diese auch wieder auf den regulären Wert gemäß NV abgesenkt werden. Daher enthalten sie ein Paket 3 mit den NV mit der regulären SR-Geschwindigkeit sowie die Aufhebung der vorher vergebenen TSR mit dem Paket 66.

Sowohl die Ankündigung einer Transition als auch eine unmittelbare Transition werden mit dem Paket 41 definiert. Der Unterschied zwischen diesen beiden liegt in dem Ort der Transition, welche in einiger Entfernung liegt, respektive unmittelbar erreicht ist. Weitere zu projektierende Pakete und Besonderheiten ergeben sich aus der Örtlichkeit sowie der Art der Transition, siehe auch Abschnitt 4.6 auf Seite 94.

Tabellen C.1 und C.2 auf Seite 177 und auf Seite 178 im Anhang zeigen anhand der Ril 301 auf, welche weiteren Signale und Orientierungszeichen mit welchen ETCS-Funktionen in der Führerstandssignalisierung berücksichtigt werden.

4.3.3 Standorte

Die Projektierung der Balisenstandorte ist im Level 1 essenziell für die Erfüllung der Sicherheitsanforderungen, aber auch für die Performance des Gesamtsystems. Bedingt durch die physische Ausdehnung sowie die genutzten physikalischen Prinzipien (Induktion für die Energieversorgung, Frequency shift keying (FSK) eines Magnetfelds für die Datenübertragung) zwischen Infrastruktur und Fahrzeug über die Luftschnittstelle (*Interface „A“*) [152] können BG jedoch nicht an allen Stellen der Infrastruktur installiert werden. Solche Stellen sind möglichst frühzeitig zu ermitteln und in der Planung zu berücksichtigen.

Durch die physische Ausdehnung der Balisen können sie beispielsweise nicht in Weichen im Bereich zwischen Zungenspitze und dem Ende der Radlenker verlegt werden. Gleiches gilt für die Fangvorrichtungen von Schutz- und Fangschienen. Durch die Auslenkungen des BTM am Fahrzeug sollten in engen Bogenradien unterhalb von 300 m Balisen vermieden werden und auch in kleinen Ausrundungsradien von Kuppen und Wannen kann in gewissen Konstellationen eine saubere Übertragung nicht gewährleistet werden.

Einbauten im Gleis können die möglichen Orte von Balisen beschränken, vgl. Ril 819.1340 [208]. BÜ, Reisendenüberwege (RÜ) und sonstige Gleisquerungen können den vorgesehenen Einbauraum von Balisen bereits belegen, sodass die Balise an anderer Stelle oder mit einer Sonderkonstruktion eingebaut und mit einem magnetisch transparenten Deckel versehen werden muss. Gleiches gilt für Befahrbarkeitsplatten und Schallabsorber, wo ggf. Aussparungen vorgesehen werden müssen. In Gleisen auf fester Fahrbahn können die zur Balisenmontage geeigneten Orte konstruktionsbedingt eingeschränkt sein.

Bedingt durch die Nutzung eines Magnetfeldes zur Datenübertragung von den Balisen an das fahrzeugseitige BTM können größere Metallmassen diese Kommunikation stören bzw. Fehlalarme auslösen. Aus diesem Grund dürfen im Bereich sogenannter „großer Metallmassen“ keine BG verlegt werden. Die Definition, wann eine Metallmasse als „groß“ bewertet wird, enthält das Subset 036 [152]. Meistens handelt es sich hierbei um Stahlbrücken und metallische Einbauten im Gleis. Schutz- und Führungsschienen fallen in der Regel nicht in die Kategorie der großen Metallmassen und limitieren die Positionierung der BG maximal durch physische Restriktionen (siehe oben). Große Metallmassen müssen dem Fahrzeug vorab bekannt gemacht werden, damit Fehlalarme währenddessen unterdrückt werden. Dies erfolgt mit dem Paket 67. Auch im Bereich von Schaltschleifen von BÜ können Einschränkungen bestehen.

Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass in Planunterlagen die Position einer BG stets mit ihrem Referenzpunkt angegeben ist, eine physische BG jedoch eine Ausdehnung in Längsrichtung besitzt. Dies bestimmt sich aus der Anzahl der Balisen in einer BG und deren Abständen zueinander. Die Abstände der Balisen einer BG untereinander ergeben sich aus den Spezifikationen der Eurobalisen [152] zu mindestens 2,3 m für *Reduzed Size* und 2,6 m für *Standard Size* Eurobalisen bis zu einer Geschwindigkeit von 180 km/h. Darüber hinaus bis einschließlich 300 km/h sind für beide Typen mindestens 3,0 m einzuhalten, bis einschließlich 500 km/h vergrößert sich der Wert auf mindestens 5,0 m, siehe Abschn. 5.6.3 Subset 036 [152].

Auch zwischen den äußersten Balisen benachbarter BG sind geschwindigkeitsabhängige Mindestabstände einzuhalten. Dieser Mindestabstand setzt sich zusammen aus der zweifachen *Side lobe zone* der Eurobalisen von jeweils 1,3 m sowie – vereinfacht – der Distanz, die ein Fahrzeug bei an dieser Stelle maximal zulässiger Geschwindigkeit innerhalb von 0,2 s zurücklegt. In Grenzfällen kann eine exakte Berechnung nach [152] vorgenommen werden. Liegt in diesem Bereich ein Geschwindigkeitswechsel, so ist die höhere der beiden Geschwindigkeiten maßgebend. Im Geschwindigkeitsbereich bis 160 km/h ist der Mindestabstand in allen Fällen (geringfügig) kleiner als 12 m, sodass dieser Wert als initiale Planungsvorgabe genutzt werden kann.

Gemäß Abschn. 4.1.1.4 Subset 040 [165] ist zwischen der letzten Balise einer BG und dem zugehörigen EOA bzw. LOA ein geschwindigkeitsabhängiger Mindestwert einzuhalten. Dieser ist vorzusehen, damit alle notwendigen Informationen zur Verlängerung der MA oder einer *Level Transition* aufgenommen und verarbeitet sind, bevor ein *Trip* aufgrund des Überfahrens eines EOA bzw. LOA ausgelöst wird. Aus diesem Grund ist zur Berechnung des Mindestabstands auch nicht die örtlich zulässige Geschwindigkeit heranzuziehen. Die hierfür maßgebende Geschwindigkeit berechnet sich als Maximum der vier Werte

- maximale Geschwindigkeit in der Betriebsart SR (*V_NVSTFF*);
- maximale Geschwindigkeit bei *Override* (*V_NVALLOWOVTRP*);
- Freigabegeschwindigkeit assoziiert mit dem Durchrutschweg (*V_RELEASEDP*);
- Freigabegeschwindigkeit assoziiert mit dem Gefahrpunkt (*V_RELEASEDP*).

Höhere Geschwindigkeiten vor dem EOA sind ohne vorheriges Vorliegen einer MA nicht möglich. Der Mindestabstand $d_{BG;EOA}$ wird nach Gleichung (4.1) auf der nächsten Seite berechnet.

$$\begin{aligned} d_{BG;EOA} &= 1{,}3\,\mathrm{m} + T_N \cdot v_{massgebend} \\ &= 1{,}3\,\mathrm{m} + 0{,}1\,\mathrm{s} \cdot v_{massgebend} \text{ (für } v_{massgebend} < 80\,\mathrm{km/h}) \end{aligned} \tag{4.1}$$

Für Geschwindigkeiten unterhalb von 80 km/h nimmt die Zeitvariable T_N einen konstanten Wert von 0,1 s an, sodass sich die Berechnung vereinfacht. In den meisten Anwendungen wird die maßgebende Geschwindigkeit $v_{massgebend}$ aufgrund der zu berücksichtigenden Geschwindigkeiten zwischen 5 km/h bis 40 km/h liegen, sodass sich aus der Gleichung (4.1) die in Tabelle 4.9 gezeigten Werte, aufgerundet auf eine Dezimalstelle, ergeben. Zu beachten ist, dass der berechnete Mindestabstand $d_{BG;EOA}$ für die letzte Balise einer BG eingehalten werden muss.

Tab. 4.9: Mindestabstand einer Balise vor einem EOA oder LOA.

$v_{massgebend}$ [km/h]	$d_{BG;EOA}$ [m]
5	1,5
10	1,6
15	1,8
20	1,9
25	2,0
30	2,2
35	2,3
40	2,5

Den Referenzpunkt einer BG stellt jedoch die erste Balise einer BG dar, sodass auf die berechneten Werte die longitudinale Ausdehnung der BG durch Addition aller Balisenabstände innerhalb der fraglichen BG aufzuschlagen ist.

Zusätzlich besteht eine direkte Wechselwirkung mit der Gleisfreimeldung und Signalhaltfallabschnitten in der Stellwerksprojektierung. Aus diesem Grund muss die letzte gesteuerte Balise einer Balisengruppe einen Mindestabstand von 13,8 m von Abschnittsgrenzen der Gleisfreimeldung einhalten, wenn die Überfahrt des Zuges über diese Grenzen den Inhalt der gesteuerten BG beeinflusst, siehe Abschn. 4.1.1.5 Subset 040 [165].

In allen Konstellationen dürfen innerhalb einer Zeit von 0,8 s nicht mehr als acht Balisen überquert werden, siehe Subset 040 [165]. Damit wird der OBU ausreichend Zeit eingeräumt, die Daten zu empfangen, zu verarbeiten, anzuzeigen und bei Bedarf eine Reaktion auszulösen.

Insgesamt ist im Hinblick auf eine effiziente Planung und Planprüfung der ETCS-Streckenausrüstung anzustreben, dass in einem Projekt, Ausrüstungsbereich oder (Teil-)Netz einheitliche Regelwerte angewendet werden, von denen nur in begründeten Ausnahmefällen abgewichen werden sollte.

4.3.4 Sicherung startender Züge

Eine Aufgabe der Zugbeeinflussung nach §İ5 Abs.(2) EBO [239] ist, dass „ein unzulässiges Anfahren gegen Halt zeigende Signale überwacht werden kann“. Bei der Ausrüstung mit PZB wird dies mit dem PZB-Startprogramm in Kombination mit der Ausrüstung mit Gleismagneten (GM) 500 Hz nach der Induktiven Sicherung anfahrender Züge (INA) gemäß Ril 819.1311 [207] erreicht. Sie sorgen dafür, dass ein startender Zug derart in seiner erreichbaren Geschwindigkeit eingeschränkt wird, dass bei einer unzulässigen Anfahrt gegen ein Halt zeigendes Signal der dort installierte und aktive GM 2000 Hz durch eine folgende Zwangsbremsung den Zug zum Halten bringen kann, bevor eine Gefährdung anderer Fahrten eintreten kann. Nicht jedes Signal bzw. jeder Halteplatz eines Reisezuges muss entsprechend abgesichert werden, es existieren zulässige Abstufungen in der notwendigen Ausrüstung. Diese können gleichlautend auch für die Ausrüstung mit ETCS übernommen werden.

Für weiterfahrende Züge wird die Sicherheit durch die überwachten Bremskurven sowie die RS in Abhängigkeit von OL und DP sichergestellt. Im Level 2 sowie bei Anwendung von Euroloop oder RIU ist es möglich, die Anfahrt eines Zuges (auch eines startenden Zuges) technisch vollständig zu unterbinden. ETCS in der Ausführung Level 1 FS ohne die Anwendung semikontinuierlicher Übertragungsmedien (Euroloop und RIU) kann ohne weitere Maßnahmen die gestellte Anforderung nicht mit mindestens der gleichen Sicherheit wie das Referenzsystem PZB 90 erfüllen. Daher müssen in der Planung und Projektierung zusätzliche Maßnahmen ergriffen werden, die Sicherheit in Bezug auf das Anfahren gegen ein Halt zeigendes Signal zu überwachen. Eine Anfahrverhinderung ist technisch bedingt durch die punktförmige Übertragung nicht möglich, daher muss die Geschwindigkeit der Züge so weit reduziert und technisch überwacht werden, dass eine Zwangsbremsung an der Signal-BG des Halt zeigenden Signals den Stillstand innerhalb der definierten Schutzstrecke dahinter sicherstellen kann.

Ausgangspunkt sind hier Fahrten, welche sich nicht in der Vollüberwachung von FS durch eine MA befinden, sondern sich in der Betriebsart SR befinden. Im Regelbetrieb tritt dies im Level 1 bei startenden bzw. wendenden Zügen auf, die noch keine MA besitzen können. Diese müssen sich bei der Zulassung zur Fahrt durch den Fdl in dieser Betriebsart an die erste Signal-BG annähern, an der sie die initiale MA mit folgendem Wechsel in FS erhalten können. Außerhalb des Regelbetriebs finden Fahrten in SR auch beispielsweise dann statt, wenn aufgrund eines technischen Fehlers, einer Fehlbedienung oder der vorherigen Überschreitung eines EOA ein Trip ausgelöst wurde oder eine Fahrtstellung des zurückliegenden Hauptsignals und damit eine FS-MA nicht möglich war. In beiden Fällen ist es möglich, ohne weitergehende Überwachung die in den NV als maximal zulässige Geschwindigkeit in der Betriebsart SR zu erreichen. Diese beträgt in vielen Fällen 40 km/h. Eine geringere Geschwindigkeit kann durch das EIU über die NV vorgegeben werden.

Um die Geschwindigkeit bis zum Erreichen der Signal-BG in SR zu begrenzen oder das Annähern vollständig zu unterbinden, bietet der ETCS-Werkzeugkasten drei mögliche Ansätze:

1. *Stop if in SR* (Paket 137),

2. TSR (Paket 65),
3. Anpassen des NV *V_NVSTFF* (Paket 3).

Eine reine Anzeige auf dem DMI beispielsweise mit einer quittierungspflichtigen Textmeldung, welche bei ausbleibender Quittierung einen Bremseingriff bis zum Stillstand nach sich zieht, wird aufgrund des möglichen Schadensausmaßes einer solchen unberechtigten Anfahrt gegen ein Halt zeigendes Signal als nicht ausreichend erachtet und daher nicht weiter betrachtet. In allen der drei oben aufgeführten Fällen werden zusätzliche BG unmittelbar hinter den gewöhnlichen Halteplätzen, für welche diese zusätzliche Sicherung notwendig ist, benötigt.

Als erste Möglichkeit, startende Züge in der Betriebsart SR an der unberechtigten Anfahrt gegen ein Halt zeigendes Signal zu hindern, kommt das Paket 137 (*Stop if in SR*) in Frage. Überfährt ein Fahrzeug in der Betriebsart SR eine BG, die dieses Paket in der Ausprägung „Stop“ überträgt, so erfolgt unmittelbar ein Trip mit Bremseingriff bis zum Stillstand. Ergänzt mit einer entsprechenden Textmeldung mit dem Paket 73 bietet diese Lösung auf den ersten Blick genau jene Funktionalität, die zur Erfüllung der Sicherheit erforderlich ist. Allerdings ist eine Ansteuerung der BG nur anhand des vorausliegenden Hauptsignals (Fahrtbegriff oder kein Fahrtbegriff) nicht ausreichend, da auch bei Halt zeigendem Signal eine Fahrt in der Betriebsart SR an einen näher am Signal liegenden Halteplatz oder bis unmittelbar vor das Signal zulässig sein kann und daher möglich sein muss. Eine Verbesserung des Systemverhaltens würde eine Ansteuerung der BG zusätzlich in Abhängigkeit des Durchrutschweges bringen. Solange ein Durchrutschweg vorhanden und gesichert ist, darf auch bei Halt zeigendem Signal kein Systemeingriff erfolgen. Lediglich im Fall einer streckenseitigen Störung, bei der die Fahrt ohne eine gesicherte Fahrstraße durchgeführt werden muss, würde mit dieser Projektierung an der BG des ersten abgesicherten Halteplatzes eine (unzeitige) Zwangsbremsung erfolgen.

Die zweite offensichtliche Lösung für die geforderte Funktion liegt in der Nutzung des Pakets 65 zur Definition von Langsamfahrstellen ab den BG an den Halteplätzen bis zum EOA bei einem Haltbegriff. Die TSR werden auch in der Betriebsart SR ausgewertet und überwacht, im Gegensatz zum SSP, das nur in den Betriebsarten FS und OS berücksichtigt wird. Mit dem Paket 65 kann im Bahnsteigbereich eine reduzierte Geschwindigkeit kommandiert werden. Der Wert der Variablen *V_TSR* ergibt sich wie in Gleichung (4.2) zu sehen als Minimum der projektierten RS am zu schützenden Signal.

$$V_TSR = min(V_RELEASEDP; V_RELEASEOL) \tag{4.2}$$

Der einfachste Fall, die TSR an jeder Halteplatz-BG unmittelbar zu beginnen lassen, ist betrieblich nachteilig, da zugelassene Zufahrten auf das EOA in der Betriebsart SR potenziell eine Zwangsbremsung an der ersten Halteplatz-BG erhalten, wenn sie zu diesem Zeitpunkt eine höhere Geschwindigkeit fahren. Zur Verhinderung dieser ungewollten Systemeingriffe kann der Beginn der TSR jeweils auf den Standort der Signal-BG am EOA projektiert werden („TSR allgemein“). Damit wird weiterhin das Ziel einer weiter beschränkten Geschwindigkeit beim unberechtigten Überfahren der Signal-BG erreicht. Je nach unterstellten Bremskurven

und Längenverhältnissen muss die TSR bereits vor der ersten Halteplatz-BG ankündigt werden, damit keine springenden Bremskurven mit der Folge eines Bremseingriffs auftreten. Zur Beschleunigung des Betriebsablaufs sollte die kommandierte TSR bei Fahrtstellung des Signals an allen Halteplatz-BG sowie an der Signal-BG mit dem Paket 66 widerrufen werden. Mit dieser Projektierung werden alle Fahrten – also auch solche in den Betriebsarten FS und OS – bei Zufahrt auf das Halt zeigende Signal auf eine geringere Geschwindigkeit geführt als es aufgrund des projektierten RS aufgrund des vorhandenen Durchrutschweges notwendig wäre, was zu einer verlangsamten Einfahrt, verlängerten Fahrzeiten und einem erhöhten Kapazitätsverbrauch führt.

Zur Optimierung der Grundkonzeption besteht die Möglichkeit, das Verhalten durch „Maskieren“ der entsprechenden BG zu verbessern, daher wird diese Lösung als „TSR maskiert“ benannt. Dies ist nur der Fall, wenn entsprechende Informationen vorliegen, also für die hier betrachteten Anwendungsfälle die Betriebsarten FS und OS. Jeglichen Fahrten in der Betriebsart SR liegen diese Informationen noch nicht (startende Züge) oder nicht mehr (da bspw. ein vorheriger Trip diese gelöscht hat) vor, sodass sie alle überfahrenen BG auswerten und dementsprechend auch die TSR beachten und technisch deren Einhaltung überwachen. Die Ansteuerung der BG erfolgt wie im allgemeinen Fall beschrieben. Ebenso kann eine zusätzliche BG zur Vorankündigung der TSR vor dem Bahnsteigbereich notwendig sein. Auch das Widerrufen der TSR mit dem Paket 66 bei Fahrtstellung des Signals kann hier zur Beschleunigung des Betriebsablaufs angewendet werden.

Die Möglichkeit, mit den Paketen 0 bzw. 6 ein *Virtual Balise Cover* zu setzen, um definierte BG unwirksam zu schalten, wird nicht genutzt, da diese in ihrer Konzeption für vorübergehende Änderungen z. B. im Rahmen von Tests oder Baumaßnahmen vorgesehen sind.

Als weitere technisch mögliche Lösung kann über eine gezielte Anpassung der NV die maximal zulässige Geschwindigkeit in der Betriebsart SR durch Anpassen der Variablen *V_NVSTFF* begrenzt werden. Die Idee dahinter ist, dadurch im kritischen Bereich vor dem Signal bei Haltstellung desselben alle Fahrten in SR auf eine geringere, sichere Geschwindigkeit zu begrenzen. Der Wert der Variablen *V_NVSTFF* ergibt sich wie in Gleichung (4.3) zu sehen als Minimum der projektierten RS am zu schützenden Signal.

$$V_NVSTFF_{reduziert} = min(V_RELEASEDP; V_RELEASEOL) \tag{4.3}$$

Die BG hinter den Halteplätzen übertragen bei Halt am zu schützenden Signal ein spezielles Paket 3 mit dem reduzierten Wert für *V_NVSTFF*. Das ist die maximale Geschwindigkeit, die startende Züge bei unberechtigter Anfahrt erreichen können, bevor an der Signal-BG eine Zwangsbremsung erfolgt. Die *NID_C* wird dabei nicht angepasst und entspricht dem regulären Wert des jeweiligen EIU. Als Vorankündigung ist auch hier eine vorgelagerte BG notwendig, um springende Überwachungskurven zu unterbinden. Diese wird maskiert und überträgt mit dem Paket 65 eine TSR mit $V_{TSR} = V_NVSTFF_{reduziert}$ an der ersten Halteplatz-BG. Bei Fahrtstellung übertragen die BG die regulären NV mit Paket 3 sowie die Aufhebung der TSR

mit Paket 66, um eine zügige Ausfahrt zu ermöglichen. Mit dieser Lösung wird gleichzeitig ein Beitrag dazu geleistet, dass alle auf der mit ETCS ausgerüsteten Infrastruktur die korrekten NV vorliegen haben.

Es gilt nun, die hier entwickelten technischen Lösungen anhand passender Bewertungskriterien zu bewerten und eine Vorzugsvariante herauszuarbeiten. Die qualitative Bewertung der Lösungsansätze wird anhand der folgenden sieben Kriterien durchgeführt.

1. **Auswirkungen auf FS/OS:** Welche betrieblich hinderlichen Auswirkungen treten in bestimmten Betriebsfällen auf Fahrten in den Betriebsarten FS oder OS auf?
2. **Auswirkungen auf SR:** Welche betrieblich hinderlichen Restriktionen treten in bestimmten Betriebsfällen für Fahrten in der Betriebsart SR zusätzlich auf?
3. **Verhalten von FS ggü. SR:** Ergibt sich ein signifikant anderes Verhalten abhängig davon, ob eine einfahrende Fahrt in der Betriebsart FS oder in der Betriebsart SR verkehrt?
4. **Art der benötigten BG:** Werden zur Erfüllung der Anforderungen gesteuerte oder ungesteuerte BG benötigt?
5. **Nutzbarkeit der BG für andere Funktionen:** Können ggf. notwendige zusätzliche BG auch noch für andere Funktionen genutzt werden?
6. **Datenmenge & Projektierungsaufwand:** Wie groß sind die erwartete Datenmenge und der Projektierungsaufwand der Lösung?

Die Tabelle 4.10 zeigt die Bewertung der drei vorgestellten Lösungsmöglichkeiten in der Übersicht.

Tab. 4.10: Bewertungsübersicht möglicher Lösungen zur Sicherung anfahrender Züge.

Technische Lösung	Stop if in SR	TSR allgemein	TSR maskiert	NV
Auswirkungen auf OS/FS	keine	längere Fahrzeiten	keine	keine
Auswirkungen auf SR	ggf. Behinderung zulässiger Fahrten	längere Fahrzeiten	längere Fahrzeiten	längere Fahrzeiten
Verhalten FS ggü. SR	abweichend	gleich	gleich	gleich
Art der BG	gesteuert	gesteuert	gesteuert	gesteuert
Nutzbarkeit der BG für andere Funktionen	ja	ja	nein	eingeschränkt
Datenmenge & Projektierungsaufwand	gering	mittel	mittel	hoch

Alle vier entwickelten Lösungen können das Ziel erfüllen, unberechtigt gegen ein Halt zeigendes Signal anfahrende Bewegungen innerhalb eines beherrschbaren Geschwindigkeitsbereichs zu halten. In der zusammenfassenden Übersicht der Bewertungskriterien zeigt sich jedoch, dass die Lösung „Stop if in SR“ aufgrund der potenziellen Behinderung zulässiger Fahrten in der Betriebsart SR sowie des abweichenden nutzerseitigen Systemverhaltens in den

Betriebsarten FS und SR nicht zielführend ist. Eine „allgemeine TSR“ würde auch zugelassene Fahrten in den Betriebsarten OS und FS beeinträchtigen und zu längeren Fahrzeiten und einem höheren Kapazitätsverbrauch führen. Daher wird auch diese Lösung ausgeschlossen, da weitere Lösungen mit derselben Zielerreichung aber weniger betrieblichen Einschränkungen entwickelt wurden. Die verbleibenden beiden Lösungen sind in der qualitativen Bewertung sehr ähnlich zueinander. Die einzigen Unterschiede zeigen sich in der Nutzbarkeit der zusätzlich notwendigen BG sowie der Datenmenge und dem Projektierungsaufwand. Während die maskierte TSR mit einem mittleren Projektierungsaufwand bewertet wird, können ihre BG nicht für andere Funktionen genutzt werden. Bei Anpassung der NV hingegen bleiben die BG nutzbar für weitere Funktionen, mit dem Nachteil einer größeren Datenmenge. Vorteilhaft ist hier, dass die Baliseninhalte der Halteplatz-BG nicht ortsspezifisch projektiert werden müssen, wie es bei der TSR der Fall ist. Aus diesen Gründen wird Anpassung der NV als Vorzugsvariante eingestuft und weiterverfolgt. Eine in Teilen technisch vergleichbare Lösung wird im Level 2 bei der DB im Startverfahren „SR Authorisation + Balisenliste“ [20] angewendet. Dort wird durch Anpassung der NV die Geschwindigkeit in der Betriebsart SR von den regulären 40 km/h auf 20 km/h reduziert. Dieses Startverfahren ist mit dem hier vorliegenden Fall vergleichbar, da eine startende Fahrt in der Betriebsart SR beginnt. Im Level 2 kann dies eine Ausnahme sein, im Level 1 ist das jedoch, wie oben beschrieben, technisch begründet der Regelfall.

Für die Vorzugsvariante wird nun die konkrete Ausgestaltung der streckenseitigen Infrastruktur und der ETCS-Projektierung erarbeitet. Halteplätze, für die eine zusätzliche technische Sicherung startender Fahrten notwendig ist, müssen mit einer entsprechenden gesteuerten BG ausgerüstet werden. Diese BG dürfen nach Abschn. 4.1.1.3 Subset 040 [165] maximal 0,7 m vor dem betrieblichen Halteplatz (gekennzeichnet durch das Signal Ne 5) verlegt werden. Zur Vereinfachung der Planung und Projektierung sollte der Referenzort dieser BG mit dem Standort des Signals Ne 5 zusammenfallen. Damit verbleibt die BG auch bei einer ggf. notwendigen Verschiebung um maximal ein Schwellenfach beim üblichen Schwellenabstand von 60 cm in eine beliebige Richtung innerhalb der Spezifikation. Zusätzlich wird als Vorankündigung mit NV und TSR eine maskierte BG vor dem Bahnsteigbereich installiert, auch diese muss gesteuert sein. Der Abstand dieser BG zur ersten Halteplatz-BG muss dabei so bemessen sein, dass den Tf von in der Betriebsart SR verkehrenden Fahrten ein normales Abbremsen auf die niedrigere Geschwindigkeit ermöglicht wird. An der Signal-BG werden bei Haltbegriff mit dem Paket 132 sämtliche Fahrten in SR an der Vorbeifahrt unterbunden. Dies entspricht der regulären Projektierung, sodass sich hier keine Änderungen ergeben. Bei einem Fahrtbegriff muss ein Paket 3 mit den regulären NV übertragen werden. Alternativ kann dies auch an späterer Stelle und auch bspw. mit einer ungesteuerten Balise erfolgen. Abbildung 4.1 auf der nächsten Seite zeigt schematisch die Infrastrukturausrüstung der Vorzugsvariante.

Insgesamt betrachtet kann mit der entwickelten Vorzugslösung das Ziel erreicht werden, eine angemessene Sicherung startender Fahrten zu gewährleisten. Dies wird durch die Reduktion der maximal erreichbaren Geschwindigkeit vor einem Zwangsbremseingriff am zu schützenden Hauptsignal bzw. ETCS-Halt umgesetzt. Damit kann bei entsprechender Wahl des Wertes *V_NVSTFF* mindestens das gleiche Sicherheitsniveau erreicht werden wie im Bestandssystem

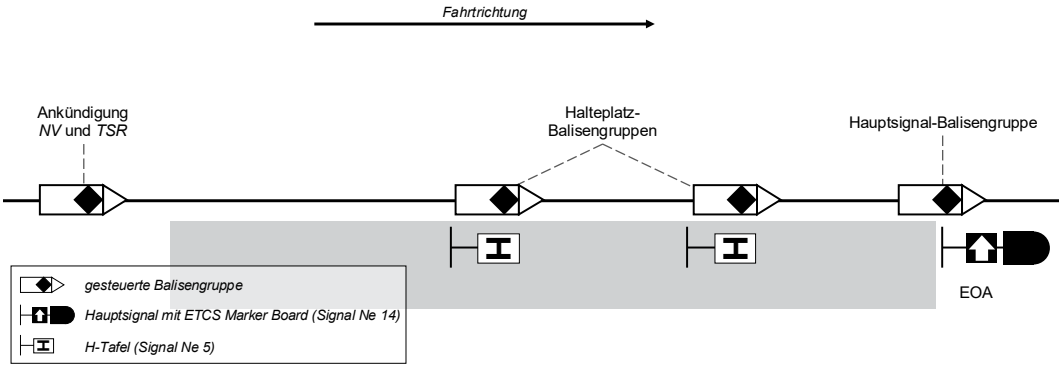


Abb. 4.1: Schematische Darstellung einer Infrastrukturausrüstung zur Sicherung startender Züge. Eigene Darstellung.

PZB 90. Eine vollständige Anfahrverhinderung ist bei ausschließlicher Nutzung von Balisen im Level 1 nicht möglich, zur Erfüllung der mindestens gleichen Sicherheit jedoch auch nicht erforderlich.

Eine ergänzende Textmeldung mit dem Paket 73 wird nicht vorgesehen, damit berechtigterweise (ein-)fahrende Fahrzeuge in SR keine unpassende Anzeige erhalten.

Die Ausführung der Halteplatz-BG mit jeweils zwei Balisen (damit eine richtungsbezogene Projektierung der Inhalte möglich ist) bedingt, dass bei wendenden Zügen Balisenlesefehler aufgrund der Konsistenzprüfung auftreten können. Dies ist genau dann der Fall, wenn das neu aktivierte BTM am vormals hinteren Ende zwischen den Balisen einer BG steht und bei Anfahrt lediglich eine der beiden Balisen erfassen kann. Technisch ist ein Unterdrücken von Fahrzeugreaktionen aufgrund von Konsistenzfehlern auf Ebene der BG mit dem Paket 145 möglich. Für Halteplatz-BG sollte diese Möglichkeit jedoch aus Sicherheitsgründen nicht angewendet werden, da so auch das Erkennen einer fehlenden oder defekten Balise innerhalb der BG durch das Fahrzeug nicht möglich ist und eine eigentlich notwendige Reaktion ausbleiben könnte. Durch eine geschickte Positionierung der Halteplätze und Balisengruppen kann man die Auftretenswahrscheinlichkeit für Konsistenzfehler bei wendenden Zügen reduzieren. Ein vollständiges Verhindern dieser ist nicht möglich.

Grundsätzlich können die Halteplatz-BG auch zusätzlich für die Gegenrichtung genutzt werden, beispielsweise ebenfalls mit der Funktion „Halteplatz-BG“ oder auch als Infill oder zur vorbereitenden Übertragung von Streckendaten. Die Anwendbarkeit dieser Lösungen ist ausschließlich durch die Balisenkapazität und die Fähigkeiten der Balisenansteuerung (LEU oder Stellwerk) begrenzt. In vielen Fällen ist derzeit die Nutzung gesteuerter BG mit wechselnden Inhalten in beiden Richtungen noch nicht möglich, da in den aktuell eingesetzten Stellwerkslogiken Signale und ähnliche Elemente wie BG nur einer Richtung zugeordnet werden können.

4.4 Optimierung der Infill-Balisengruppen

Dieser Abschnitt 4.4 basiert methodisch auf einem bereits veröffentlichten Artikel [136] des Autors. In diesem werden das Vorgehen und alle Details des entwickelten Optimierungsverfahrens zur Platzierung von Infill-BG und der Implementierung in Python beschrieben. An dieser Stelle werden die wesentlichen Erkenntnisse ergebnis- und anwendungsorientiert zusammengefasst und mit für die Fragestellung dieser Arbeit passenden Beispielen unterlegt.

4.4.1 Ausgangslage

In der Betriebsart FS benötigt jeder Zug eine MA, welche rechtzeitig vor dem Ende durch Infill verlängert werden muss, um eine ungehinderte Fahrt zu ermöglichen. Infill wird im Level 1 durch die fest installierte Infill-BG an diskreten Orten übertragen. Daher müssen Anzahl und Orte der Infill-BG möglichst optimal platziert werden, um einen flüssigen Betrieb bei wirtschaftlicher Infrastrukturausrüstung zu erreichen. Nicht optimal platzierte Infill-BG können deutliche, negative Auswirkungen auf den Betrieb nach sich ziehen, da sich die Zugfolgezeiten im gestörten Betrieb erhöhen und Staueffekte entstehen oder verstärkt werden.

Aufgrund der Literaturrecherche (siehe Abschnitt 3.3 auf Seite 38) ist ersichtlich, dass ein vollständiger Algorithmus zur Bestimmung der optimalen Platzierung von Infill-BG öffentlich nicht verfügbar ist. Daher wird ein neuer Algorithmus entwickelt, mit dem bei einfachen Verhältnissen die optimalen Positionen der Infill-BG bestimmt werden können. Dieser basiert in Teilen auf den theoretischen Ansätzen von Shanker [117] sowie Nikolov und Ganchev [94].

Anforderung war, die Eigenschaften von Infrastruktur und Zügen realitätsnah modellieren zu können, jedoch gleichzeitig die Komplexität möglichst gering zu halten und eine gute Anwendbarkeit zu gewährleisten.

4.4.2 Algorithmus

Als Key Performance Indicator (KPI) und Optimierungsziel wird der gewichtete Fahrzeitverlust $t_{run,add,weighted}$ eines Zuges genutzt. Diesen gilt es zu minimieren, was bedeutet, dass der erlittene Fahrzeitverlust durch eine verspätete Aufwertung möglichst gering sein soll. Zur Berechnung des Fahrzeitverlusts $t_{run,add}$ wird die Differenz der Fahrzeiten zweier Szenarien verglichen:

- Der Zug kann ungehindert ohne Bremseingriff mit der maximal zulässigen Geschwindigkeit passieren;
- der Zug muss einen Bremsvorgang einleiten, da noch keine neue MA verfügbar ist und kann erst nach deren Erhalt an einer späteren Infill-BG beschleunigen.

Der erste Fall führt zur kürzestmöglichen Fahrzeit $t_{run,unhindered}$ im Betrachtungsraum, der zweite Fall resultiert in einer verlängerten Fahrzeit $t_{run,hindered}$. Den formelmäßigen Zusammenhang dieser drei Größen zeigt Gleichung (4.4).

$$t_{run,add} = t_{run,hindered} - t_{run,unhindered}. \tag{4.4}$$

Durch diese Betrachtung können auch die Auswirkungen auf die Zugfolgezeit zwischen zwei Zügen angenähert und damit auch qualitativ die Auswirkungen auf die Nennleistung einer Strecke beschrieben werden. Dafür müssen nicht nur die Infrastruktureigenschaften, sondern auch die Fahrdynamik der betrachteten Züge berücksichtigt werden, was durch eine angemessene Modellierung des Brems- und Beschleunigungsverhaltens der Züge erreicht wird. Damit können grundsätzlich belastbare Ergebnisse erzielt werden.

Der Algorithmus ermittelt je Durchlauf die Positionen der Infill-BG für genau einen spezifischen Zug. Dabei werden Fälle, in denen der Zug vor einem Halt zeigenden Signal vollständig zum Stillstand kommt, nicht betrachtet. Schematisch ist der entwickelte Algorithmus im Flussdiagramm in Abbildung 4.2 dargestellt. Die Details der Berechnung werden im Folgenden erläutert.

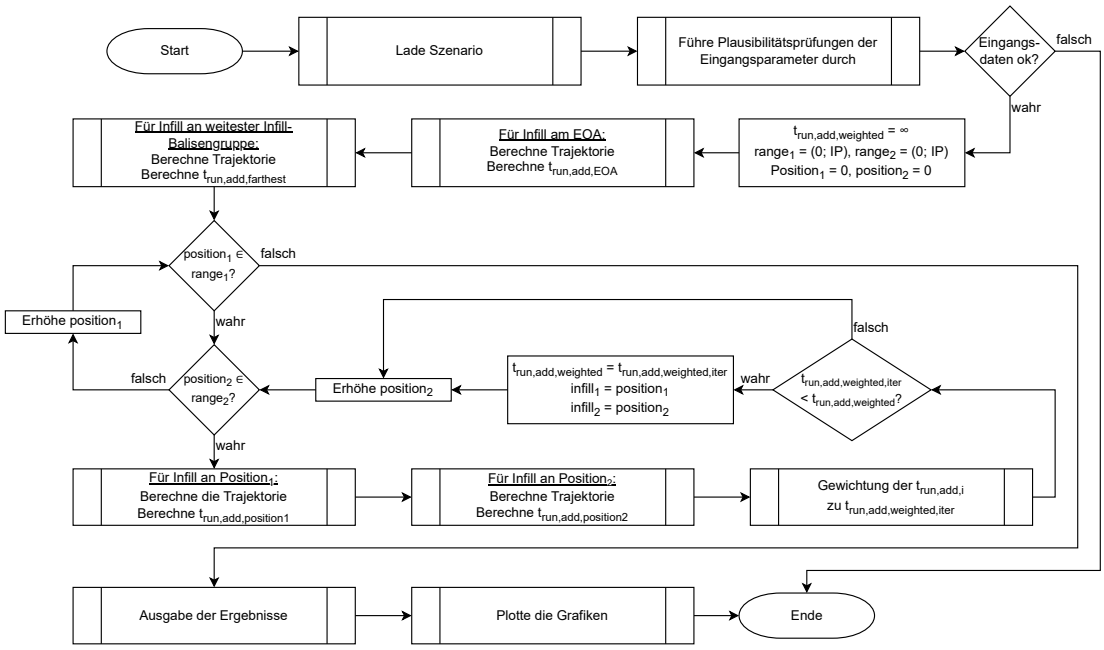


Abb. 4.2: Flussdiagramm des Algorithmus zur Bestimmung der optimalen Positionen der Infill-BG. Eigene Darstellung.

Die Infrastrukturgeschwindigkeit sowie die Streckenneigung werden über den gesamten betrachteten Abschnitt als konstant angenommen. Ein Beispiel einer modellierten Infrastruktur ist in Abbildung 4.3 auf der nächsten Seite dargestellt.

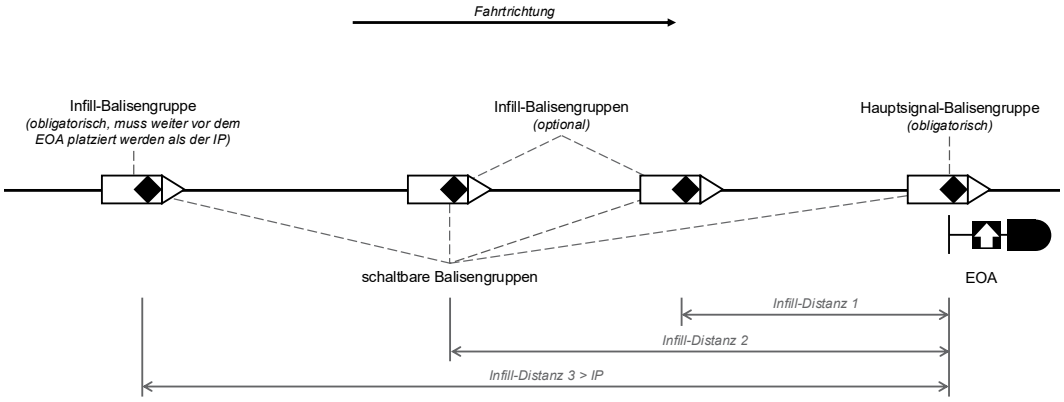


Abb. 4.3: Schematische Darstellung der modellierten Infrastruktur. Eigene Darstellung.

In einem minimalen Szenario besteht die Infrastruktur aus einer Signal-BG am EOA sowie eine zusätzlichen Infill-BG davor. Damit eine ungehinderte Fahrt des Zuges bei freiem Folgeabschnitt möglich ist, muss die weiteste Infill-BG vor dem IP des modellierten Zuges platziert sein. Bis zu zwei weitere Infill-BG können zwischen dem EOA und der weitesten Infill-BG vorgesehen werden. Damit können also derzeit Szenarien mit bis zu drei Infill-BG ergänzend zur Signal-BG am EOA berechnet werden. Als Ergebnis der Literaturrecherche sowie im Vergleich zu bisherigen Ausrüstungen mit Level 1 stellt diese jedoch keine relevante Einschränkung dar, da im Regelfall mehr als drei Infill-BG im hier betrachteten Anwendungsfall nicht benötigt werden. Die vorgestellte Berechnungslogik ist dennoch ohne fundamentale Änderungen auch für eine größere Anzahl an Infill-BG nutzbar.

Es wird ein ETCS-System angenommen, bei dem die Positionen der Infill-BG keinen systembedingten Restriktionen (z. B. aufgrund vorhandener Außensignalisierung oder großer Metallmassen) unterworfen sind. Diese Restriktionen können berücksichtigt werden, indem beispielsweise die optimal platzierten BG, welche an ungünstigen Stellen liegen müssten, manuell in einen zulässigen Bereich platziert und die Auswirkungen quantifiziert werden. Der Zeitpunkt der Erteilung einer neuen MA wird modellhaft durch ein bestimmtes Zeitverhalten beschrieben, welches durch eine passende Gewichtungsmethode (siehe Seite 74) berücksichtigt wird.

Bevor eine Berechnung angestoßen werden kann, werden Plausibilitätsüberprüfungen durchgeführt. Nur bei Erfolg wird mit der eigentlichen Optimierung der BG-Standorte fortgefahren. Dabei wird für jede mögliche Trajektorie (Zeit-Weg-Linie) eines Zuges der zugehörige Fahrzeitverlust berechnet. Die Anzahl der möglichen Trajektorien ergibt sich aus der Anzahl der Infill-BG und die konkrete Trajektorie korrespondiert mit der Position oder der Kombination von Positionen der Infill-BG. Die Trajektorien werden unter Berücksichtigung der harmonisierten ETCS-Bremskurven berechnet. Im Regelfall ist dies die *Indication Curve*. Der Algorithmus optimiert ausdrücklich nicht die Bremskurven selbst, sondern nutzt diese als Input. Entsprechend dem Konzept ist die Optimierung abgeschlossen, wenn die optimalen Standorte gefunden wurden. Dies ist genau dann der Fall, wenn das globale Minimum des gewichteten Fahrzeitverlusts ermittelt ist.

Die einzelnen Trajektorien können fahrdynamisch in die drei Zustände Beharrungsfahrt, Bremsen und Beschleunigen segmentiert werden. Modellhaft wird dabei auch der Wechsel zwischen dem Bremsen und dem Beschleunigen als Beharrungsfahrt angenommen. Physikalisch korrekt wäre eine Abbildung als Rollen bzw. Bremsen oder Beschleunigen mit veränderlichen Beschleunigungswerten. Im Sinne eines einfachen Modells und aufgrund der großen beteiligten Massen im Vergleich zu den wirkenden Kräften und der kurzen relevanten Zeitdauer wird diese Vereinfachung vorgenommen und der eingebrachte Fehler vernachlässigt.

Typischerweise sieht die Trajektorie eines Zuges, welcher einen Bremsvorgang einleiten muss und erst an einer späteren BG die Infill-Informationen mit der weiteren MA erhält, folgendermaßen aus:

- Annähern an den IP mit der maximal zulässigen Geschwindigkeit (Beharrungsfahrt);
- Bremsen entlang der unterstellten Bremskurve, beginnend am IP bis zum Überqueren der Infill-BG, die eine neue MA bereitstellt (Bremsen);
- Verarbeiten der empfangenen Informationen (Bremsen oder Beharrungsfahrt);
- Lösen der Bremsen und Aufschalten der Traktionsleistung (Beharrungsfahrt);
- Beschleunigen bis zur maximal zulässigen Geschwindigkeit (Beschleunigen);
- Verlassen des Betrachtungsraums mit der maximal zulässigen Geschwindigkeit (Beharrungsfahrt).

Mit diesen Voraussetzungen reduzieren sich die zu modellierenden Fahrzustände auf das Fahren mit konstanter Geschwindigkeit sowie das Erhöhen bzw. Erniedrigen der Geschwindigkeit mit abschnittsweise konstanter Beschleunigung.

4.4.3 Eingangsparameter

Tabelle 4.11 zeigt die notwendigen Eingangsparameter für eine Berechnung auf.

Tab. 4.11: Notwendige Eingangsparameter des Algorithmus zur Optimierung.

Kategorie	Parameter	Einheit
Infrastruktur	Streckengeschwindigkeit	km/h
	Release Speed	km/h
	Neigung	‰
	Anzahl BG	–
	Abstand der BG	m
	Positionen der BG	m
Fahrzeug	Höchstgeschwindigkeit	km/h
	Anfahrbeschleunigung	m/s^2
	Bremsbeschleunigung	m/s^2
	Anteil rotierender Massen	%
	Indication Point	m
	Mindestbeharrungsfahrzeit	s
	Verarbeitungszeit	s

Mit diesen Parametern können die relevanten Eigenschaften des Systems, sowohl infrastruktur- als auch fahrzeugseitig modelliert werden. Gleichzeitig erlauben sie eine ausreichend große Flexibilität in den abbildbaren Szenarien. Auch die NV stellen einen wesentlichen Einflussfaktor auf die Bremskurven dar. Diese müssen in geeigneter Form in den Bremskurven und damit den einzugebenden Bremsbeschleunigungen berücksichtigt sein.

Die streckenseitige Infrastruktur muss mit der örtlich zulässigen Geschwindigkeit sowie der Neigung eingegeben werden. Beide Parameter werden über den gesamten Betrachtungsraum als konstant angenommen. Aus der Nichtnutzung von semi-kontinuierlichem Infill mit Euroloop oder RIU ergibt sich, dass stets eine RS größer als 0 km/h projektiert sein muss. Die typischen Werte hierfür liegen im Bereich von 5 km/h bis 40 km/h. Die Anzahl der Infill-BG zusätzlich zur Balisengruppe am EOA kann mit zwei oder drei angegeben werden. Weniger Infill-BG bedeuten, dass eine Optimierung nicht möglich ist, da die eine verbleibende dann rein in Abhängigkeit des längsten IP positioniert werden muss, während mehr Infill-BG bisher nur in sehr wenigen Fällen eine Anwendung gefunden haben und sich ein sehr schnell abnehmender Grenznutzen einstellt, wie auch durchgeführte Berechnungen (siehe auch Abschnitt 4.4.6 auf Seite 78) zeigen. Die Vorgabe eines globalen Werts für den Mindestabstand zwischen den einzelnen Balisengruppen (zur Abbildung der Regeln aus Abschnitt 4.3.3 auf Seite 61) ist möglich. Zudem können die Positionen für einzelne Infill-BG fest vorgegeben werden, um Restriktionen abzubilden oder bestehende Ausrüstungen bewerten zu können.

Fahrzeugseitig ist die Modellierung der ETCS-Bremskurven, der individuellen Fahrdynamik sowie von Systemlatenzen notwendig. Die Bremskurven werden im Regelfall mit dem offiziellen Werkzeug der ERA [32] berechnet und nach einer geringen Vorverarbeitung als Stufenfunktion vorgegeben. Dadurch ist es möglich, sowohl Lambda- als auch Gamma-Züge [159] (siehe auch Abschnitt 3.1.4 auf Seite 32) zu modellieren. Als Referenz für die Optimierung wird – wenn nicht anders angegeben – die *Indication Curve* herangezogen. Andere Kurven können je nach Fragestellung (z. B. für ATO) genutzt werden. Die Fahrdynamik bezieht sich auf das Beschleunigungsverhalten, welches der modellierte Zug erreichen kann. Dies kann mit Kenntnis der Zugeigenschaften mit einem praktisch beliebigen, validierten Fahrzeitrechner erfolgen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde der anerkannte Fahrzeitrechner der Software Leistungs-Untersuchungen für Knoten und Strecken (LUKS) [280] genutzt. Systemlatenzen können unter Nutzung der maximalen Werte aus den „Performance Requirements“ [166] angenommen werden.

Die Fahrzeitverluste der einzelnen Trajektorien werden miteinander unter Nutzung definierter Gewichte verrechnet, um den gewichteten Fahrzeitverlust $t_{run,add,weighted}$ als KPI zu erhalten. Der Fahrzeitverlust einer jeden Trajektorie (vgl. Abbildung 4.4 auf der nächsten Seite) berechnet sich aus der Fahrzeitdifferenz im Vergleich zur grünen Trajektorie zwischen dem Beginn Betrachtungsraumes ganz links und dem Punkt, an dem alle Trajektorien wieder die Ausgangsgeschwindigkeit erreicht haben. Dieser ist durch eine gestrichelte, senkrechte Linie am rechten Rand gekennzeichnet.

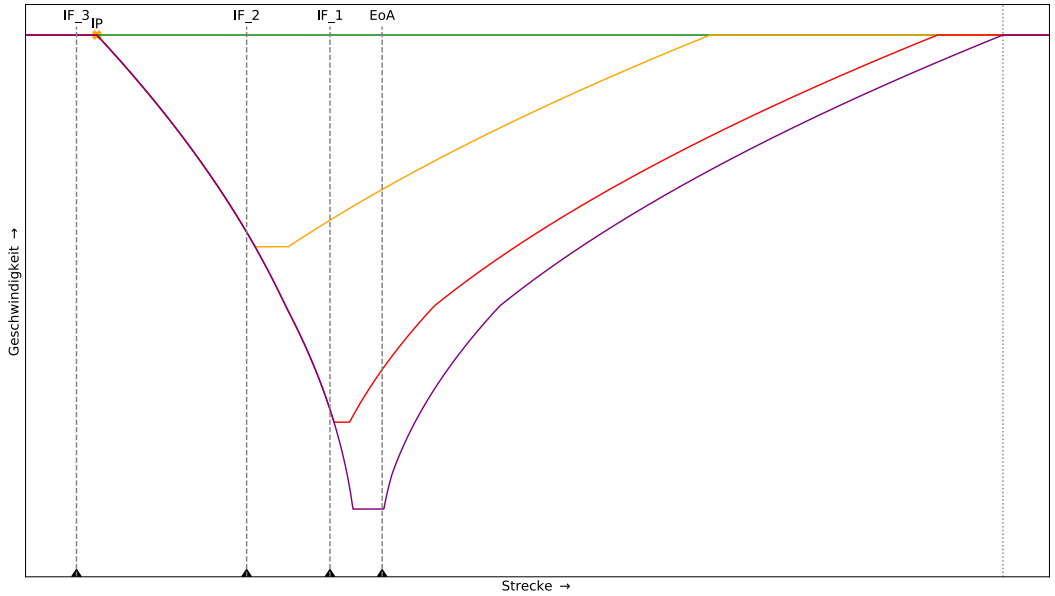


Abb. 4.4: Qualitatives Beispiel der Trajektorien eines Zuges in Abhängigkeit der Infill-BG, an der die Infill-Informationen übertragen werden. Die Fahrtrichtung ist von links nach rechts. Die Farben kennzeichnen den Empfang der Infill-Informationen an der BG IF_3 (grün), IF_2 (gelb), IF_1 (rot) oder am EOA (violett). Eigene Darstellung.

Der Annäherungsbereich zwischen der weitesten Infill-BG IF_3 und dem EOA wird durch die Infill-BG in drei Segmente unterteilt. Anhand dieser werden die Gewichte g_i berechnet. Aus den einzelnen Fahrzeitverlusten $t_{run,add,i}$ und den Gewichten g_i wird der gewichtete Fahrzeitverlust als gewichtetes arithmetisches Mittel berechnet, wie Gleichung (4.5) zeigt.

$$t_{run,add,weighted} = \frac{\sum_{i=1}^{n} g_i \cdot t_{run,add,i}}{\sum_{i=1}^{n} g_i}. \tag{4.5}$$

Die Gewichte g_i werden unter Berücksichtigung der gewählten Gewichtungsmethode bestimmt. In der Analyse zeigte sich, dass ausschließlich eine davon (die Methode „Time“) geeignet ist, belastbare Ergebnisse zu erzeugen. Bei dieser wird die Fahrzeit der langsamsten Trajektorie (violett in Abbildung 4.4) genutzt, um die Fahrzeit in den einzelnen Segmenten als zugehöriges Gewicht zu nutzen. Dies modelliert ein Systemverhalten, bei dem die Zeit, ab der eine Fahrt in den folgenden Abschnitt zugelassen wird und damit die Infill-Informationen zur Verfügung stehen, unbekannt und zufällig ist.

4.4.4 Implementierung

Der Algorithmus wurde mit Python in der Version 3.13 [279] implementiert. Der Quellcode der zur Erstellung der unten gezeigten Berechnungen genutzten Version ist öffentlich verfügbar [135].

Tabelle 4.12 führt alle Variablen der Eingangsparameter auf. Gegenüber Tabelle 4.11 auf Seite 73 sind zusätzliche technische Parameter aufgeführt sowie der Datentyp ersichtlich. Die Eingangsparameter werden strukturiert in einer JavaScript Object Notation (JSON)-Datei gespeichert und daraus geladen. Eine Beispieldatei ist in Code D.1 auf Seite 179 im Anhang enthalten. Diese Datei wurde auch genutzt, um Abbildungen 4.5 und 4.6 auf der nächsten Seite und auf Seite 78 zu erstellen.

Tab. 4.12: Eingangsparameter des Algorithmus in seiner Python-Implementierung.

Kategorie	Parameter	Einheit	Datentyp
Infrastruktur	Höchstgeschwindigkeit	km/h	Integer
	RS	km/h	Integer
	Neigung	‰	Integer bzw. Float
	Anzahl BG	–	Integer
	Abstand der BG	m	Integer
	Positionen der BG	m	Liste von Integern
Fahrzeug	Höchstgeschwindigkeit	km/h	Integer
	Anfahrbeschleunigung	m/s^2	Objekt aus zwei Integer- bzw. Float-Arrays
	Bremsbeschleunigung	m/s^2	Objekt aus zwei Integer- bzw. Float-Arrays
	Anteil rotierender Massen	%	Integer bzw. Float
	IP	m	Integer
	Mindestbeharrungsfahrzeit	s	Integer bzw. Float
	Verarbeitungszeit	s	Integer bzw. Float
Technik	Schrittweite	m	Integer
	Gewichtungsmethode	–	String $\in$ {„TIME“; „DISTANCE“; „EQUAL“}
	Trajektorien plotten	–	Boolean
	3D-Kontur plotten	–	Boolean
	3D-Kontur rotieren	–	Boolean
	Lokalisierung	–	String $\in$ {„en“; „de“}

4.4.5 Ausgabe

Zentrale Ausgabe des Programms sind die optimierten Standorte der Infill-BG und der zugehörige gewichtete Fahrzeitverlust. Insgesamt können vier Ausgabedateien erzeugt werden:

- Eingangsparameter und Ergebnisse als JSON-Datei,
- zweidimensionales Diagramm der Trajektorien,
- dreidimensionale Darstellung des gewichteten Fahrzeitverlusts über alle möglichen Positionen der Infill-BG,
- 360 Einzelbilder des dreidimensionalen Graphen zur Erstellung einer Animation.

Die JSON-Datei entspricht jener der Eingangsparameter, jedoch am Ende um die errechneten optimierten Positionen sowie dem gewichteten Fahrzeitverlust wie in Tabelle 4.13 auf der nächsten Seite dargestellt ergänzt.

Die Abbildung 4.5 auf der nächsten Seite zeigt eine der möglichen grafischen Ausgaben. Darin enthalten sind die berechneten idealtypischen Trajektorien der Züge sowie die zugehö-

Tab. 4.13: Ausgabeparameter des Algorithmus als Ergebnis der Optimierung.

Parameter	Einheit	Datentyp
Positionen der Infill-BG	m	Liste von Integern
Gewichteter Fahrzeitverlust	s	Float

rigen optimalen Positionen der Infill-BG. Sie werden ergänzt um die Eingangsparameter und Ergebnisse in Textform.

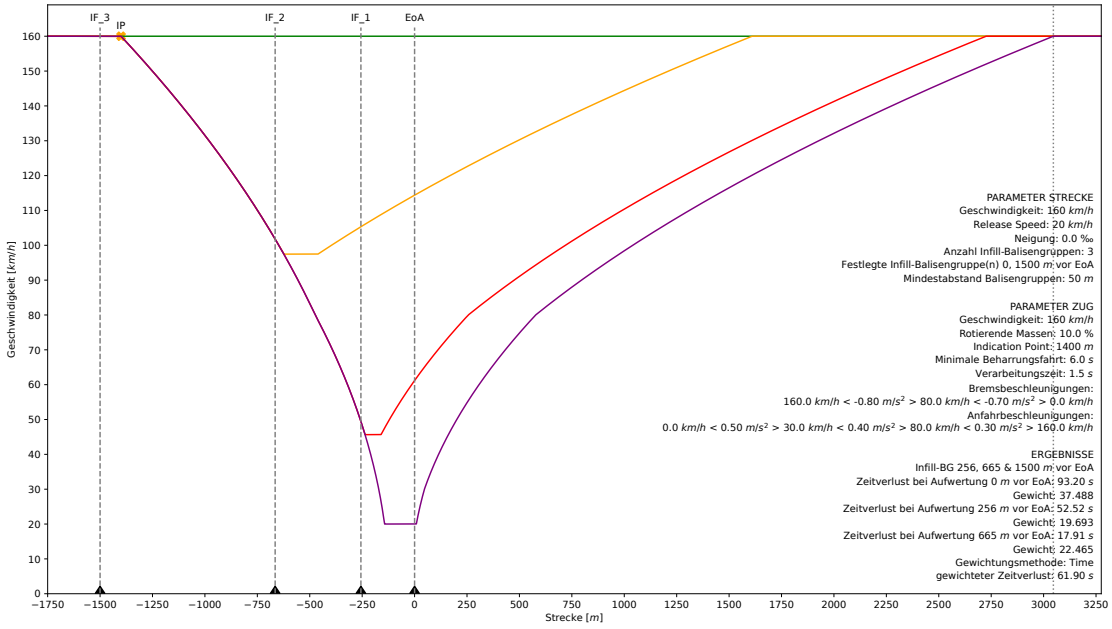


Abb. 4.5: Beispiel des zweidimensionalen Plots der Trajektorien. Die Fahrtrichtung ist von links nach rechts. Die Farben kennzeichnen den Empfang der Infill-Informationen an der BG IF_3 (grün), IF_2 (gelb), IF_1 (rot) oder am EOA (violett). Eigene Darstellung.

Bei den Verschiebungen der Infill-BG von ihren optimalen Positionen stellt sich die Frage, welche Auswirkungen dies auf den gewichteten Fahrzeitverlust besitzt. Diese Verschiebungen können sich bspw. durch Weichen, große Metallmassen und andere Zwangspunkte ergeben. Zur Beantwortung einer solchen Fragestellung kann der gewichtete Fahrzeitverlust für alle möglichen Positionen bzw. Kombination von Positionen der Infill-BG berechnet und daraus die Zunahme des gewichteten Fahrzeitverlusts durch die Verschiebung abgelesen werden. Grafisch stellt Abbildung 4.6 auf der nächsten Seite dies dar.

Dieser dreidimensionale Graph trägt den gewichteten Fahrzeitverlust auf der vertikalen Achse auf.[2] Auf den beiden horizontalen Achsen werden die Postionen der zu optimierenden Infill-BG abgetragen. Die dritte Infill-BG liegt wie zuvor 1500 m vor dem EOA. Aus der Form der Kontur ist erkennbar, dass sich ein eindeutiges globales Minimum des gewichteten Fahrzeitverlusts ergibt. Zusätzlich ist die Steigung in allen Richtungen um dieses Optimum – also

[2] Aus Gründen der Lesbarkeit beginnt diese Achse nicht bei 0 s.

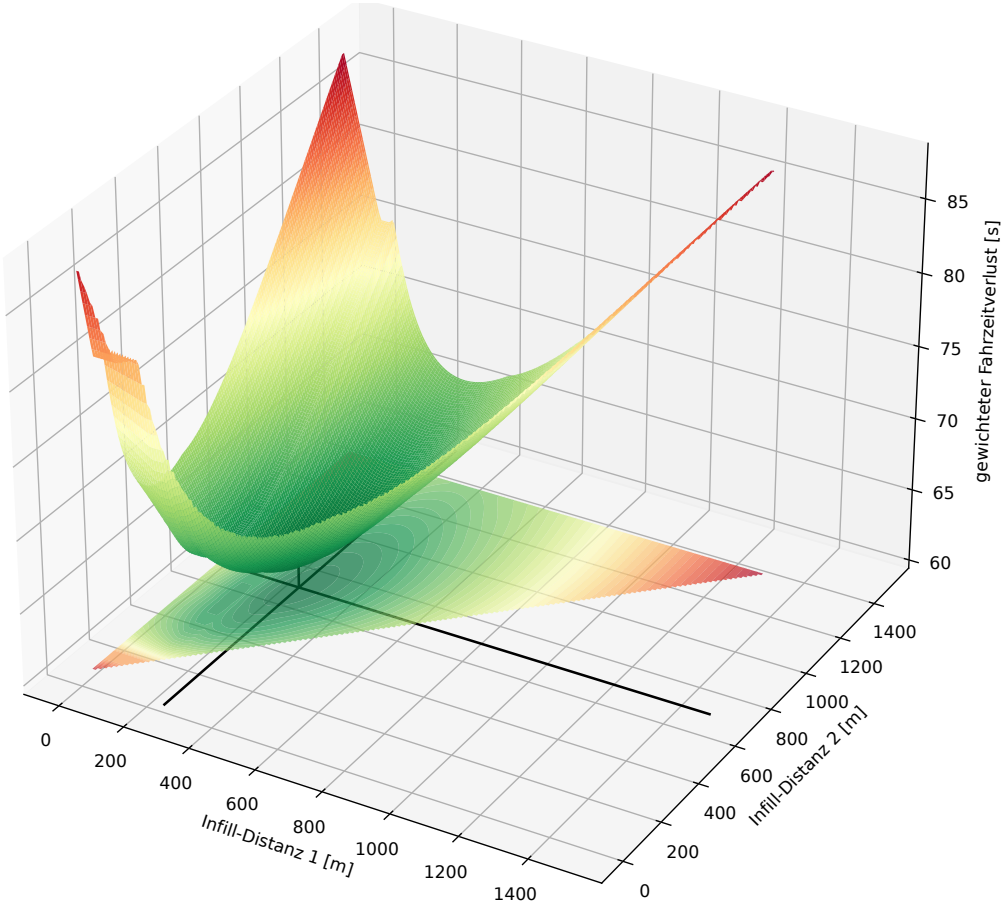


Abb. 4.6: Beispiel des dreidimensionalen Plots, der den gewichteten Fahrzeitverlust über alle möglichen Positionen der Infill-BG zeigt. Der Farbverlauf zeigt geringe gewichtete Fahrzeitverluste in Grün und hohe in Rot an. Eigene Darstellung.

der Zuwachs des gewichteten Fahrzeitverlusts pro Abstandsvergrößerung der Infill-BG von ihren optimalen Positionen – sehr gering. Damit stellt sich ein großer Bereich rund um das Optimum ein, in dem die Infill-BG ohne relevanten oder signifikanten Anstieg des gewichteten Fahrzeitverlusts platziert werden können.

4.4.6 Beispielrechnungen

Zur Quantifizierung der Einflüsse unterschiedlicher Parameter auf die optimalen Positionen der Infill-BG wird ein Testfall mit einem Zug des Schienenpersonennahverkehr (SPNV) erstellt.

Die Strecke wird als eben ohne Neigung angenommen und mit einer zulässigen Geschwindigkeit von 160 km/h modelliert. Die RS wird fest auf 20 km/h gesetzt. Der Zug wird als zweiteiliger, dieselmechanisch angetriebener Triebzug des Typs „Leichter innovativer Nahverkehrstriebwagen (LINT) 54“ des Herstellers Alstom modelliert. Er hat eine Länge von 54 m, besitzt eine Gesamtmasse von circa 118 t und weist in der modellierten Variante eine Antriebsleistung von 3x390 kW auf. Damit liegt die Höchstgeschwindigkeit bei 140 km/h. Die

Beschleunigungswerte wurden mit dem anerkannten und bewährten Fahrzeitrechner des Programms LUKS [280] in der Version 3.9 ermittelt. Das Anfahren bis 20 km/h wird als eine Stufe modelliert, alle Geschwindigkeiten darüber hinaus werden in Inkrementen von 10 km/h abgebildet. Als Referenzkurve zur Ermittlung der Bremsbeschleunigungen wird die *Indication Curve* mit dem offiziellen Bremskurven-Simulationsprogramm der ERA [32] bestimmt. Dabei werden die NV der DB InfraGO AG [21] genutzt. Der Zug wird als Reisezug in Bremsstellung R mit 180 Bremshundertsteln modelliert. Die erstellten Stufenfunktionen der Anfahr- und Bremsbeschleunigungen sind in Tabelle 4.14 aufgeführt.

Tab. 4.14: Stufenfunktionen zur Approximation der Anfahr- und Bremsbeschleunigung des Testzuges LINT 54.

Geschwindigkeit [km/h]	**Anfahrbeschleunigung [m/s²]**	**Bremsbeschleunigung [m/s²]**
$[0; 20]$	1,111	−0,135
$(20; 30]$	0,694	−0,288
$(30; 40]$	0,556	−0,368
$(40; 50]$	0,463	−0,435
$(50; 60]$	0,397	−0,492
$(60; 70]$	0,347	−0,541
$(70; 80]$	0,309	−0,584
$(80; 90]$	0,253	−0,621
$(90; 100]$	0,214	−0,654
$(100; 110]$	0,185	−0,684
$(110; 120]$	0,163	−0,710
$(120; 130]$	0,103	−0,734
$(130; 140]$	0,121	−0,756

Der IP ist ebenfalls eine Ausgabe des Bremskurvenwerkzeugs, wie in Abbildung 4.7 auf der nächsten Seite zu sehen ist. Die rotierenden Massen sind bereits in den Eingangsparametern vollständig berücksichtigt. Da in den untersuchten Szenarien keine Längsneigungen vorhanden sind, werden sie im Weiteren nicht benötigt. Die Mindestbeharrungsfahrzeit wird mit 6 s angenommen und für die Verarbeitungszeit der OBU werden 1,5 s angesetzt. Dieser Wert entspricht der nach Spezifikation längsten zulässigen Zeitspanne, die zwischen dem Empfang einer *Message* und der resultierenden Anzeige auf dem DMI gemäß Abschn. 5.2.1.3 Subset 041 [166] vergehen darf. Für alle BG wird ein globaler Mindestabstand von 50 m vorgegeben.

Ergebnisse

In einer ersten Berechnung sollen die Auswirkungen unterschiedlicher Geschwindigkeiten und Anzahlen an Infill-BG auf deren Positionen und den resultierenden gewichteten Fahrzeitverlust quantifiziert werden. Dazu wird die Ausgangsgeschwindigkeit im Bereich zwischen 40 km/h bis 140 km/h in Schritten von 10 km/h erhöht. Für jede untersuchte Geschwindigkeit wird jeweils eine Variante mit zwei und eine Variante mit drei Infill-BG erstellt. Die Position der weitesten Infill-BG berechnet sich in allen Fällen aus dem jeweiligen IP zuzüglich der Strecke, die der Zug innerhalb von 4 s mit seiner Ausgangsgeschwindigkeit zurücklegt. Die so berechneten

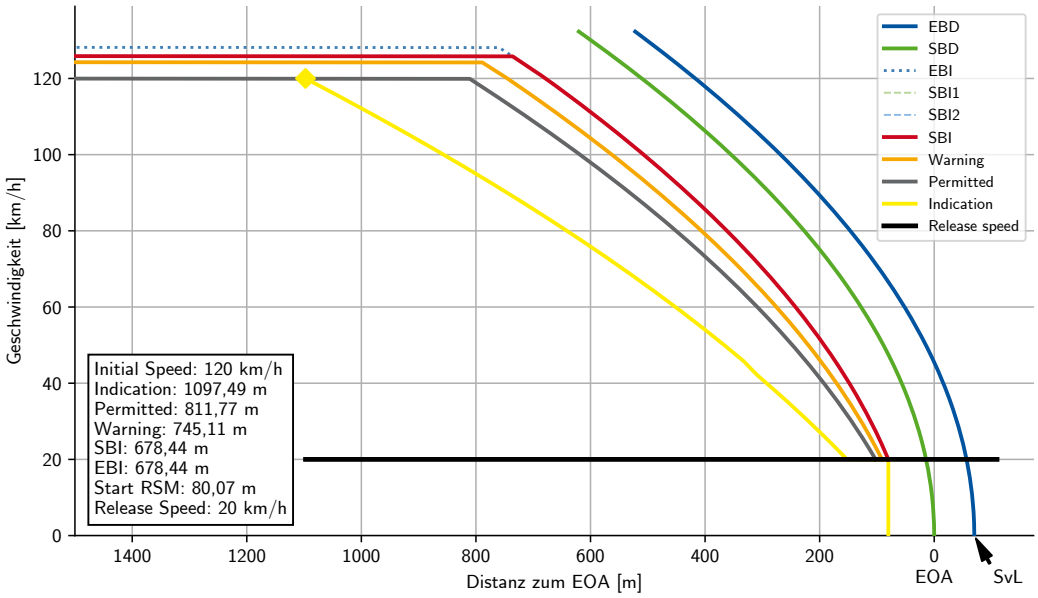


Abb. 4.7: ETCS-Bremskurven des Testzuges LINT 54 aus einer Geschwindigkeit von 120 km/h. Die Fahrtrichtung ist von links nach rechts. Eigene Darstellung auf Basis einer Berechnung mit [32].

Positionen sind in Tabelle 4.15 enthalten. Diese führt auch die Ergebnisse aller untersuchten Szenarien auf.

Tab. 4.15: Ergebnisse aus der Optimierung der Infill-BG für den Testzug LINT 54.

Geschwindigkeit [km/h]	Indication Point [m]	Zwei Infill-BG		Drei Infill-BG	
		Positionen [m]	Gewichteter Fahrzeitverlust [s]	Positionen [m]	Gewichteter Fahrzeitverlust [s]
40	288	147 und 333	15,8	147, 219 und 333	14,4
50	367	188 und 423	21,7	146, 250 und 423	19,3
60	452	205 und 519	27,0	145, 275 und 519	23,9
70	544	237 und 621	32,2	144, 312 und 621	28,5
80	642	256 und 731	37,3	143, 338 und 731	33,1
90	746	275 und 846	42,5	142, 363 und 846	37,9
100	857	317 und 968	48,0	191, 443 und 968	42,8
110	974	340 und 1096	53,7	203, 502 und 1096	48,0
120	1098	363 und 1231	60,0	228, 554 und 1231	53,6
130	1228	415 und 1373	66,9	241, 620 und 1373	59,9
140	1365	441 und 1520	74,6	258, 704 und 1520	67,0

Zuerst werden die Unterschiede im gewichteten Fahrzeitverlust zwischen den Szenarien mit zwei Infill-BG gegenüber jenen mit drei Infill-BG untersucht. Die absolute Differenz liegt hier bei 1,4 s bis 7,6 s bei 40 km/h bzw. bei 140 km/h. Die relative Differenz bewegt sich im Bereich von 9,7 % bis 13,0 %. Der geringste Wert ist erneut bei einer Geschwindigkeit von 40 km/h zu finden, der höchste bei 70 km/h. In allen Fällen sind bei gleicher Ausgangsgeschwindigkeit drei Infill-BG vorteilhafter als zwei. Dies überrascht nicht, da eine Aufwertung an mehr diskreten

Orten möglich ist. Dennoch kann die Frage gestellt werden, inwiefern der berechnete Nutzen den notwendigen Aufwand einer zusätzlichen BG aufwiegen kann.

Des Weiteren ist ersichtlich, dass der IP mit steigender Geschwindigkeit proportional stärker ansteigt als die optimale Position der Infill-BG gemessen vom EOA aus. Mit Blick auf die Ergebnisse scheinen hier Positionen näher am EOA günstiger zu sein als solche, die weiter davor liegen. Für das Verhältnis aus der Position der Infill-BG und dem IP ergibt sich im Zwei-BG-Szenario ein Verhältnis von 0,51 bis 0,32, wobei die Werte mit steigender Geschwindigkeit sinken. Bei drei Infill-BG bewegen sie sich im Bereich von 0,51 bis 0,19 für die dem EOA nächstgelegene BG und von 0,76 bis 0,52 für die mittlere. Auch hier gilt der erste Wert für die niedrigste Geschwindigkeit und der zweite für die höchste. Ein Erklärungsansatz ist, dass am Beginn des Bremsvorgangs, also kurz nach Passieren des IP durch eine Aufwertung nur ein geringer Fahrzeitverlust vermieden wird. Je weiter sich der Zug dem EOA nähert und dementsprechend weiter abbremst, desto größer ist der Vorteil einer Aufwertung. Durch die Gewichtung wird dies im Algorithmus berücksichtigt und genau dort liegt das Optimum mit dem Minimum des gewichteten Fahrzeitverlusts. Bemerkenswert ist zudem, dass sich die Änderungsrate der Verhältnisse mit steigender Geschwindigkeit reduziert und sich ein Stabilisieren der Verhältniszahlen andeutet.

Abbildung 4.8 stellt das Szenario mit drei Infill-BG bei einer Ausgangsgeschwindigkeit von 120 km/h dar. Die BG liegen dabei optimal an den Positionen 228 m, 554 m und 1231 m vor dem EOA. Der zugehörige gewichtete Fahrzeitverlust berechnet sich zu 53,6 s.

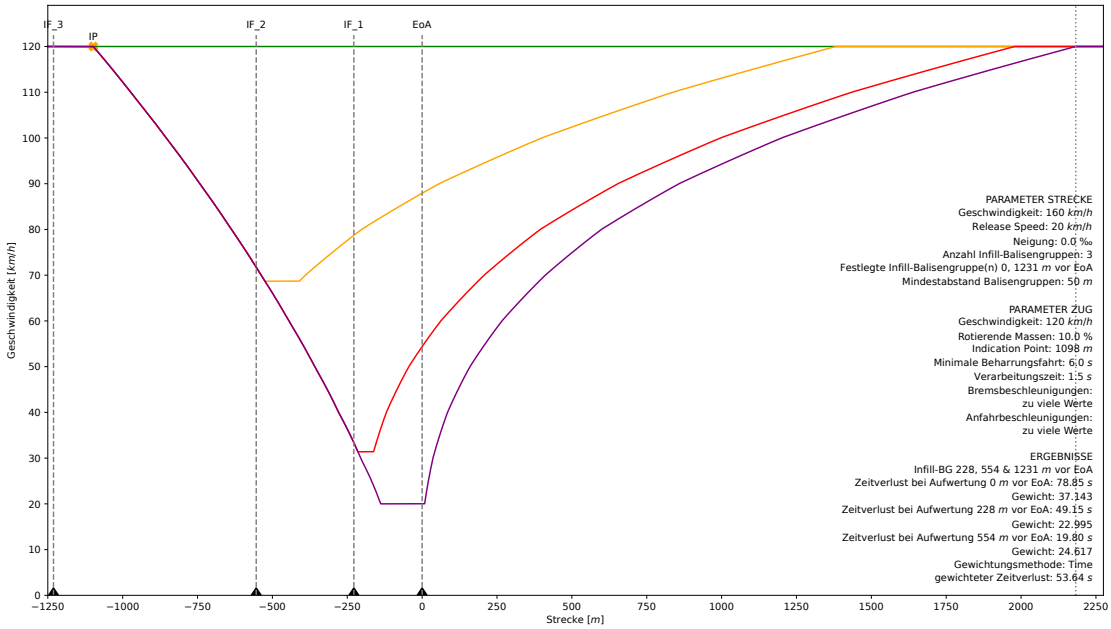


Abb. 4.8: Trajektorien bei drei optimal platzierten Infill-BG im Testfall LINT 54 bei 120 km/h. Die Fahrtrichtung ist von links nach rechts. Die Farben kennzeichnen den Empfang der Infill-Informationen an der BG IF_3 (grün), IF_2 (gelb), IF_1 (rot) oder am EOA (violett). Eigene Darstellung.

Verglichen dazu werden im Szenario mit nur zwei Infill-BG diese 363 m und 1231 m vor dem EOA vorgesehen und der gewichtete Fahrzeitverlust steigt auf 60,0 s. Dies entspricht einer Steigerung von 6,4 s oder 11,9 %. Die entsprechende grafische Darstellung der Trajektorien zeigt Abbildung 4.9.

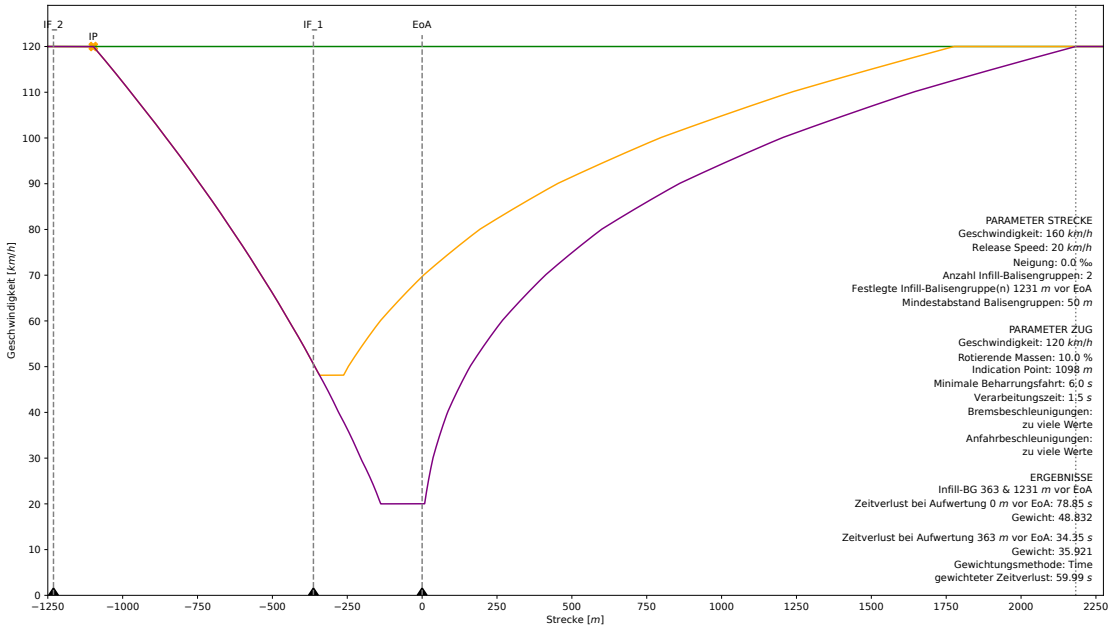


Abb. 4.9: Trajektorien bei zwei optimal platzierten Infill-BG im Testfall LINT 54 bei 120 km/h. Die Fahrtrichtung ist von links nach rechts. Die Farben kennzeichnen den Empfang der Infill-Informationen an der BG IF_2 (grün), IF_1 (gelb) oder am EOA (violett). Eigene Darstellung.

In einem zweiten Schritt werden die gewichteten Fahrzeitverluste unterschiedlicher Strategien zur Platzierung der Infill-BG berechnet. Hierfür wurden basierend auf Bestandssystemen und der Literatur sechs regelbasierte Strategien entwickelt. In allen Fällen wird die weiteste Infill-BG wie zuvor in Abhängigkeit von IP und Geschwindigkeit festgesetzt. Die ersten drei Strategien nutzen feste Positionen, die sich aus den Standorten des Vorsignals und der GM 1000 Hz und 500 Hz der deutschen PZB 90 mit den Regelbremswegen von 1000 m, 700 m und 400 m ergeben. Die Strategien 3 und 4 teilen die Strecke zwischen der weitesten Infill-BG und dem EOA in zwei bzw. drei gleich große Segmente. Basierend auf einer früheren ETCS-Studie [128] wird bei der sechsten und letzten Strategie eine zusätzliche Infill-BG in einem festen Abstand von 400 m vor dem EOA vorgesehen. Im Überblick sind die sechs Strategien:

1. zwei zusätzliche Infill-BG bei 1000 m und 250 m vor dem EOA;
2. zwei zusätzliche Infill-BG bei 700 m und 250 m vor dem EOA;
3. zwei zusätzliche Infill-BG bei 400 m und 250 m vor dem EOA;
4. zwei zusätzliche Infill-BG bei einem Drittel und zwei Dritteln des IP;
5. eine zusätzliche Infill-BG bei der Hälfte des IP;
6. eine zusätzliche Infill-BG bei 400 m vor dem EOA, analog der Ausstattung aus [128].

Liegt eine der nach Strategie zu platzierenden BG vor dem IP oder näher als 100 m an der weitesten Infill-BG, so wird das Szenario nicht betrachtet. Die übrigen Parameter sind identisch zum ersten Teil des Tests. In Tabelle 4.16 sind die Ergebnisse für die Szenarien mit drei Infill-BG dargestellt, während Tabelle 4.17 jene für zwei Infill-BG enthält. Ebenfalls in den beiden Tabellen aufgeführt ist der Unterschied zum minimalen Fahrzeitverlust.

Tab. 4.16: Ergebnisse der Evaluation unterschiedlicher Strategien zur manuellen Platzierung von drei Infill-BG im Testfall LINT 54.

Strategie	Geschwindigkeit [km/h]	Positionen [m]	Gewichteter Fahrzeitverlust [s]	Delta zum Optimum [s]
Optimum	80	143, 338 und 731	33,1	—
1	80	*250, 731 und 1000*	*keine Berechnung*	
2	80	*250, 700 und 731*	*keine Berechnung*	
3	80	250, 400 und 731	34,4	1,3
4	80	214, 427 und 731	33,7	0,6
Optimum	100	191, 443 und 968	42,8	—
1	100	*250, 968 und 1000*	*keine Berechnung*	
2	100	250, 700 und 968	44,6	1,8
3	100	250, 400 und 968	43,8	1,0
4	100	258, 571 und 968	43,5	0,7
Optimum	140	258, 704 und 1520	67,0	—
1	140	250, 1000 und 1520	69,2	2,2
2	140	250, 700 und 1520	67,0	0,0
3	140	250, 400 und 1520	70,5	3,5
4	140	455, 910 und 1520	69,3	2,3

Tab. 4.17: Ergebnisse der Evaluation unterschiedlicher Strategien zur manuellen Platzierung von zwei Infill-BG im Testfall LINT 54.

Strategie	Geschwindigkeit [km/h]	Positionen [m]	Gewichteter Fahrzeitverlust [s]	Delta zum Optimum [s]
Optimum	80	256 und 731	37,3	—
5	80	321 und 731	37,9	0,6
6	80	400 und 731	39,5	2,2
Optimum	100	317 und 968	48,0	—
5	100	428 und 968	49,1	1,1
6	100	400 und 968	48,7	0,7
Optimum	140	441 und 1520	74,6	—
5	140	682 und 1520	76,7	2,1
6	140	400 und 1520	74,8	0,2

Als Ergebnis des Vergleichs ist festzuhalten, dass alle Strategien in den untersuchten Geschwindigkeiten in Bezug auf den gewichteten Fahrzeitverlust nahe am Optimum liegen. Die größte absolute Abweichung in Höhe von 2,2 s stellt sich mit Strategie 1 bei 140 km/h sowie mit Strategie 6 bei 80 km/h ein. Die Berechnungsergebnisse unterstützen die Einschätzung als gutmütig eingeschätztes Systemverhalten aus Abschnitt 4.4.5 auf Seite 76, da die zusätzlichen Zeitverluste, die sich durch eine geringfügig nicht optimale Platzierung der Infill-BG ergeben, im Vergleich zu anderen Einflussfaktoren im realen Eisenbahnbetrieb in den Hintergrund treten können. Auf besonders stark belasteten Abschnitten der Eisenbahninfrastruktur

hingegen können im gestörten Betrieb die festgestellten relativen Unterschiede von hier bis zu 5,9 % dennoch relevant dafür sein, die praktische Kapazität zu erhöhen, Folgeverspätungen zu reduzieren und so den Kundinnen und Kunden eine gesteigerte Betriebsqualität zu bieten.

4.4.7 Weiterentwicklungsmöglichkeiten

Sollen mehrere Züge berücksichtigt werden, so stellen die resultierenden Positionen der Infill-BG einen Kompromiss der individuellen optimalen Positionen dar. Eine vollständige „Optimierung“ auf alle erwartbaren Züge gleichermaßen ist durch die punktförmige Übertragung von MA im Level 1 nicht möglich. Gesamthaft betrachtet zeigen die Ergebnisse, dass sich der gewichtete Fahrzeitverlust bei Verschiebung der Infill-BG um etwa ± 50 m von den optimalen Positionen nur marginal ansteigt und in den meisten Anwendungsfällen von ETCS Level 1 nicht relevant ist. Diese These wird durch das Testen und Vergleichen unterschiedlicher Strategien zur manuellen Positionierung unterstützt. Mit zunehmend diversen und abweichenden Fahrdynamiken der zu berücksichtigen Züge steigt jedoch der Anteil der Fahrten, bei denen größere Fahrzeitverluste auftreten als betrieblich akzeptabel sein könnten.

Besonders relevant ist hierbei die Lage der jeweiligen *Indication Points*. Der Bemessungszug mit dem größten *Indication Point* bestimmt die Position derjenigen Infill-Balisengruppe, welche am weitesten vor dem EOA angeordnet wird. Zudem ist dies der maßgebende Punkt, der den Beginn der Annäherungsfahrzeit im Sperrzeitenmodell definiert. Damit besitzt seine Position einen direkten Einfluss auf die Leistungsfähigkeit, wenn er für eine Vielzahl von Zügen nicht optimal positioniert werden kann.

Die weiteren Infill-Balisengruppen wirken sich darauf aus, wie weit ein Zug abbremsen muss, wenn die Aufwertung erst zu einem späteren Zeitpunkt erfolgen kann. Bei geringerem Brems- und Beschleunigungsvermögen sind Infill-Balisengruppen weiter vor dem EOA vorteilhafter als solche im unmittelbaren Umfeld wie bei Personenverkehrszügen mit besseren Brems- und Beschleunigungswerten. Gerade bei der Betrachtung von Güter- und Personenzügen können sich das meist geringere Bremsvermögen des Güterverkehrs kombiniert mit der geringeren Geschwindigkeit aufheben, sodass nur geringe Abweichungen in den Balisenpositionen auftreten.

Schlussendlich können keine allgemeingültigen Aussagen darüber getroffen werden, in welchen Fällen oder Konstellationen unterschiedliche Zugcharakteristika zu einem betrieblich kritischen Zustand führen werden. Hier ist immer eine Untersuchung im Einzelfall notwendig. Die Abwägung ist dann anhand des geplanten Betriebsprogramms, insbesondere des Zugmixes und der häufig auftretenden Zugfolgefälle sowie den Leistungsanforderungen zu treffen.

Einer steigenden Anzahl von Infill-BG sind aus technisch-wirtschaftlichen Gesichtspunkten Grenzen gesetzt, sodass aus betrieblicher Sicht die Anwendung des funkgestützten Level 2 vorteilhaft sein kann. Vertiefte Kapazitätsuntersuchungen auch mit Vergleichen der ETCS-Level werden im Kapitel 7 ab Seite 115 durchgeführt.

4.5 Bahnübergänge

4.5.1 Grundlagen

Als höhengleiche Kreuzungen zweier unterschiedlicher Verkehrsträger – Schiene und Straße – mit unterschiedlichen Eigenschaften kommt Bahnübergängen eine besondere Bedeutung zu. Schienenfahrzeuge haben an Bahnübergängen grundsätzlich Vorrang gegenüber jeglichen Verkehrsteilnehmenden auf der kreuzenden Straße oder dem kreuzenden Weg, gekennzeichnet durch das Zeichen 201 (Andreaskreuz) der Straßenverkehrs-Ordnung [253]. Dieser Vorrang wird durch technische und nicht-technische Maßnahmen unterstützt.

Regelwerke für die Ausgestaltung der Sicherung von Bahnübergängen sind bei den EdB in den Richtlinienfamilien 815 [215] und 819 [217] und bei den NE-Bahnen in der Vorschrift für die Sicherung der Bahnübergänge bei nichtbundeseigenen Eisenbahnen (BÜV-NE) [226] festgehalten.

Vergleichende Untersuchungen von BÜ und ETCS für deutsche Verhältnisse haben in der kürzeren Vergangenheit bereits Biehl [9], Fehlauer [35] und Kirschbauer [64] durchgeführt. Fehlauer und Kahl [37] zeigen Möglichkeiten auf, Einschränkungen auf den Betrieb an Bahnübergängen durch ETCS zu vermeiden. In allen Fällen lag der Fokus dieser Untersuchungen auf ETCS Level 2 und Level 1 LS. Level 1 FS war lediglich bei der Betrachtung ausländischer Lösungen im Fokus.

Müller [89] beschäftigte sich mit der Einbindung von BÜ bei ETCS Level 1 FS mit einem starken Fokus auf die sich ergebenden Möglichkeiten eines dynamisierten Level 1 FS. Außerdem zeigte er einige Optimierungsmöglichkeiten auf, die auch bei konventioneller Stellwerkstechnik umsetzbar erscheinen. Diese werden im weiteren Verlauf aufgriffen. Weitergehende Vorteile einer zentralen Ansteuerung der BG in Bezug auf BÜ wurden dann von Laumen [71] und Laumen et al. [74] entwickelt.

4.5.2 Bahnübergänge in ETCS

Für ETCS relevant sind lediglich solche Bahnübergänge, welche eine Handlung auf dem Tfz benötigen, und solche, bei denen eine Information über den Zustand des Bahnübergangs angezeigt werden muss, sodass ggf. eine entsprechende Reaktion erfolgen kann.

Bahnübergänge werden in ETCS durch die Variable *NID_LX* eindeutig identifiziert. Diese ist notwendig für alle BÜ, deren Sicherungszustand mit dem Paket 88 (siehe Abschnitt 4.5.5 auf Seite 88) in ETCS abgebildet werden soll. Allerdings bietet *NID_LX* bedingt durch eine Länge von 8 bit lediglich 256 Ausprägungen. Dieser Wertebereich wird weiter eingegrenzt durch die ETCS-Spezifikationen, da nur die ersten 127 Werte (0 bis 126) für die Übertragung durch Balisen genutzt werden dürfen [149]. Die übrigen 129 Werte im Bereich von 127 bis 255 sind für die Übertragung durch RBC reserviert. Damit die Eindeutigkeit trotz des verfügbaren Wertebereiches immer gewährleistet ist, sind hierfür Projektierungsregeln notwendig. Hierbei ist

das Ziel, dass einem Fahrzeug an jeder Stelle der Infrastruktur alle relevanten Bahnübergänge bekannt sind, ohne dass eine Kollision der vergebenen *NID_LX* entsteht. An Infrastrukturgrenzen, an denen beiderseits unterschiedliche Übertragungsmedien genutzt werden (also Level 1 auf der einen Infrastruktur und Level 2 auf der anderen), ergibt sich durch den geteilten Wertebereich eine natürliche Trennung der *NID_LX*. An Infrastrukturgrenzen, an denen beiderseits dasselbe Übertragungsmedium genutzt wird, ist eine Abstimmung zwischen den beteiligten EIU unerlässlich.

Für Fahrten in der Rückfallebene in der Betriebsart SR muss stets davon ausgegangen werden, dass die Informationen eines Paket 88 nicht oder nicht mehr vorliegen. Um dennoch auch in diesem Fall eine rudimentäre Sicherung und technische Überwachung der Zufahrt auf einen nicht ausreichend gesicherten BÜ zu haben, muss mit jedem Paket 88, das einen nicht ausreichend gesicherten BÜ ankündigt, eine zusätzliche TSR übertragen werden. Diese entspricht in der Geschwindigkeit der im Paket 88 festgelegten Geschwindigkeit zum Befahren des manuell oder automatisch nachgesicherten BÜ und umfasst die erste BÜ-Hälfte bis zur Straßen- bzw. Wegmitte. Ein ggf. betrieblich vorgeschriebener Halt vor dem BÜ kann technisch in der Rückfallebene nicht forciert werden. Erfolgt an späterer Stelle die Aufwertung der Sicherungsinformationen, sodass der BÜ entgegen den ersten Informationen nun gesichert ist, muss die TSR entsprechend gleichlautend mit dem Paket 66 wieder aufgehoben werden.

Für die Planung und Projektierung von ETCS muss bei den technisch gesicherten Bahnübergängen nach den Überwachungsarten differenziert werden.

4.5.3 Überwachungsart Hp

Bahnübergänge der Überwachungsart Hp sind in die Fahrstraßenlogik des zugehörigen Stellwerks eingebunden, sodass die Fahrtstellung des deckenden Hauptsignals nur dann möglich ist, wenn der Bahnübergang ordnungsgemäß gesichert ist. Aus diesem Grund ist eine explizite Abbildung solcher Bahnübergänge in ETCS nicht notwendig. Die Vergabe einer regulären MA enthält implizit die Information über die ordnungsgemäße Sicherung.

Der Abstand zwischen dem deckenden Hauptsignal (bzw. ETCS-Halt) und dem Bahnübergang muss nicht angepasst werden, da ETCS sichere Bremskurven bietet. Perspektivisch kann dieser Abstand bei reinem ETCS-Betrieb reduziert werden. Maßgebend sind dann im Regelfall die Bremswege in der Rückfallebene von Fahrten in der Betriebsart SR.

Nachteilig kann sich bei der Einführung von ETCS auf einer bestehenden Infrastruktur mit Bestands-LST ergeben, dass sich durch einen früheren Fahrstraßenanstoß die Schließzeiten von Hp-BÜ verlängern. Dies ist darin begründet, dass für eine ungehinderte Fahrt eine neue, verlängerte MA vorliegen muss, bevor ein Zug seinen individuellen IP erreicht. Die nur punktförmige Übertragung im Level 1 bedeutet, dass die Fahrstraße vollständig gesichert und die MA vorliegen muss, bevor der Zug die Infill-BG erreicht, die unmittelbar vor seinem IP liegt. Bedingt durch die Bremskurven gegenüber Bestandssystemen kann dieser Abstand größer sein als bisher. Hierfür kann keine allgemeine Regel aufgestellt werden, sondern es sind im

Einzelfall die Streckencharakteristik und das Betriebsprogramm mit den regelmäßig erwarteten Zügen und deren fahrdynamischen Eigenschaften zu berücksichtigen. Ohne Anpassung des Fahrstraßenanstoßes besteht das Risiko, dass Züge regelmäßig eine Bremsung einleiten müssen.

4.5.4 Überwachungsart Fü

Fernüberwachte BÜSA sind eigensicher ausgeführt. Im Fehlerfall wird der Fdl des zugeordneten Stellwerks über den Fehler informiert und der BÜ automatisch gesichert. Aufgrund dieser Charakteristik wird der Sicherungszustand nicht in ETCS abgebildet. Bei einer Störung der BÜSA und projektierter Störhaltabhängigkeit muss das System die Vergabe einer MA unterbinden.

Im Umfeld von Fü-BÜ ist für die Tf lediglich die Information relevant, ob sie sich gerade innerhalb einer Einschaltstrecke eines solchen BÜ befinden. Innerhalb der Einschaltstrecke sind besondere betriebliche Regeln zu beachten, wenn der Zug zum Halten kommt. Bei konventioneller Signalisierung wird hierfür das Signal Bü 3 (Merktafel) [244] aufgestellt, welches den Einschaltpunkt einer Fü-BÜSA und damit den Beginn der Einschaltstrecke kennzeichnet. Diese Information muss unter ETCS aufgrund der Relevanz und Signifikanz in der Führerstandssignalisierung abgebildet werden. Hierfür steht keine native ETCS-Funktion zur Verfügung, sodass auf die frei projektierbaren Textmeldungen des Pakets 73 („Packet for sending plain text messages“)[3] zurückgegriffen werden muss. Im Sinne einer einheitlichen nationalen Ausgestaltung sollten hier in Anlehnung an die Ril 483.0701 [198] die folgenden Wortlaute genutzt werden:

- für einen einzelnen BÜ: „`Einschaltstrecke BÜ km ...,...`“;
- für mehrere BÜ: „`Einschaltstrecke BÜ km ...,... ;` x `BÜ`“.

Dabei werden die Textmeldungen angezeigt, solange sich der Zug in der Einschaltstrecke befindet. Aufgrund einer direkten betrieblichen Folge bei Halt innerhalb der Einschaltstrecke wird die Bedeutung der Nachricht gezeigt, indem sie als „wichtige Information“ klassifiziert wird. Sie ist jedoch nicht quittierungspflichtig.

Die Position des Einschaltkontaktes und damit die Länge der Einschaltstrecke sowie die Schließdauer sind alleine von der örtlich zulässigen Geschwindigkeit sowie der Einschaltdauer des BÜ abhängig und muss daher mit der Einführung von ETCS nicht angepasst werden.

Sollen die BÜ-Ankündetafeln und BÜ-Kennzeichentafeln in die Führerstandssignalisierung aufgenommen werden, so erfolgt dies ebenso über Textmeldungen mit dem Paket 73:

- für einen einzelnen BÜ: „`BÜ km ...,...`“;
- für mehrere BÜ gemeinsam: „`BÜ km ...,... ;` x `BÜ`“;
- für zwei separate BÜ: „`BÜ km ...,... , BÜ km ...,...`“.

[3] Bis zur SV 2.3 wird dieses Paket mit selbem Inhalt und selber Struktur als Paket 72 bezeichnet, siehe [148, 161].

Hierbei sollte die Anzeige von dem jeweils festgelegten Sichtpunkt der Tafeln bis zum Überqueren des zugehörigen Bahnübergangs bzw. der zugehörigen Bahnübergänge erfolgen. Aufgrund ihrer Charakteristik werden diese Textmeldungen als „weitere Information“ klassifiziert und sind auch nicht quittierungspflichtig.

4.5.5 Überwachungsart ÜS

BÜ mit ÜS arbeiten autark, sie sind also nicht an ein Stellwerk angeschlossen. Es findet daher keinerlei Informationsaustausch zwischen BÜSA und Stellwerk statt. Aus diesem Grund können nur die am BÜ vorliegenden Daten zur Ansteuerung von gesteuerten BG herangezogen werden.

Im Gültigkeitsbereich der Ril 815 sind ÜS-BÜSA in Verbindung mit ETCS im Regelfall nicht zulässig [201]. Gründe hierfür sind in der Ausrüstungs- und Stellwerksstrategie der DB zu sehen. In den bisherigen Projekten wurden vor allem Schnellfahrstrecken und hoch belastete Strecken mit ETCS ausgerüstet. Auf diesen sind BÜ entweder aufgrund der zulässigen Geschwindigkeiten von mehr als 160 km/h nicht zulässig, respektive unerwünscht. Da ETCS überdies nur zusammen mit den neuesten Generationen von ESTW und DSTW ausgerüstet wird, bedingt dies häufig einen kompletten Ersatz der LST. In diesem Zuge werden häufig bestehende BÜ durch Überführungsbauwerke ersetzt oder ersatzlos entfernt. Die möglichen Anwendungsfälle von ETCS Level 1 FS in Deutschland hingegen werden voraussichtlich primär auf Strecken mit geringeren Geschwindigkeiten und Zugzahlen zu finden sein. Dort befinden sich deutlich häufiger BÜ, zudem ist in vielen Fällen ein vollständiger Stellwerksersatz wirtschaftlich nicht tragfähig, sodass entsprechende Lösungen auch für Bestandstechnik wie ÜS-BÜ verfügbar sein müssen.

Das ÜS der bisherigen Außensignalisierung zeigt dem Tf an, ob der Bahnübergang gesichert ist und befahren werden darf oder ob eine ausreichende Sicherung nicht gewährleistet ist und eine (hilfsweise) Nachsicherung vonnöten ist. Beide Zustände müssen mit dem für den Anwendungsfall BÜ spezifizierten Paket 88 („Level Crossing Information“) [149] in ETCS abgebildet werden. Hierfür wird entweder der Sicherungszustand der BÜSA direkt ausgewertet oder es erfolgt ein Signallampenstromabgriff der jeweiligen Überwachungssignale. Bei gesichertem BÜ besitzt das Paket 88 keinen Einfluss auf das Fahrverhalten des Zuges. Ist jedoch der BÜ nicht ausreichend gesichert, so wird eine Bremskurve auf ein temporäres EOA mit temporärer SvL am Beginn des BÜ berechnet. Des Weiteren wird definiert, ob ein Halt vor dem BÜ notwendig ist (*Q_STOPLX*) und mit welcher Geschwindigkeit ein solcher nicht ausreichend gesicherter BÜ maximal befahren werden darf (*V_LX*). Der genaue technische Ablauf aus ETCS-Sicht bei einem nicht ausreichend gesicherten BÜ ist in [147] beschrieben.

Für die Anwendung in Deutschland wird bei nicht ausreichend gesichertem BÜ ein Halt gefordert, nach erfolgter Sicherung darf dieser bis zur Straßen- bzw. Wegmitte maximal mit Schrittgeschwindigkeit befahren werden, danach ist zügig zu beschleunigen. Aus praktischen Gründen sollte die maximale Geschwindigkeit mit 10 km/h projektiert werden, da der nächst-

kleinere mögliche Wert von 5 km/h zu restriktiv ist und unbeabsichtigte Bremseingriffe wegen Überschreiten der maximal zulässigen Geschwindigkeit hervorrufen könnte.

Die ÜS-BG muss im Bereich zwischen dem ÜS und dessen Sichtpunkt angeordnet werden und entsprechend ihrer Funktion gesteuert sein. Sie soll dabei möglichst nahe am Sichtpunkt des bisherigen ÜS angeordnet werden. Damit wird dem Tf auch eine entsprechende Reaktionszeit eingeräumt, im Falle eines nicht ausreichend gesicherten BÜ eine Bremsung einzuleiten.

Die Textmeldungen zu Einschaltstrecken sowie für die Ankünde- und Kennzeichentafeln sind gleichlautend zu Fü-BÜ (siehe Abschnitt 4.5.4 auf Seite 87) vorzusehen.

Trotz der Anordnung der ÜS-BG möglichst weit vor dem BÜ und damit am Sichtpunkt des ÜS können Konstellationen auftreten, bei denen der Bremsweg aus der örtlich zulässigen Geschwindigkeit auf null vor dem Bahnübergang rechnerisch mit den ETCS-Bremskurven nicht mehr ausreichend ist. Im Falle eines nicht ausreichend gesicherten BÜ mit temporärem EOA vor dem BÜ könnte also unmittelbar nach Überfahren der ÜS-BG eine Zwangsbremsung ausgelöst werden, weil die Überwachungskurven (SBI bzw. EBI) instantan überschritten sind. Neben einer generellen, optimierten Parametrisierung der Bremskurven durch Wahl der NV lassen sich solche Konstellationen auf zwei Arten entschärfen.

Zuerst kann eine Verlängerung der Einschaltstrecke mit Verlegung des Einschaltkontakts und des ÜS geprüft werden. Eine Verlängerung der Einschaltstrecke resultiert jedoch in verlängerten Schließzeiten, die möglicherweise nicht zulässig oder straßenverkehrstechnisch nicht umsetzbar sein könnten. Als Zweites bieten die ETCS-Spezifikationen die Möglichkeit, dem Zug einen maximal zulässigen Bremsweg (Permitted Braking Distance (PBD)) vorzugeben. Dies erfolgt mit dem Paket 52, das für die Anwendung an problematischen BÜ entsprechend parametrisierbar ist. Die Übertragung des Pakets muss in ausreichendem Abstand vor dem BÜ erfolgen, sodass die reduzierte Geschwindigkeit vor der ÜS-BG erreicht ist. Denkbar ist die Übertragung gemeinsam mit der MA, mit dem der Zug den BÜ überqueren kann, oder an einer anderen, vorgelagerten BG. Die Berechnung der zulässigen Geschwindigkeit erfolgt hierbei dynamisch anhand der vorgegebenen Streckenneigung und dem Bremsvermögen des Zuges. Aus diesem Grund sollte auch keine TSR genutzt werden, da damit aus technischer Sicht weiterhin Konstellationen auftreten können, bei denen der berechnete Bremsweg den verfügbaren überschreitet. Durch die dynamische Berechnung werden unnötige betriebliche Einschränkungen so weit wie möglich vermieden. Auch eine Kombination beider Maßnahmen ist möglich.

Bei BÜ mit ÜS sind die beiden Sonderfälle „BÜ/BÜ-Kette“ und „Gekoppelte BÜ“ noch separat zu betrachten, da diese technischen Lösungen eigene Implikationen für den Betrieb und auch die Projektierung von ETCS besitzen.

Bei einer BÜ/BÜ-Kette liegen mehrere BÜ unmittelbar hintereinander, wobei jeder BÜ ein eigenes ÜS besitzt. Daher gelten grundsätzlich dieselben Regeln wie bei einfachen ÜS-BÜ. Die Textmeldungen zur Kennzeichnung der Einschaltstrecken sind entsprechend der örtlichen Verhältnisse zur projektieren. Ist ein ÜS in einer BÜ/BÜ-Kette gleichzeitig auch Überwachungssignalwiederholer (ÜSW) für einen weiteren BÜ, so wird an der zugehörigen

BG der Sicherungszustand beider BÜ mit jeweils einem Paket 88 übertragen. Wird der Sicherungszustand der BÜ aus dem Signalbild des ÜS abgeleitet, also eine einfache, dezentrale LEU genutzt, so sind im Störungsfall entsprechend auch alle BÜ der Kette als nicht ausreichend gesichert anzusehen. Eine schematische Darstellung einer BÜ/BÜ-Kette zeigt Abbildung 4.10.

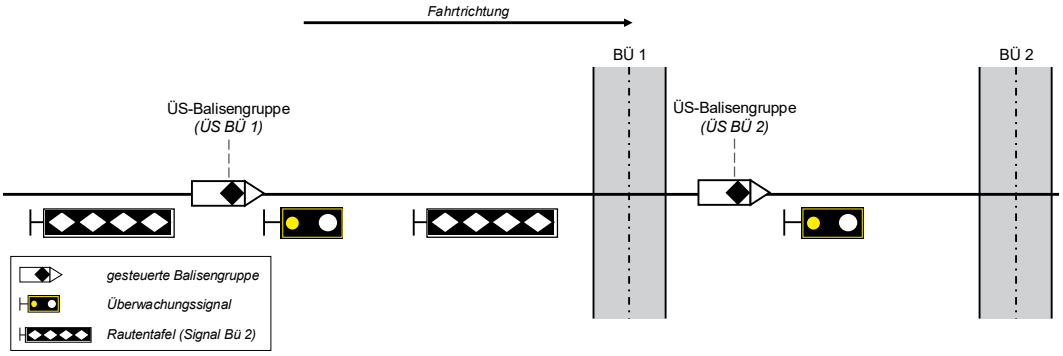


Abb. 4.10: Schematische Darstellung einer BÜ/BÜ-Kette. BÜ-Ankündetafeln und BÜ-Kennzeichentafeln sind nicht dargestellt. Eigene Darstellung in Anlehnung an [201].

Im Anwendungsfall gekoppelter BÜ besitzen alle zugehörigen BÜ ein gemeinsames ÜS. In ETCS wird jeder zugehörige BÜ mit einem eigenen Paket 88 abgebildet. Wird der Sicherungszustand der BÜ aus dem Signalbild des ÜS abgeleitet, also eine einfache, dezentrale LEU genutzt, so sind im Störungsfall entsprechend auch alle BÜ der Kette als nicht ausreichend gesichert anzusehen und mit den Paketen 88 zu übertragen. Die verfügbaren technischen Mittel erlauben jedoch die Verbesserung, dass bei einer Störung auch ausschließlich die gestörten BÜ als nicht ausreichend gesichert bekannt gemacht werden. Dies bedingt ein Abgreifen des Sicherungszustands direkt an der jeweiligen BÜSA und nicht per Lampenstromabgriff am ÜS. Eine schematische Darstellung von gekoppelten BÜ zeigt Abbildung 4.11.

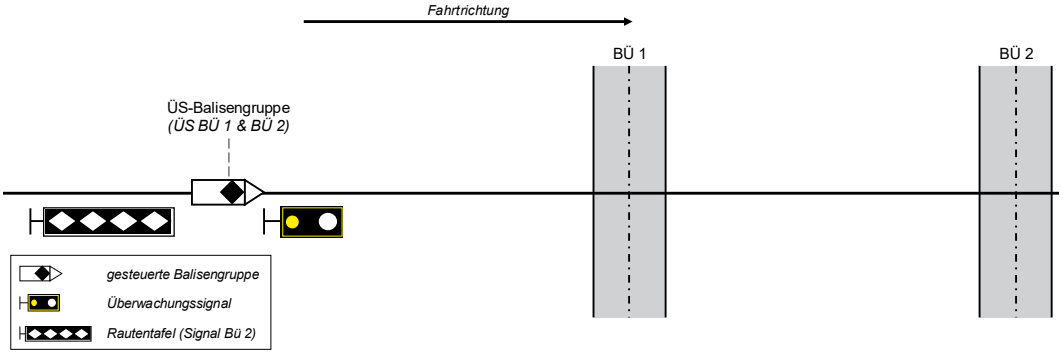


Abb. 4.11: Schematische Darstellung gekoppelter BÜ. BÜ-Ankündetafeln und BÜ-Kennzeichentafeln sind nicht dargestellt. Eigene Darstellung in Anlehnung an [201].

4.5.6 Überwachungsart ÜSoE

BÜ der Überwachungsart Überwachungssignal mit optimierter Einschaltstrecke (ÜSoE) können als Weiterentwicklung von ÜS-BÜSA angesehen werden mit dem Ziel, die Schließzeiten

für den kreuzenden Straßenverkehr zu reduzieren. Solche Anlagen kommen seit Mitte der 2000er Jahre sowohl bei den EdB als auch bei den NE zum Einsatz [10]. Die erste Anwendung von ETCS mit ÜSoE in Deutschland findet im Projekt „Knappenrode – Horka“ nahe der deutsch-polnischen Grenze statt [126].

Solche BÜSA sind ähnlich wie Fü-BÜSA eigensicher ausgelegt, sodass das ÜS nicht die erfolgte Einschaltung, sondern die Einschaltbereitschaft der Anlage anzeigt. Dadurch muss der eigentliche Einschaltpunkt der Anlage nicht vor dem ÜS und damit deutlich weiter als der Bremsweg der Strecke vor dem BÜ geplant werden.

Bei ÜSoE-Anlagen, welche in Grundstellung am ÜS das Signal Bü 1 („Der Bahnübergang darf befahren werden.“) zeigen, kann die ÜS-BG optimal in Bezug auf die erwarteten Fahrzeuge, deren Geschwindigkeiten und Bremseigenschaften platziert werden. Eine Anpassung der BÜSA ist nicht notwendig. Bedingt durch die Führerstandssignalisierung kann die entsprechende BG auch vor dem Signal Bü 2 (Rautentafel) platziert werden.

BÜSA hingegen, welche in Grundstellung am ÜS das Signal Bü 0 („Halt vor dem Bahnübergang! Weiterfahrt nach Sicherung.“) zeigen, bedürfen einer differenzierten Betrachtung. Hier liegt die Information, ob die BÜSA einschaltbereit ist, erst vor, wenn der Zug den Einschaltkontakt befahren hat (zuzüglich systembedingter Latenzen). Daher muss die zugehörige BG in Fahrtrichtung hinter dem Einschaltpunkt liegen, damit die Information „BÜ gesichert“ beim Überfahren der BG auch vorliegt. Nach konkreten Verhältnissen und maßgebendem IP kann sich dadurch die Einschaltstrecke verlängern, um zwischen der BG und dem BÜ im Störungsfall ein geregeltes Anhalten ohne unmittelbaren Bremseingriff des ETCS zu ermöglichen.

Nach aktuellem Stand der Richtlinien sind ÜSoE-BÜSA in Kombination mit ETCS auf der Infrastruktur der DB nur mit ständigem Bü 1 zulässig [202]. Dies ist aus technischer Sicht auch die bessere Lösung, da kürzere Schließzeiten und eine einfachere Projektierung ermöglicht werden, die unabhängig von den exakten Bremseigenschaften der verkehrenden Züge ist. Allerdings spricht grundsätzlich nichts dagegen, auch bestehende Anlagen mit der Grundstellung Bü 0 in Kombination mit ETCS wie oben beschrieben zu nutzen.

4.5.7 Überwachungsart FSÜ

Bahnübergänge der neuen Überwachungsart Fahrstraßenüberwachung (FSÜ) lassen sich sicherungstechnisch in drei Ausprägungen gliedern [75]:

- FSÜ(B): eigensichere Anlage mit zugbewirkter Einschaltung, wobei der jeweils relevante Einschaltpunkt anhand von Informationen des Stellwerks ermittelt wird;
- FSÜ(E): eigensichere Anlage mit zugbewirkter Einschaltung, wobei der jeweils relevante Einschaltpunkt vom Stellwerk ermittelt wird;
- FSÜ(S): nicht eigensichere Anlage mit signalbewirkter Einschaltung durch das Stellwerk.

Aufgrund der in allen Fällen vollständigen Einbindung der BÜSA in die Fahrstraßenbildung und -überwachung können solche Anlagen in der ETCS-Projektierung wie Hp-BÜSA behandelt werden und müssen daher nicht explizit in ETCS abgebildet werden.

Durch die Stellwerksanbindung und die Wahl eines für jede Zugfahrt passenden Einschaltpunktes besteht das Potenzial, mit FSÜ-BÜSA die Schließzeiten zu reduzieren. Hierfür müssen im Level 1 zusätzliche Informationen aus weiteren Umsystemen, wie beispielsweise dem Leitsystem, genutzt werden, um die Eigenschaften der betreffenden Fahrten zu nutzen. Im Level 2 können hierfür die dem RBC vorliegenden Daten genutzt werden. Relevante Informationen hierfür sind z. B. die Zughöchstgeschwindigkeit oder auch planmäßige Halte zwischen Einschaltpunkt und BÜ.

Da die Daten aus dem Leitsystem grundsätzlich als nicht sicher anzusehen sind und daher auch falsch sein können, muss anderweitig sichergestellt werden, dass beispielsweise ein als „langsam“ identifizierter Zug sicher nicht schneller fährt als zur Wahl des Einschaltpunkts angenommen.[4] Je nach technischer Ausgestaltung der Balisenansteuerung kann hierfür in der ETCS-Projektierung entweder das SSP modifiziert oder eine TSR genutzt werden. Beide Lösungen sind in der Lage, die zulässige Geschwindigkeit eines Zugs entsprechend zu beeinflussen. Im Sinne der Trennung von Funktionalitäten erscheint die Lösung unter Nutzung von TSR zielführender. Wird anhand der bekannten Zugeigenschaften ein Einschaltpunkt gewählt, der mit einer Fahrt mit geringerer als infrastrukturell zulässiger Geschwindigkeit korrespondiert, muss eine entsprechende TSR mit ebendieser Geschwindigkeit übertragen werden. Idealerweise geschieht dies gemeinsam mit der MA.

4.5.8 Nicht technisch gesicherte Bahnübergänge

Auch bei den nicht technisch gesicherten Bahnübergängen existieren unterschiedliche Ausprägungen und Arten der Sicherung. Diese müssen für die Projektierung von ETCS differenziert betrachtet werden. Die EBO [239] legt die zulässigen Arten der Sicherung von BÜ auch bei nicht technischer Sicherung fest. Die gesetzlichen Vorgaben sind in die Regelwerke Ril 815.2000 [200] bzw. BÜV-NE [226] überführt. Für nicht technisch gesicherte BÜ ergeben sich daraus im Regelfall die folgenden Möglichkeiten der Sicherung bei Kreuzung mit öffentlichen Wegen und Straßen:

- Übersicht auf die Bahnstrecke und Umlaufsperren u. ä.,
- Pfeifsignale vor BÜ und Umlaufsperren u. ä.,
- Übersicht auf die Bahnstrecke und Pfeifsignale vor BÜ,
- Pfeifsignale vor BÜ und Langsamfahrstelle vor BÜ,
- Übersicht auf die Bahnstrecke.

Von dieser Auflistung fallen die Pfeifsignale sowie die Langsamfahrstellen in den Bereich der Signalisierung und Zugbeeinflussung. Beide Aspekte sind mit der Einführung von ETCS auf einer

[4] Hier bedeutet „schneller“ dennoch innerhalb der durch ETCS überwachten, maximal zulässigen Höchstgeschwindigkeit.

Infrastruktur in diesem abzubilden, um den Anforderungen an eine Führerstandssignalisierung nachzukommen. Eine anderweitige, explizite Abbildung von nicht technisch gesicherten BÜ findet nicht statt.

Die bahnübergangsbedingten Langsamfahrstellen können entweder über eine TSR (Paket 65) oder das SSP (Paket 27) umgesetzt werden. Die Lösung der TSR ist in allen Fällen möglich und wirkt sich auch auf Fahrten in der Rückfallebene (Betriebsart SR) aus, erfordert jedoch die Projektierung und Übertragung zusätzlicher Pakete. Daher kann für Langsamfahrstellen, deren zulässige Geschwindigkeit mindestens der örtlich gültigen, maximal zulässigen Geschwindigkeit in der Betriebsart SR (*V_NVSTFF*) entspricht, ausschließlich im SSP abgebildet werden.

Das Pfeifen vor einem BÜ wird im Regelfall mit dem Signal Bü 4 signalisiert. Dafür wird das Paket 68 genutzt, welches eine entsprechende Ausprägung bereits definiert hat (*Sound horn*). Die Tf werden optisch und akustisch auf das notwendige Pfeifen hingewiesen. Dafür muss während der Projektierung ein Bereich definiert werden, in dem das Symbol angezeigt werden soll. Dieser Bereich wird begrenzt durch den Standort des Signals Bü 4 als Beginn und die BÜ-Mitte als Ende. Für jedes Signal Bü 4 muss ein separates Paket 68 erstellt werden. Mehrere dieser Pakete können ohne Einschränkungen im selben Telegramm oder derselben Message übertragen werden.

Bei der Sicherung von BÜ durch Pfeifen treten regelmäßig Fälle auf, in denen die oben beschriebene, einfache Variante nicht ausreichend ist.

Liegt zwischen dem Signal Bü 4 und dem BÜ ein Bahnsteig, an dem regelmäßig Züge halten, so gilt das erste Signal Bü 4 (in der Außensignalisierung gekennzeichnet mit einer zusätzlichen Tafel mit zwei senkrechten schwarzen Streifen) nicht für haltende Züge. Dies wird mit einer Textmeldung (Paket 73) mit dem Wortlaut „`Pfeifen gilt nicht für haltende Züge!`“ kenntlich gemacht.

Im Geltungsbereich der ehemaligen Dienstvorschrift (DV) 301 wird mit dem Signal Pf 2 das zweimalige Pfeifen (einmal am Standort der Tafel und einmal unmittelbar vor dem BÜ) kommandiert. Dementsprechend wird es in ETCS auch mit zwei Paketen 68 abgebildet.

Bei einer engen Abfolge von Bahnübergängen kann die normalerweise geforderte Odometriegenauigkeit (ausgedrückt im maximalen Abstand zweier verlinkter BG) nicht ausreichend sein, die Anzeigen zufriedenstellend genau auszulösen. In solchen Fällen kann ein reduzierter Maximalabstand gefordert werden. Bei bspw. 800 m maximaler Distanz zweier benachbarter BG reduziert sich der Odometriefehler auf maximal 45 m zuzüglich der Verlegegenauigkeit der BG. Für diese Funktion ist es ausreichend, ungesteuerte BG bestehend aus einer einzigen Balise zu ergänzen. Bei höheren Genauigkeitsanforderungen muss mit zusätzlichen Ortungs-BG gearbeitet werden.

Bei einer besonders engen Abfolge von BÜ, bei der aufgrund der Odometriegenauigkeit und der kurzen Distanzen zwischen den einzelnen BÜ eine korrekte Zuordnung der Pfeifaufforderungen nicht gewährleistet ist, kann es erforderlich sein, vom Grundsatz der vollständigen

Führerstandssignalisierung abzuweichen und die Tf aufzufordern, bestimmte Außensignale (hier die Pfeiftafeln Bü 4) zu befolgen. Dies erfolgt mit der Textmeldung „x `BÜ 4 beachten!`“ und weist die Tf an, die angegebene Anzahl Pfeiftafeln entlang der Strecke zu beachten und damit zu pfeifen. Dies wird ergänzend zu den Paketen 68 angewendet und so lange angezeigt, wie auch die zugrundeliegenden Pakete 68 gültig sind.

In seltenen Fällen kann im Bestand statt des Pfeifens das Läuten mit dem Signal Bü 5 signalisiert sein. Hierfür existiert keine native ETCS-Funktion, sodass zur Abbildung auf das Paket 73 zurückgegriffen werden muss. Es wird eine Textmeldung mit dem Wortlaut „`Läuten!`“ vorgesehen. Diese muss ab 4 s bei örtlich zulässiger Geschwindigkeit vor dem Standort des Signals Bü 5 bis zum zugehörigen BÜ angezeigt werden. Sie ist zwar nicht quittierungspflichtig, jedoch als „wichtige Information“ klassifiziert.

In allen Fällen kann nach Anforderungen des EIU eine zusätzliche Textmeldung mit dem Paket 73 vorgesehen werden. Der Wortlaut entspricht dann dem in Abschnitt 4.5.4 auf Seite 87 gezeigten.

4.6 Transitionen

Als Transitionen werden in ETCS grundsätzlich alle Wechsel der OBU in Bezug auf Level oder Betriebsart bezeichnet. Darüber hinaus werden auch Wechsel zwischen Infrastrukturen (ganz gleich ob beiderseits mit demselben Level und Betriebsart gefahren wird oder nicht) als Transition bezeichnet. Der Wechsel zwischen unterschiedlichen Infrastrukturen kann dabei an einer Staatsgrenze oder lediglich an einer Infrastrukturgrenze zweier beteiligter EIU im selben Staat sein.

Insbesondere an Landesgrenzen stellen ETCS-Transitionen vor allem bei gewünschter, durchgehender Befahrbarkeit im Level 2 außerordentliche Herausforderungen dar. Brune et al. [13], Kahl und Maschek [61], Schwenzer [114] und Schwenzer und Brune [115] zeigen in ihren Arbeiten unterschiedliche Aspekte dazu auf. Der Fokus liegt hierbei vielfach in der Anwendung von Level 2, welches eine höhere Komplexität bedeutet als eine Transition mit Level 1. Aus diesem Grund wird teilweise sondiert, zwei benachbarte Level 2-Strecken mit einem verbindenden Level 1-Anteil auszurüsten, um die Schnittstellenproblematik zu umgehen. Mittlerweile ist am DZSF eine Umgebung zur Simulation von ETCS-Transitionen im Einsatz, mit denen die komplexen Vorgänge vorab im Labor erprobt und optimiert werden können [66]. Ein Aspekt davon sind unterschiedliche NV beiderseits der Infrastrukturgrenze, welche zu Bremskurvensprüngen führen können. Diese beeinträchtigen die Arbeitsumgebung der Tf, da ein Fahren nach den Führungsgrößen nicht mehr möglich ist, sondern durch Schulung und Erfahrung diese Sprünge antizipiert werden müssen und dementsprechend das Fahrverhalten angepasst werden muss. Dennoch können damit nicht alle Betriebssituationen abgedeckt werden. Zusätzlich stellen solche Bremskurvensprünge ein potenzielles Sicherheitsrisiko dar, da die kontinuierlich überwachten Bremskurven essenzieller Teil der Sicherheitsphilosophie sind. Durch einen Sprung zu niedrigeren Geschwindigkeiten kann sich ein Fahrzeug weit oberhalb aller

Grenzen befinden und z. B. ein Halt vor einem EOA nicht mehr mit der eigentlich angenommenen Sicherheit garantiert werden, sofern diese Fälle nicht bereits durch eine entsprechende Projektierung abgefangen wurden. Die Thematik potenzieller Bremskurvensprünge betrifft aufgrund des gleichartigen Systemverhaltens gleichermaßen auch Transitionen im Level 1, wenn unterschiedliche NV mit abweichenden Bremskurvenparametern und Korrekturwerte beteiligt sind.

Gemäß Subset 026-5 [147] besteht eine *Level Transition* aus einer Ankündigung vor der eigentlichen Grenze sowie dem Auftrag zum Levelwechsel an der Grenze. Für beide Funktionen wird das Paket 41 genutzt, wobei sich die projektierte Distanz bis zum Ort der Transition unterscheidet. In einigen Fällen kann auch eine bedingte Transition mit dem Paket 46 kommandiert werden. Bei diesen erfolgt eine Transition nur dann, wenn sich die OBU in einem Level befindet, der nicht im projektierten Paket enthalten ist. In beiden Paketen wird eine Reihenfolge möglicher bzw. zulässiger Level definiert, welche der Priorität entsprechend ausgewertet werden. Der Level mit der höchsten Priorität, der vom Fahrzeug unterstützt wird, wird dann gewählt.

Transitionen müssen von den Tf nur dann quittiert werden, wenn nach der Transition ein niedrigeres Überwachungsniveau vorliegt oder vorliegen kann. Vom Level 1 kommend sind daher Transitionen nach Level 0 und Level NTC zu quittieren, während alle Transitionen nach Level 1 nicht quittierungspflichtig sind, vgl. Subset 026-5 [147].

Relevant für die Projektierung im Anwendungsfall Deutschland sind die folgenden Transitionen unter Beteiligung von ETCS Level 1 FS:

- Level 2 $\Leftrightarrow$ Level 1 FS;
- Level 1 FS $\Leftrightarrow$ Level 1 FS;
- Level NTC PZB $\Leftrightarrow$ Level 1 FS;
- Level 0 (ZLB) $\Leftrightarrow$ Level 1 FS;

Aufgrund der sehr begrenzten und nicht weiter verfolgten Ausrüstung mit ESG bei der DB InfraGO AG werden entsprechende Transitionen von und nach diesem System im Folgenden nicht betrachtet. Gleiches gilt für den Wechsel zwischen ETCS Level 1 FS und LZB. Bei Ausrüstung mit ETCS auf mindestens einer Seite des Transitionsortes muss unterschieden werden, ob jeweils eine Doppelausrüstung oder eine Ausrüstung mit *ETCS only* vorliegt, vgl. Abschnitt 4.1 auf Seite 50.

Die voraussichtlich meisten Schnittstellen von ETCS Level 1 werden zukünftig zu Level 2 sein. Bevor die Transition durchgeführt werden kann, muss die Netzregistrierung im korrekten GSM-R-Netz sowie der Funkaufbau zum zugeordneten RBC erfolgen. Bevor dieses eine MA vergeben kann, muss das Fahrzeug zudem eine gültige und vertrauenswürdige Position besitzen und dem RBC mitteilen. Hierfür ist mindestens eine Ortungsbalisengruppe vorzusehen, welche dem RBC bekannt ist. Die Transition findet im Regelfall unmittelbar nach dem sogenannten Grenzsignal statt. Sind aufgrund der örtlichen Gegebenheiten keine ausreichend großen Entwicklungslängen für die Netzregistrierung und den Funkaufbau realisierbar, müssen

entweder die Zeitanteile auf das kleinstmögliche Maß reduziert, der Transitionsort verlegt oder die Transition an geeigneter Stelle im Stand durchgeführt werden. Sofern alle planmäßigen Fahrten einen Fahrplanhalt während des Funkaufbaus haben, kann dessen Mindesthaltezeit angerechnet werden, wodurch sich die notwendigen Längen reduzieren. Findet aufgrund des eingestellten Fahrwegs nach dem Aufbau der Funkverbindung keine Transition nach Level 2 statt, so muss nach der Entscheidungsweiche eine ungesteuerte Balisengruppe das Paket 42 (RBC mit GSM-R) bzw. das Paket 32 (RBC mit FRMCS) übertragen, damit die Verbindung zum RBC wieder beendet wird. Gleiches gilt für die Transition von Level 2 nach Level 1. Hier wird die Funkverbindung zum RBC hinter dem Ort des Levelwechsels abgebaut. Die entsprechende BG muss daher in ausreichendem Abstand zum Transitionsort liegen, damit die Fahrzeuge mit höchster Wahrscheinlichkeit die Transition erfolgreich durchführen konnten. In der Gegenrichtung muss nach der Transition zu Level 1 die Funkverbindung zum RBC beendet werden.

Bei einem Wechsel von ETCS Level 1 FS nach Level 1 FS eines anderen EIU findet streng genommen keine Transition statt. Es werden an der Grenze lediglich die neuen NV übertragen. Der Gültigkeitswechsel der NV sollte möglichst in einen Bereich gelegt werden, wo im Regelfall keine aktive Bremskurvenüberwachung zu erwarten ist.

Beim Wechsel vom Level NTC PZB zu Level 1 FS findet der Übergang im Regelfall an einem Hauptsignal statt, welches als Grenzsignal betrachtet wird. Dieses ist mit einer BG auszustatten, welche neben der MA auch die Transition mit dem Paket 41 überträgt. Diesem vorgelagert ist eine BG, welche die Level-Transition ankündigt. In der Gegenrichtung endet die Level 1-MA abweichend mit einem LOA, welches die zulässige, signalgeführte Geschwindigkeit definiert. Dabei ist sicherzustellen, dass alle PZB-Beeinflussungspunkte bereits mit aktiver PZB-Fahrzeugeinrichtung überfahren werden. Auch hierbei ist die Ankündigung der Transition notwendig. Diese muss durch den Tf quittiert werden, da es sich um eine Transition zu einem niedrigeren Überwachungsniveau und einen Wechsel von Anzeigeführung zu Signalführung handelt.

Die Transition zwischen Level 0 (ZLB) und Level 1 FS erfolgt analog. Abweichend sind keine PZB-Beeinflussungspunkte zu berücksichtigen.

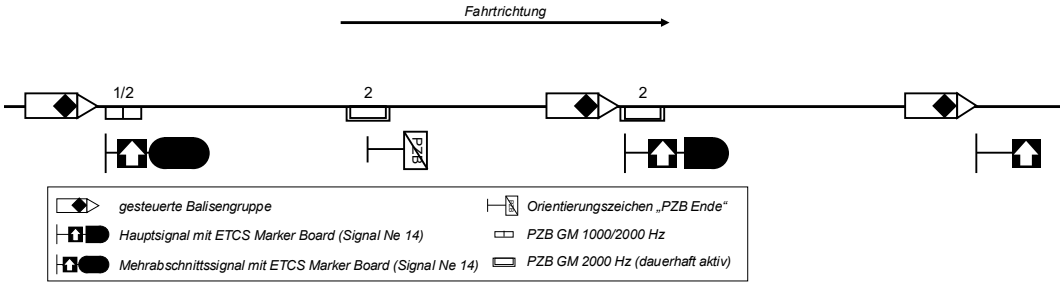


Abb. 4.12: Schematische Darstellung der Zufahrtsicherung. Eigene Darstellung.

Ist nur auf einer Seite der Infrastrukturgrenze eine Ausrüstung mit PZB vorhanden, so muss unterbunden werden, dass reine PZB-Fahrzeuge oder solche ohne funktionierende ETCS-OBU in die Infrastruktur ohne PZB-Ausrüstung fahren können. Hierfür wird an der Grenze

ein Übergangsbereich eingerichtet, der bspw. durch zwei Hauptsignale begrenzt wird. Hinter dem ersten Hauptsignal wird in einigem Abstand eine dauerhaft aktiver PZB-GM 2000 Hz mit zugehörigem Orientierungszeichen installiert, welcher eine Weiterfahrt von PZB-überwachten Zügen unterbindet. Zusätzlich wird das Folgesignal ebenfalls mit einem dauerhaft aktiven PZB-GM 2000 Hz versehen. In die Gegenrichtung sind keine besonderen Vorkehrungen zu treffen. Eine solche Ausrüstung ist auch unter der Bezeichnung „Zufahrtsicherungssignal“ bekannt. Abbildung 4.12 auf der vorherigen Seite zeigt eine schematische Darstellung der Zufahrtsicherung.

5 Projektierung der Balisentelegramme

Dieser Abschnitt basiert inhaltlich in Teilen auf Vorarbeiten des Autors, deren Ergebnisse auszugsweise in bspw. [138] veröffentlicht wurden.

5.1 Grundsätze

Eine wesentliche Restriktion in der Projektierung von ETCS Level 1 ergibt sich aus der begrenzten Datenkapazität der genutzten Balisen. Die maximal übertragbare Informationsmenge korreliert damit direkt mit der Anzahl installierter Balisen. Zum Zeitpunkt der ersten Infrastruktur- und Hardwareplanung kann daher nicht in allen Fällen garantiert sein, dass mit der geplanten Anzahl an Balisen innerhalb einer BG bzw. der geplanten Anzahl an BG insgesamt alle notwendigen und gewünschten Daten an der richtigen Stelle übertragen werden können. Ein iteratives Vorgehen und das Vorhalten von Reserven ist essenziell für den Planungserfolg.

Die maximale Telegrammlänge einer einzelnen Balise ergibt sich aus ihrer Bauform und der örtlich maximal zulässigen Geschwindigkeit der Züge. Eurobalisen werden in den Bauformen *Standard Size* und *Reduced Size* hergestellt, siehe Subset 036 [152]. Die Spezifikationen der für ETCS genutzten Eurobalisen enthalten zwei Telegrammarten mit einer Länge von 1023 bit (lang) bzw. 341 bit (kurz), siehe Abschn. 4.3.1.1 Subset 036 [152]. Während Balisen der *Standard Size* im gesamten spezifizierten Geschwindigkeitsbereich bis 500 km/h beide Telegrammarten übertragen können, gilt dies für Balisen der *Reduced Size* lediglich für Geschwindigkeiten bis einschließlich 300 km/h, siehe Abschn. 5.2.2.3 Subset 036 [152]. Bei höheren Geschwindigkeiten können mit *Reduced Size* Eurobalisen ausschließlich die kurzen Telegramme übertragen werden. Bedingt durch das spezifizierte Format der Balisentelegramme stehen von der gesamten Telegrammlänge jedoch lediglich 830 bit bzw. 210 bit für Nutzdaten zur Verfügung. Die Differenz zwischen Nutzdaten und Telegrammlänge ergibt sich durch

- *Scrambling* und *Shaping* der Nutzdaten (83 bit bzw. 21 bit),
- *Control bits* (3 bit),
- *Scrambling bits* (12 bit),
- *Extra shaping bits* (10 bit) und
- *Check bits* (85 bit).

Um die für die eigentlichen ETCS-Pakete verfügbare Datenmenge zu erhalten, sind von diesen Werten zusätzlich 50 bit für den *Telegram Header* und 8 bit für das Abschlusspaket 255 abzuziehen, siehe Abschn. 8.4.2.1 und Abschn. 7.4.2.39 Subset 026-7 [149]. Dementsprechend können bei den langen Telegrammen 772 bit und bei den kurzen Telegrammen 152 bit frei für die ETCS-Daten im Rahmen der Projektierung genutzt werden. Die Datenkapazität einer BG ergibt sich aus den oben angegebenen Werten multipliziert mit der Anzahl der Balisen innerhalb der BG. Im Folgenden wird aufgrund der aktuell typischen Geschwindigkeiten und

den wahrscheinlichsten Anwendungsbereichen von ETCS Level 1 von langen Telegrammen ausgegangen.

5.2 Übertragbare Datenmengen

ETCS-Pakete sind unteilbar. Dies bedeutet, sie müssen bei Übertragung durch das Medium „Balise“ vollständig von einer einzigen Eurobalise übertragen werden und können gemäß Subset 026-8 [150] nicht auf zwei oder mehr Balisen aufgeteilt werden. Dies erfordert von der Projektierung der Daten in erster Instanz, dass jedes Paket nicht größer sein darf als die maximale Balisenkapazität der verbauten Hardware. ETCS-Pakete, welche auf Basis der vorgestellten Projektierungsregeln erstellt werden und leicht den Bereich mehrerer hundert Bit erreichen können, sind:

- Paket 3: *National Values*;
- Paket 5: *Linking*;
- Paket 12: *Level 1 Movement Authority*;
- Paket 21: *Gradient Profile*;
- Paket 27: *International Static Speed Profile*;
- Paket 67: *Track Condition Big Metal Masses*;
- Paket 68: *Track Condition*;
- Paket 73: *Packet for sending plain text messages*.

Die Balisenkapazität begrenzt die maximal möglichen Inhalte dieser Pakete. Nach Spezifikation [149] sind durch die Variablendefinition von *N_ITER* als Integer mit einer Länge von 5 bit in allen Fällen maximal 31 Iterationen möglich. Zusätzlich stellen die „*Dimensioning and Engineering Rules*“ [165] weiter einschränkende Obergrenzen für die Anzahl zulässiger Iterationen innerhalb eines Paketes auf. Bezogen auf die obige Liste ergeben sich hieraus folgende Limitationen:

- Paket 5: maximal 29 Iterationen für die Ankündigung von 30 BG;
- Paket 12: maximal 5 *Sections* zuzüglich *End Section*;
- Paket 67: maximal 4 Iterationen;
- Paket 68: maximal 19 Iterationen.

Des Weiteren ist an selber Stelle die zulässige Anzahl gleicher Pakete in einer *Message* limitiert. Auf diesen Aspekt wird hier nicht vertieft eingegangen. Durch die Anforderungen des Subset 040 [165] können die Pakete 5, 12, 67 und 68 niemals mehr Daten enthalten, als eine einzelne Balise übertragen kann. Daher müssen für die verbleibenden Pakete 3, 21, 27 und 73 Regeln zur Begrenzung der Paketlänge aufgestellt werden.

Die im Paket 3 enthaltenen NV können eine große Variabilität in Bezug auf die Paketgröße erzeugen, sodass hier keine allgemeinen Aussagen getroffen werden können. An Orten, an

denen mehr als ein Paket 3 übertragen werden muss, ist dies als Einzelfall zu behandeln und kann ggf. im weiteren Verlauf auch auf andere Situationen angewendet werden.

Das Paket 21 (Gradientenprofil) erreicht mit 29 Iterationen eine Länge von 750 bit, sodass damit die maximale Länge für Balisenübertragung erreicht ist. Mit einem solchen Paket können 30 Neigungswechsel an das Fahrzeug übermittelt werden.

Das statische Geschwindigkeitsprofil des Paket 27 umfasst in der einfachsten Variante mindestens 58 bit und steigt mit jeder zusätzlichen Iteration um 28 bit. Damit ist es also möglich, innerhalb eines Pakets auf einer BG mit 25 Iterationen insgesamt 26 Geschwindigkeitswechsel zu projektieren. Dies führt zu einer Paketlänge von 758 bit. Werden jedoch neben dem Basis-Geschwindigkeitsprofil weitere Profile in Abhängigkeit des zulässigen Überhöhungsfehlbetrages übertragen, so reduziert sich die mögliche Anzahl an Iterationen auf 17 bei einem, zwölf bei zwei und zehn bei drei zusätzlichen Geschwindigkeitsprofilen.

Mit dem Paket 73 können beliebige Textmeldungen auf das DMI gebracht werden. Durch die Codierung als ISO/IEC 8859-1 [176] benötigt jedes Zeichen 8 bit. Die übrigen Variablen umfassen je nach konkreter Konfiguration 92 bit bis 110 bit. Dies bedeutet eine maximale Zeichenzahl von 82 bis 85. Im Regelfall sollten nach Möglichkeit kürzere Texte angestrebt werden, da die Fläche auf dem DMI zur Anzeige der Textmeldungen begrenzt ist. Bei längeren Texten kann der gesamte Text nur durch manuelles Weiterschalten vollständig erfasst werden.

5.3 Zuordnung der Pakete

Aus der in Abschnitt 5.2 auf der vorherigen Seite eingeführten Unteilbarkeit der Pakete folgt, dass die Zuteilung der einzelnen Pakete auf die Balisen einer BG kein triviales Problem ist. Es handelt sich hierbei um ein eindimensionales Behälterproblem (*Bin packing problem*) [77]. Dieses Behälterproblem muss theoretisch für jeden Zustand separat gelöst werden. Für ein anwendbares Vorgehen während der Projektierung ist diese Lösung jedoch aufgrund der Komplexität und des Zeitaufwandes nicht praktikabel. Vielmehr ist hier eine Heuristik oder ein Algorithmus anzuwenden.

Bei einem ETCS-System, bei dem die Balisentelegramme nicht nur anhand eines Signalbildes, sondern fahrwegspezifisch übertragen werden, können sich pro BG zahlreiche mögliche Zustände ergeben. Für eine optimale Nutzung der verfügbaren Balisenkapazitäten erscheint es auf den ersten Blick sinnvoll, für jeden möglichen Zustand die optimale Zuteilung zu bestimmen. Ein solches Vorgehen lässt jedoch außer Acht, dass bedingt durch die physische Ausdehnung der BG und auch durch die Betrachtung möglicher Fehlerfälle eine möglichst stabile Zuordnung der Pakete zu den Balisen einer Balisengruppe über alle Zustände angestrebt werden sollte. Gerade BG mit Infillfunktion können während des Umschaltens auf neue Informationen regelmäßig von einem Fahrzeug befahren werden, welches bspw. aus der ersten Balise die „alten“ Informationen liest und aus der zweiten Balise bereits die „neuen“ Informationen erhält. Bei BG an Haupt- und Sperrsignalen ohne Infillfunktion hingegen sollte im

Regelfall beim Überqueren keine wechselnden Baliseninhalte angetroffen werden. Bei einer wechselnden Zuordnung können für das Fahrzeug daraus Inkonsistenzen entstehen, welche zu einer unbeabsichtigten Systemreaktion mit Zwangsbremsung führen können. Gleiches Verhalten tritt auf, wenn die unterschiedlichen Baliseninhalte mit dem *Messagecounter M_MCOUNT* abgesichert werden müssen, um stets die Sicherheit gewährleisten zu können und dieser während des Überquerens zwischen den einzelnen Balisen einer BG wechselt. Bei einer stabilen Zuordnung ist daher anzustreben, dass gerade in diesen Fällen der wechselnden Baliseninhalte keine Systemreaktion erfolgt und die Sicherheit immer gewährleistet ist. Im Idealfall kann dennoch eine Aufwertung erfolgen. Alternativ sollte das Fahrzeug weiterhin die (unnötig) restriktiven Infill-Informationen erhalten, die jedoch konsistent sind. Damit werden negative Auswirkungen auf den Betriebsablauf so weit wie möglich reduziert.

Zur Erstellung einer Heuristik zur Zuordnung der Pakete auf die einzelnen Balisen sind die Randbedingungen des zu lösenden Problems zu erfassen und entsprechend sinnvoll abzubilden. Als Ausgangspunkt bzw. initialer Lösungskandidat wird eine Standardzuteilung entwickelt. Ausgehend davon können, wenn die Datenkapazität nicht eingehalten werden kann, stufenweise algorithmisch weitere Lösungskandidaten abgeleitet werden. Die unterschiedlichen Stufen resultieren in zusätzlichen Anforderungen an die Projektierung oder Ausrüstung. Als weitere Möglichkeit steht das Hinzufügen einer zusätzlichen Balise zur BG zur Verfügung.

Es wird von einer Ausrüstung mit BG bestehend aus jeweils zwei Balisen ausgegangen, wovon beide gesteuert ausgeführt sind. Dennoch ist es zur Zielerreichung sinnvoll, die erste Balise möglichst mit nicht veränderlichen Paketen zu belegen, sodass ihr Telegramm immer oder in den meisten Fällen zum Telegramm der zweiten Balise passt und sie zusammen eine konsistente Nachricht ergeben. Tabelle 5.1 zeigt die entwickelte Standardzuteilung, die Balisen sind dort entsprechend der Variablen *N_PIG* nummeriert. Zentriert dargestellte Pakete sind auf beiden Balisen vorzusehen.

Tab. 5.1: Standardzuteilung der ETCS-Pakete zu den Balisen einer BG.

Balise 0	**Balise 1**
Balise Header	
Paket 3 (National Values)	Paket 5 (Linking)
Paket 16 (Repositioning)	Paket 12 (Level 1 Movement Authority)
Paket 21 (Gradient Profile)	Paket 27 (International Static Speed Profile)
Paket 41 (Level Transition Order)	Paket 52 (Permitted Braking Distance)
Paket 67 (Track Condition Big Metal Masses)	Paket 65 (Temporary Speed Restriction)
Paket 68 (Track Condition)	Paket 66 (Temporary Speed Restriction Revocation)
Paket 73 (Packets for sending plain text messages)	Paket 80 (Mode profile)
Paket 132 (Danger for Shunting)	Paket 88 (Level Crossing)
Paket 137 (Stop if in Staff Responsible)	Paket 141 (Default Gradient for TSR)
Paket 145 (Inhibition of balise group message consistency reaction)	
Paket 254 (Default balise information)	
Paket 136 (Infill location reference)	
Paket 21 (Gradient Profile)	Paket 12 (Level 1 Movement Authority)
–	Paket 27 (International Static Speed Profile)
Paket 255 (End of Information)	

Kern der Zuteilung ist, dass die Pakete für Linking, MA und SSP (5, 12 und 27) von derselben Balise übertragen werden, während das GP (21) auf der anderen Balise projektiert ist. Damit sichergestellt ist, dass besonders wichtige Daten stets gemeinsam mit der MA übertragen werden, sind die Pakete 65 (TSR), 80 (*Mode Profile*) und 88 (BÜ) ebenso dort vorgesehen. Das Paket 141 sollte gemeinsam mit dem Paket 65 übertragen werden. Alle weiteren, bisher nicht genannten Pakete können ohne Einschränkungen zwischen den Balisen einer Balisengruppe getauscht werden. Für den produktiven Einsatz einer Softwareunterstützung soll daher ein Algorithmus zur Anwendung kommen, welcher automatisiert eine passende Zuteilung bestimmen kann.

Muss jedoch zur Einhaltung der Balisenkapazität eines der zuvor genannten Pakete auf einer von der Standardzuteilung abweichenden Balise projektiert werden, muss der *Message Counter M_MCOUNT* genutzt werden, welcher in seinen Ausprägungen mindestens zwischen den unterschiedlichen Ausprägungen des verschobenen Pakets unterscheidet. Aufgrund der Datenvielfalt sind die meisten Kapazitätsprobleme, vor allem mit nicht-trivialer Lösung, auf der zweiten Balise zu erwarten. Hier ist es sinnvoll, Prioritäten vorzugeben, welche Pakete in welcher Reihenfolge geprüft werden sollen, um die Balisenkapazität einzuhalten. Geeignete Kandidaten sind hier prioritär die Pakete 12 und 27.

Werden innerhalb einer gesteuerten BG sowohl gesteuerte als auch ungesteuerte Balisen eingesetzt, so müssen beide Typen zuerst getrennt voneinander betrachtet werden. Es muss daher zuerst sichergestellt werden, dass alle veränderlichen Daten von den gesteuerten Balisen übertragen werden können, da diese nicht auf den Festdatenbalisen projektiert werden können. Im Gegensatz dazu können jedoch unveränderliche Daten auch von gesteuerten Balisen übertragen werden.

5.4 Fahrbarkeit

5.4.1 Definition

Der Begriff der Fahrbarkeit wird im Rahmen dieser Arbeit gemäß dem britischen Standard *RIS-0713-CCS* [177] genutzt. Dort wird die *„Driveability“* definiert als: „The ease and reliability that train drivers are able to perform train operations in accordance with rules and procedures, throughout the range of operational and ambient conditions applicable to each train, within the operational context and while performing typical required duties.“

Lose übersetzt beschreibt die Fahrbarkeit die Einfachheit und Zuverlässigkeit, mit der Tf alle für die Bewegung des Zuges notwendigen Tätigkeiten innerhalb des definierten betrieblichen Rahmens erledigen können. An dieser Stelle wird der Fokus auf Tätigkeiten gelegt, welche in unmittelbarem Zusammenhang mit der Führerstandssignalisierung von ETCS stehen. Diese sind in nicht abschließender Aufzählung das Wahrnehmen der auf dem DMI angezeigten Informationen, das Einhalten der zulässigen Geschwindigkeit, das Anhalten vor einem EOA und das Bedienen weiterer Fahrzeugeinrichtungen wie Horn, Stromabnehmer und Hauptschalter.

Im Sinne einer gesamtsystemischen Betrachtung muss dieser Aspekt bei der Systementwicklung und dem Systemdesign berücksichtigt werden, da der Mensch im Eisenbahnbetrieb eine zentrale Rolle einnimmt und damit auch das erreichbare Sicherheitsniveau maßgeblich beeinflusst.

5.4.2 Grundlagen

Zu Beginn der Einführung von ETCS in Schweden wurden Untersuchung zur Fahrbarkeit durchgeführt, mit durchwachsenen Ergebnissen, wie Rosberg et al. [105] auf Basis ihrer systematischen Literaturrecherche berichten. Aus den Erfahrungen unterschiedlicher Länder identifizierten sie Geschwindigkeit, Bremskurven und DMI als die drei technischen Bereiche mit der größten Notwendigkeit für Verbesserungen. Bei den Geschwindigkeitsprofilen ist den Ergebnissen nach zu berücksichtigen, dass die Arbeitsbelastung der Tf steigt, da ETCS im Gegensatz zu vielen Bestandssystemen deutlich restriktiver gestaltet ist, was Geschwindigkeitsüberschreitungen anbelangt. Dies kann zu einem konservativeren Fahrverhalten führen, um Systeminterventionen zu vermeiden. Zudem besteht die Möglichkeit, jeden noch so geringen Geschwindigkeitswechsel im SSP zu projektieren, was bei einer hohen Zahl für einen menschlichen Tf durch die kognitiven Fähigkeiten sowie Reaktionszeiten zu einer Überlastung führen kann. Daher muss die Anzahl der projektierten Geschwindigkeitswechsel für eine gute Fahrbarkeit begrenzt werden. Durch die unter ETCS besonders in den früheren Systemversionen deutlich längeren, berechneten Bremswege wird im Mittel ein signifikant größerer Teil der Fahrzeit unter ablaufenden Bremskurven verbracht, was eine erhöhte Aufmerksamkeit erfordert. Positiv hervorgehoben wird die Anpassung an die Zugeigenschaften, sodass sich für bestimmte Charakteristiken auch deutliche Verbesserungen ergeben können. Der Wechsel von einer Außensignalisierung zu einer Führerstandssignalisierung bedeutet, dass einerseits mehr Aufmerksamkeit auf das Innere des Zuges gelegt wird als auf die Strecke, andererseits zeigt das DMI bedingt durch den begrenzten Platz eine Vielzahl an Informationen sehr komprimiert an. Auch hier wirken sich bspw. viele Geschwindigkeitswechsel negativ aus, da so die Lesbarkeit und Erkennbarkeit der Angaben leiden kann. Zusätzlich kann nicht immer unmittelbar transparent erkennbar sein, wenn eine Geschwindigkeitserhöhung technisch gar nicht ausfahrbar ist.

Aufbauend darauf haben sich Rosberg und Thorslund [104] mit dem Einfluss optimierter Geschwindigkeitsprofile auf die Tf befasst. Dieser Aspekt der Fahrbarkeit kann durch eine gute Projektierung unmittelbar beeinflusst werden, während viele andere aufgeführte Aspekte als Rückmeldungen in der Systementwicklung berücksichtigt werden müssen und daher nicht durch eine spezifische Projektierung beeinflussbar sind. In den Ergebnissen zeigte sich, dass ein optimiertes SSP die Fahrzeiten nur sehr geringfügig verlängert, jedoch positive Effekte auf den Energiebedarf einer Fahrt haben kann. Auf der in der Studie untersuchten Infrastruktur zeigten sich jedoch keine signifikanten Änderungen der Arbeitsbelastung, dennoch erscheint es zielführend, mit geringem zusätzlichem Aufwand in der Projektierung insgesamt eine bessere Arbeitsumgebung herzustellen.

5.4.3 Optimierung der Projektierung

Als großer Hebel zur Verbesserung der Fahrbarkeit im Rahmen der Projektierung ist das SSP anzusehen, mit dem die Trassierungsdaten und die Infrastruktureigenschaften in ein Profil zulässiger Geschwindigkeiten überführt werden. Dem Grundsatz nach bildet das SSP die örtlich zulässige Infrastrukturgeschwindigkeit ab, die sich aus Trassierung, Zwangspunkten und weiteren Parametern bestimmt. Dies kann gerade im Bahnhofsbereich und auf Strecken mit vielen Neigungswechseln, Bögen oder auch BÜ zu unzähligen Geschwindigkeitswechseln führen. Stellen im streng nach Regelwerk erstellten SSP mit kurzen Geschwindigkeitserhöhungen oder vielen gestuft auftretenden Geschwindigkeitswechseln sollten daher identifiziert und durch einen nachgelagerten Prozess optimiert werden.

Durch die Überlagerung des SSP mit weiteren Restriktionen wie TSR zum MRSP können weitere Stellen mit negativem Einfluss auf die Fahrbarkeit auftreten. Bei vordefinierten TSR sollte dies bei der Projektierung derselben berücksichtigt werden, indem z. B. die TSR geringfügig länger vorgesehen wird als technisch notwendig, um unnötig viele Geschwindigkeitswechsel zu vermeiden. Bei kurzfristig notwendigen TSR kann eine solche Betrachtung dem Betrieb nicht in allen Fällen zugemutet werden, da hierfür zusätzliche personelle Ressourcen mit entsprechendem Fachwissen notwendig wären, was deutlich über die Festlegung einer TSR hinaus geht.

In der Projektierung des SSP können jedoch die Eigenschaften der regelmäßig verkehrenden Züge berücksichtigt werden, da diese für die Überführung vom statischen zum dynamischen Geschwindigkeitsprofil relevant sind. Der Fokus sollte hier auf den Brems- und Beschleunigungsvermögen sowie der Zuglänge liegen. Zuallererst sollten kurze Abschnitte erhöhter Geschwindigkeiten mit einer Länge von weniger als der typischen Zuglänge (ggf. mit Addition einer zusätzlichen Distanz zur Berücksichtigung der Odometriegenauigkeit) eliminiert werden. Diese sind für einen Zug nicht „sichtbar“, da Geschwindigkeitserhöhungen im Regelfall erst dann durchgeführt werden können, wenn auch der Zugschluss den projektierten Geschwindigkeitswechsel durchfahren hat. Für eine differenziertere Betrachtung kann dann z. B. das sogenannte „*Speed Filtering*“ (vgl. auch Rosberg und Thorslund [104]) angewendet werden. Damit werden Abschnitte eliminiert, bei denen zwischen Beginn der Beschleunigungsphase und Beginn des nachfolgenden Bremsvorgangs eine Mindestzeitspanne nicht eingehalten werden kann. Rosberg und Thorslund [104] geben hierfür bspw. 30 s oder 60 s an. Eine solche Berechnung kann für eine begrenzte Auswahl von Zügen problemlos automatisiert durchgeführt werden. Alternativ kann eine ähnliche dynamische Betrachtung mit der Vorgabe einer Mindestbeharrungsfahrzeit vorgesehen werden. Dabei ist die Prämisse, dass jede neue Geschwindigkeit, insbesondere Geschwindigkeitserhöhungen, in der Art fahrbar sein müssen, dass die neue Geschwindigkeit für mindestens die vorgegebene Mindestbeharrungsfahrzeit gefahren werden kann, bevor wieder ein Bremseinsatz erfolgen muss. Auch hierfür kann ein Wertebereich von 30 s bis 60 s angenommen werden. Die Vorgabe der Mindestbeharrungsfahrzeit ist dabei restriktiver als das *Speed Filtering*, da die Beschleunigungsphase nicht als Teil der vorgegebenen Zeitspanne berücksichtigt wird.

Des Weiteren sollten weitere Projektierungseigenschaften, welche direkte Auswirkungen auf die Anzeigen auf dem DMI im Führerstand besitzen, Berücksichtigung finden. Hierbei rücken die Textmeldungen in den Fokus. Diese sollten so häufig wie notwendig und so selten wie möglich angewendet werden. Einerseits lenkt eine neue Textmeldung den Blick und den Fokus der Tf kurzzeitig auf eine andere Stelle als die Streckenbeobachtung oder die Einhaltung der Geschwindigkeit, ist mit einem akustischen Signal verbunden und besitzt nur eine sehr begrenzte Anzeigefläche auf dem DMI. Die in Kapitel 4 ab Seite 50 erstellten Planungsregeln berücksichtigen diesen Grundsatz bereits ausreichend. Jedoch kann es je nach Beschaffenheit und Eigenschaften der Infrastruktur zu Situationen kommen, in denen dennoch mehrere Textmeldungen in kurzer Folge auftreten würden. Es sollte den Tf möglich sein, eine Textmeldung vollständig gelesen und verarbeitet zu haben, bevor eine weitere, neue auf dem DMI angezeigt wird. Solche Situationen sind im Vorfeld während der Projektierung zu identifizieren. Zur Lösung ist in einem ersten Schritt zu prüfen, ob von den betroffenen Textmeldungen einige rein informative entfallen oder an einer anderen Stellen angezeigt werden können. Stellenweise können Textmeldung derselben Art zusammengefasst werden, sofern ein inhärenter Zusammenhang der Inhalte besteht. Die vorgestellten Lösungsstrategien bedingen im Regelfall keine Änderung der Streckenausrüstung.

5.4.4 Kapazitätswirkung

Durch Veränderungen des SSP kann sich rechnerisch eine Verschlechterung der Kapazität einstellen, da sich die Fahr- und Belegungszeiten geringfügig verlängern. Systemisch betrachtet muss dies jedoch nicht zu einer verringerten Kapazität bzw. einem Anstieg der Verspätungen im realen Betrieb führen. Der Grund liegt in der Tatsache, dass bei Kapazitätsbetrachtungen derzeit praktisch ausschließlich die technisch möglichen Trajektorien herangezogen werden, ohne den Faktor Mensch einzubeziehen. Dies führt im Regelfall zu optimistischeren Ergebnissen in der Theorie ggü. der Praxis. Die Optimierung der Fahrbarkeit durch Anpassungen des SSP kann daher auch als Annäherung der Theorie an die reale Welt gesehen werden, sodass die tatsächlichen Effekte als gering bis gar nicht vorhanden erwartet werden. Hier sind jedoch umfangreiche weitere Untersuchungen notwendig, um die tatsächliche, praktische Kapazitätswirkung quantifizieren zu können.

6 Betrieb

6.1 Regelbetrieb

Klassischerweise werden Bewegungen von Fahrzeuggruppen, die von mindestens einem Triebfahrzeug bewegt werden, in Zugfahrten und Rangierfahrten unterteilt. Diese Unterscheidung findet sich beispielsweise auch in der Funktionsweise und unterschiedlichen Sicherheitsniveaus in Stellwerken wieder. So sind die Anforderungen hinsichtlich des Flankenschutzes beispielsweise bei Zugstraßen in den meisten Ländern höher als bei reinen Rangierstraßen. Des Weiteren muss es bei Rangierstraßen möglich sein, diese in besetzte Gleise einzustellen, was bei Zugstraßen im Normalfall nicht möglich sein darf.

Mit der Einführung von ETCS wird eine weitere Dimension der Klassifizierung von Bewegungen in das System Eisenbahn eingebracht: die unterschiedlichen Betriebsarten, in denen sich die OBU befinden kann, siehe Abschnitt 3.1.2 auf Seite 26. Je nach aktiver Betriebsart sind unterschiedliche System- und Überwachungsfunktionen auf dem Fahrzeug aktiv. Durch den bei ETCS Level 1 nicht vorhandenen Rückkanal vom Fahrzeug zur Infrastruktur kann die Infrastruktur systembedingt keine Kenntnis davon erlangen, in welcher Betriebsart ein Fahrzeug gerade agiert. Aus diesem Grund müssen alle möglichen Szenarien bei der Planung und Projektierung der Ausrüstung berücksichtigt und bedarfsweise passende Mitigationsstrategien entwickelt und implementiert werden.

Als komplexitätstreibendes Merkmal ist zu berücksichtigen, dass eine Eins-zu-Eins-Zuweisung von ETCS-Betriebsart zu Fahrzeugbewegung weder technisch möglich, noch betrieblich sinnvoll ist. Sowohl eine Zugfahrt als auch eine Rangierfahrt können in Abhängigkeit der betrieblichen Erfordernisse und der technischen Ausrüstung in unterschiedlichen Betriebsarten verkehren. Andersherum kann dieselbe Betriebsart sowohl bei einer Zugfahrt als auch bei einer Rangierfahrt angewendet werden.

Die Wahl des aktuellen Levels und der aktuellen Betriebsart geschieht teilweise manuell, teilweise automatisch. Wo eine manuelle Wahl möglich oder notwendig ist, müssen eindeutige betriebliche Regeln bestehen. Die Infrastruktur kann die korrekte Wahl sowohl örtlich als auch systemisch nicht vollständig und dauerhaft überwachen.

Bei jeglichem Betrieb im ETCS Level 1 ist es notwendig festzuhalten, dass die Betriebsart SR im Regelbetrieb genutzt werden muss, und zwar planmäßig und regelmäßig. Nämlich immer dann, wenn ein Fahrzeug keine gültige MA besitzt, an einer vorausliegenden BG aber eine aufnehmen soll. Dass keine gültige MA vorhanden ist, kann das Resultat einer „Start of Mission Procedure“ nach dem Aufrüsten oder Wenden sein, nach notwendigen Fahrten in der Rückfallebene oder in anderen, niedrigeren Betriebsarten sein. Weiterhin tritt die Betriebsart SR aber auch weiterhin bei Fahrten in der Rückfallebene unter Sicherheitsverantwortung der Tf auf.

6.1.1 Zugfahrten

Zugfahrten werden im Regelbetrieb grundsätzlich in der Betriebsart FS durchgeführt bzw. dieser angestrebt. In einigen Betriebssituationen kommt die Betriebsart OS zum Einsatz. In beiden Fällen benötigt das Fahrzeug neben einer gültigen MA weiterhin mindestens ein Gradientenprofil und ein statisches Geschwindigkeitsprofil, welche mindestens die gesamte Länge der MA zuzüglich OL und/oder DP bis zur SvL umfassen müssen. Für die Vollständigkeit und Korrektheit dieser Daten ist alleine das EIU verantwortlich. Die örtlich zulässigen Geschwindigkeiten werden mit dem SSP abgebildet, die Geschwindigkeit der MA *V_MAIN* wird auf einen neutralen Wert (z. B. 160 km/h) gesetzt.

Aus der Kilometrierung entlang der Streckenachse unter Berücksichtigung von Kilometersprüngen, Streckenwechseln, etc. wird die Länge der MA berechnet. Die MA beginnt dabei am Referenzort der übertragenden BG (dieser liegt üblicherweise wenige Meter *vor* dem zugehörigen Signal) und endet am Zielsignal. Umfasst eine MA mehrere Fahrstraßen, so ergibt sich ihre Länge aus der Summe der Fahrstraßen zuzüglich des Abstands zwischen übertragender BG und Startsignal sowie des Abstands vom Zielsignal bis zur maßgebenden SvL. Jede Fahrstraße wird dabei in ETCS als eine *Section* abgebildet.

Der Gefahrpunktabstand zur Bestimmung von *D_DP* ergibt sich aus der vorhandenen baulichen Distanz zwischen dem projektierten EOA (in der Regel ist dies der Standort des Zielsignals) und dem maßgebenden Schutzpunkt. Wenn ein Durchrutschweg vorhanden ist, so wird dessen Länge als *D_OL* in der Definition der MA aufgenommen. Sollen Wahldurchrutschwege berücksichtigt werden, ist für jeden dieser eine separate MA zu projektieren. Bei der Nutzung dezentraler LEU ohne ergänzende Fahrweginformationen können ggf. nicht alle Durchrutschwege anhand des Signalbildes unterschieden werden, sodass je Signalbild der jeweils restriktivste Durchrutschweg anzunehmen ist oder ergänzende Weichenlagensensoren vorzusehen sind. Im Bestand und bei Doppelausrüstung sollte eine Begrenzung von *D_DP* und *D_OL* nur vorgenommen werden, um das Springen der Bremskurven zu minimieren, das bei einer Aufwertung von einem EOA zu einem Geschwindigkeitswechsel nach unten auftreten kann. Bei umfassenden Um- und Neubauten sowie beim Betrieb ohne Doppelausrüstung („ETCS only“) können die Werte reduziert werden. In vielen Fällen bringen Werte oberhalb von circa 70 m bis 100 m nur noch marginale Verbesserungen in den Bremskurven. Damit ist es möglich, bspw. vorhandene Fahrstraßenausschlüsse aufzulösen oder Bahnhöfe baulich kompakter zu gestalten.

Die Spezifikationen ermöglichen, jede *Section* einer MA mit einem Timer zu belegen, nach dessen Ablauf diese und alle weiteren *Sections* nicht mehr verfügbar sind und die MA entsprechend gekürzt wird. Diese Funktion ist für die deutschen Anwendungsfälle nicht relevant. Angewendet werden kann ein Timer jedoch, um das zeitgesteuerte Auflösen des Durchrutschweges auch in ETCS abzubilden. Ist dieser sogenannte *Overlap Timer* abgelaufen, wird der zugehörige OL inklusive seiner RS nicht mehr berücksichtigt, sondern es steht ausschließlich der DP mit seiner RS zur Verfügung. Letzterer ist durch die zuvor aufgestellten Regeln gleich oder restriktiver. Da eine korrekte Synchronisation zwischen Stellwerk und Fahrzeug durch

unterschiedliche Arten, den Timer zu starten, nicht vollständig gewährleistet wird, und durch die Stellwerksprojektierung bereits ein ausreichendes Sicherheitsniveau erreicht wird, sollte lediglich eine vereinfachte Variante hiervon in ETCS abgebildet werden. In den Fällen, in denen OL und DP unterschiedlich große Werte annehmen bzw. deren RS sich unterscheiden, wird eine *Overlap Timer Start Location* unmittelbar nach dem zurückliegenden Signal definiert, wobei der zugehörige Timer eine unendlich lange Gültigkeit erhält. Dies bewirkt, dass die OBU bei einem Halt nach dem Starten des Timers den OL als nicht mehr verfügbar ansieht und entsprechend eine restriktivere Überwachung wirksam wird.

Die nach der Infrastruktur örtlich zulässigen Geschwindigkeiten werden im Geschwindigkeitsprofil (SSP) des Pakets 27 abgebildet. Dieses enthält dem Namen nach alle Geschwindigkeitswechsel bei statischer Betrachtung und kann in Schritten von 5 km/h projektiert werden. Dabei muss es mindestens die Länge der zugehörigen MA inklusive DP bzw. OL umfassen. Die Projektierung ist hierbei unabhängig von etwaigen Gefahrpunktabständen oder Durchrutschweglängen. ETCS erlaubt die Definition unterschiedlicher SSP für unterschiedliche Überhöhungsfehlbeträge. Aufgrund der Signifikanz der enthaltenen Informationen auf die Sicherheit des Bahnbetriebs muss stets gewährleistet sein, dass ein zutreffendes SSP übertragen wird. Dieses kann im Zweifel restriktiver sein als notwendig, z. B. bei der Anwendung von *Repositioning*. Werden zentrale LEU oder dezentrale LEU mit Fahrweginformationen eingesetzt, sollten fahrwegspezifische SSP angestrebt werden, da sie betriebliche Vorteile bieten können. Ergeben sich aus den Infrastrukturgeschwindigkeiten kurze, nicht ausfahrbare Geschwindigkeitserhöhungen (bspw. mit Längen unterhalb der üblicherweise verkehrenden Zuglänge), so können diese im SSP geglättet werden. Dies wirkt sich auch positiv auf die Datenmenge aus. Eine Betrachtung der tatsächlichen Fahrbarkeit projektierter Geschwindigkeitsprofile wird in Abschnitt 5.4 auf Seite 102 vorgenommen.

Das Gradientenprofil des Pakets 21 bildet die Neigungen der befahrenen Infrastruktur ab und besitzt einen wesentlichen Einfluss auf die Berechnung der Bremskurven. Im Grundsatz wird für jedes Gleis ein zutreffendes Gradientenprofil erstellt. Verlaufen Gleise parallel und mit den gleichen Neigungen bzw. auf demselben Planum, so kann ein Gradientenprofil für alle diese Gleise genutzt werden. Systembedingt können in ETCS Neigungen mit einer maximalen Genauigkeit von 1 ‰ projektiert werden, sodass in jedem Fall eine Rundung stattfinden muss. Die Rundung muss immer auf die sichere Seite erfolgen, also in Richtung kleinerer Steigungen und größerer Gefälle. Zur Erstellung der Gradientenprofile werden üblicherweise die Daten der Soll-Trassierung oder von Vermessungen genutzt. Größere Rundungen sind möglich und zweckmäßig, um die Datenmenge zu reduzieren. Dabei kann auch zwischen Infrastrukturbereichen unterschieden und passfähige Rundungen vorgenommen werden. Je größer der Betrag der vorhandenen Neigung ist, desto geringer sollte die Rundung ausfallen, um negative Effekte dieser auf die durch ETCS zugelassenen Geschwindigkeiten zu minimieren. Gleiches gilt im Annäherungsbereich von Hauptsignalen und vor Orten mit auftretenden Bremskurven wie technisch gesicherten BÜ und Geschwindigkeitswechseln.

Sollte an einer BG die Balisenkapazität nicht ausreichen, um das vollständige, benötigte Gradientenprofil zu übertragen, kann dieses aufgeteilt werden. Dazu wird am Ausgangspunkt

die Gradiente mit der gewünschten Genauigkeit projektiert, soweit es die Balisenkapazität zulässt. Der letzte Neigungswechsel enthält dann die ungünstigste Neigung bis zum Ende der zugehörigen MA. An einer späteren BG, welche ungesteuert sein kann und auch aus nur einer Einzelbalise bestehen kann, erfolgt ein „Update“, indem ein Paket 21 mit dem weiteren Gradientenprofil der gewünschten Genauigkeit übertragen wird. Diese BG sollte zur Vermeidung unnötiger Bremseinsätze und betrieblicher Einschränkungen mindestens im Abstand des längsten, üblicherweise vorkommenden IP vor dem letzten Neigungswechsel des ersten Pakets 21 installiert sein.

6.1.2 Flügeln

Das Flügeln von Zügen beinhaltet die Zugvereinigung (Stärken) und die Zugteilung (Schwächen) von mit Reisenden besetzten Zugteilen. Bei der Zugteilung wird ein einfahrender Zug in zwei oder mehr Zugteile aufgetrennt, welche nacheinander wieder abfahren. Bei der Zugvereinigung werden zwei oder mehr nacheinander einfahrende Zugteile gekuppelt und setzen die Fahrt als ein Zug gemeinsam fort. Besonders häufig ist dieser Betriebsfall im SPNV anzutreffen, sodass er eine besondere Relevanz für mögliche Anwendungsfälle von ETCS Level 1 FS besitzt.

Für die Zugteilung wird keine zusätzliche ETCS-Ausrüstung oder gesonderte Projektierung benötigt. Die Sicherung erfolgt durch die betrieblichen Regeln für „Mehrere Züge stehen in einem Gleis zur Abfahrt bereit“, z. B. gemäß Ril 408.x331 [191, 192].

Für die Zugvereinigung stehen aktuell drei technische Lösungen zur Verfügung:

1. Zugdeckungssignal,
2. Zwischensignal,
3. Kuppelfahrstraße.

Beim Zugdeckungssignal wird der erste Zugteil von einem Halt zeigenden Zugdeckungssignal gedeckt, welches das Zielsignal für die Einfahrt des zweiten Zuges darstellt. Für die Einfahrt des Zuges besteht bei signalgeführten Zügen derzeit eine deutliche Geschwindigkeitsrestriktion (in der Regel auf nur 20 km/h), da kein Durchrutschweg vorhanden ist. ETCS-geführten Zügen kann durch die überwachten sicheren Bremskurven eine höhere Geschwindigkeit erlaubt werden. Die Einfahrt erfolgt mittels einer regulären MA. Die Balisengruppe des Zugdeckungssignals überträgt bei Halt dieselben Informationen wie ein Halt zeigendes Sperrsignal und verbietet damit die Vorbeifahrt jeglicher Fahrten. Zum Kuppeln wird das Zugdeckungssignal mit Kennlicht betrieblich abgeschaltet. An der BG liegt dann lediglich ein Leertelegramm an, welches außer der Balisenheader und dem Abschlusspaket 255 keine weiteren Pakete enthält. Damit ist sie auch für die ETCS-OBU betrieblich nicht relevant. Der zweite Zugteil wird in der Betriebsart SH, welcher zuvor manuell durch den Tf gewählt wurde, an den vorderen Zugteil herangefahren.

Bei einem Zwischensignal ist der betriebliche Ablauf ähnlich zu einem Zugdeckungssignal. Auch hier kann für den zweiten einfahrenden Zug eine deutliche Geschwindigkeitsbeschrän-

kung signalisiert sein, welche unter ETCS angehoben werden könnte. Zum Kuppeln zeigt das Zwischensignal Kennlicht oder Hp 0 + Sh 1. Bei Kennlicht überträgt die Signal-BG ein Leertelegramm, bei Hp 0 + Sh 1 eine Halt-MA, ein Verbot der Vorbeifahrt in der Betriebsart SR (Paket 137) sowie die Erlaubnis zur Vorbeifahrt in der Betriebsart SH. Dementsprechend wird die Kuppelfahrt analog der ersten Lösung in der Betriebsart SH durchgeführt, welcher manuell zu wählen ist. Wird im Betrieb das Zwischensignal mit Kennlicht für andere Zwecke als zum Kuppeln betrieblich abgeschaltet, so überträgt die zugehörige Signal-BG auch hier ein Leertelegramm.

Die Vorzugsvariante im Sinne einer reduzierten Infrastrukturausstattung mit gleichzeitig hoher betrieblicher Flexibilität bietet die Kuppelfahrstraße, vgl. auch Barth et al. [6] für die Anwendung im DKS unter Level 2. Hierfür wird keine separate Infrastruktur benötigt, auch eine Unterteilung des Bahnsteiggleises in separate Abschnitte oder Gleisfreimeldeabschnitte ist nicht notwendig. Stattdessen muss das Stellwerk die Möglichkeit bieten, Zugstraßen in besetzte oder teilbesetzte Gleise einzustellen. Wird eine solche Fahrstraße eingestellt, wird am zurückliegenden Hauptsignal eine reguläre MA bis zum folgenden Hauptsignal hinter dem Bahnsteigende vergeben. In einem gewissen Abstand vor der erwarteten bzw. frühest möglichen Kuppelstelle wird mit einem *Mode Profile* (Paket 80) die Betriebsart OS kommandiert, was durch den Tf quittiert werden muss und die Verantwortung für die langsame und sichere Annäherung an den bereits wartenden Zugteil auf den Tf verlagert. Damit einhergehend sollte nur eine geringe Geschwindigkeit von z. B. 20 km/h ab dem Betriebsartenwechsel zugelassen werden. Die genauen Orte und Geschwindigkeiten sind aufgrund eines Sicherheitsnachweises sowie anhand der Örtlichkeiten festzulegen. Je genauer die Position des ersten Zugteils bekannt ist, desto kürzer kann der Bereich der Bewegung in der Betriebsart OS ausfallen. Unter Nutzung vorhandener Gleisfreimeldeabschnitte ist es denkbar, dass beides dynamisch durch das Stellwerk aus vordefinierten Szenarien ausgewählt wird. Damit kann eine deutliche Beschleunigung des Betriebs beim Stärken erreicht werden, bei gleichzeitiger Reduktion der notwendigen Infrastrukturausstattung und bei mindestens gleichem Sicherheitsniveau.

6.1.3 Rangierfahrten

Rangieren ist definitionsgemäß das Bewegen von Fahrzeugen, solange es keine Zugfahrt ist. Rangieren im Sinne der Zusammenstellung von Zügen mit wechselnden Zugeigenschaften und Richtungswechseln wird in ETCS in der dafür vorgesehenen Betriebsart SH durchgeführt.

Die Herausforderung beim Rangieren im ETCS Level 2 ohne ortsfeste Signalisierung haben Witschorke et al. [139] auch anhand der Lösungsansätze europäischer Nachbarn dargelegt. Im Level 1 bestehen solche technisch und betrieblich komplexen Fragestellungen im Grunde nicht, da immer eine rudimentäre Signalisierung benötigt wird. Zudem ist es auch denkbar, im Level 1 zu rangieren, ohne dass die Infrastruktur durchgehend entsprechend mit BG ausgerüstet ist. Die Sicherheit liegt dann im Betriebsverfahren „Rangieren“. Zum Schutz von Zugfahrten können an den Schnittstellen technische Einrichtungen in Form von BG notwendig sein, sofern überhaupt mit aktiver Zugbeeinflussung rangiert wird. Dies legt jedes

EIU selbst fest, z. T. existieren auch Regeln in Abhängigkeit der voraussichtlichen Dauer des Rangierens. Prinzipbedingt können diese jedoch bei geschobenen Rangierfahrten erst dann wirken, wenn das Tfz mit aktiver OBU diese überquert hat.

Andere Betriebsarten können nach den betrieblichen Erfordernissen ebenso beim Rangieren zur Anwendung kommen. Gerade für Bereitstellungsfahrten von Reisezügen zwischen Abstellung und Bahnsteig ohne Richtungswechsel ist die Betriebsart SR prädestiniert. Damit ist es möglich, die Zugdaten bereits bei der Zugvorbereitung vollständig einzugeben und zu bestätigen, sodass am Bahnsteig außer dem Einstieg der Reisenden keine Handlungen mehr vorgenommen werden müssen und daher eine unmittelbare Abfahrt und Aufnahme in die Betriebsart FS am nächsten Hauptsignal möglich ist. Zur Anwendung der Betriebsart SR bei Rangierfahrten ist die Projektierung der Balisentelegramme anzupassen, sodass auch bei eingestellter Zugstraße solche Bewegungen an Sperrsignalen vorbeifahren dürfen.

Auf Rangierstraßen mit Sicherung auf dem Niveau einer Zugstraße ist eine Fahrt in der Betriebsart OS denkbar, sofern der Systemverbund aus Stellwerk und streckenseitigem ETCS die dafür notwendige MA mit *Mode Profile* vergeben kann.

6.1.4 Anschlussstellen

Bei der Bedienung von Anschlussstelle (Anst) und Ausweichanschlussstelle (Awanst) unter ETCS ergeben sich durch die aktuelle Systemkonzeption bedingte Besonderheiten. Grundsätzlich sind die Fähigkeiten der zugrundeliegenden Stellwerkstechnik maßgebend für Art und Betrieb von ETCS. Sofern nicht anders angegeben, ist innerhalb des Anschlusses keine ETCS-Ausrüstung notwendig und es wird in der Betriebsart SH gefahren.

Erfolgt die Hinfahrt als gezogene Fahrt, so sollte die Betriebsart FS angestrebt werden. Dies bedingt die Vergabe einer MA am Ausfahrsignal des zurückliegenden Bahnhofs. Ist dies nicht möglich, kann auch die Betriebsart SR zur Anwendung kommen. Bei Vergabe einer MA endet diese im einfachsten Fall vor der Anschlussweiche, wo ein manueller Wechsel in die Betriebsart SH vorgenommen wird, bevor in den Anschluss eingefahren wird. Dies bedingt einen zwangsläufigen Halt vor dem Anschluss. Muss vor der Einfahrt ein Richtungswechsel auf dem Streckengleis vollzogen werden, muss die MA so weit vergeben werden, dass die gesamte Zuglänge die Anschlussweiche vollständig passiert haben kann. Ggf. ist eine zusätzliche Ortungsbalisengruppe notwendig. Erfolgt die Bedienung als geschobene Fahrt, muss zwangsläufig die Betriebsart SH gewählt werden, da die Betriebsarten FS, OS und SR keine geschobenen Garnituren bzw. Zuglänge vor dem besetzten Führerstand erlauben.

Kann der Anschluss als gezogene Fahrt ohne Richtungswechsel erreicht werden, ist auch die Vergabe einer MA bis in den Anschluss hinein möglich. Der Teil der MA bis zur Anschlussweiche wird in der Betriebsart FS durchgeführt, ab der Anschlussweiche wird nach örtlichen Verhältnissen eine *Mode Profile* für die Betriebsart OS oder SH vergeben, mit welchem in den Anschluss eingefahren werden soll. Ein Halt vor dem Anschluss ist aus Sicht des ETCS nicht notwendig. Soll ein solcher forciert werden bzw. ist er technisch notwendig, muss dies be-

trieblich geregelt werden. Eine quittierungspflichtige Textmeldung („Fahrt zum Anschluss <Bezeichnung>. Halt vor der Anschlussweiche!“) sowie eine Geschwindigkeitsbeschränkung vor der Anschlussweiche können hier unterstützend eingesetzt werden.

Bei der Ausfahrt aus dem Bahnhof kann an der BG des Ausfahrsignals eine Textmeldung mit dem Text „Fahrt zum Anschluss <Bezeichnung>“ vorgesehen werden, was insbesondere bei mehreren Anschlüssen am selben Streckengleis das Situationsbewusstsein verbessern kann. Diese Textmeldung sollte daher auch bis zum Erreichen des entsprechenden Anschlusses angezeigt werden und ist aufgrund des informativen Charakters nicht quittierungspflichtig.

Rückfahrten aus dem Anschluss sind ohne weitere Ausrüstung in den Betriebsarten SH und SR möglich. Um gezogene Rückfahrten in der Betriebsart FS mit höheren Geschwindigkeiten und umfangreicheren Überwachungsfunktionen zu ermöglichen, sind gesteuerte BG an der Anschlussgrenze notwendig. Diese können entweder direkt an das Stellwerk angeschlossen sein oder ihre Informationen aus der Lage der Weichen sowie ggf. vorhandener Schlüssel ableiten. Ist für die Rückfahrt bei der Ausfahrt aus dem Anschluss kein Richtungswechsel notwendig, ist eine gesteuerte BG im abzweigenden Strang der Anschlussweiche in Richtung Streckengleis ausreichend. Wird die Rückfahrt zugelassen, kann diese eine entsprechende, vollständige MA vergeben. Ist hingegen auf dem Streckengleis ein Richtungswechsel notwendig, muss diese BG im Streckengleis unmittelbar vor der Weichenspitze installiert sein. Die Nutzung dieser BG für andere Zwecke als die Anschlussbedienung ist möglich und abhängig von den Fähigkeiten des installierten Stellwerkssystems. Ist bei der Ausfahrt aus dem Anschluss auf dem Streckengleis ein Richtungswechsel notwendig, so müssen durch den Wechsel der Fahrtrichtung bzw. die Wahl der Betriebsart SR die Zugdaten neu eingegeben oder bestätigt werden. Dieser Zeitanteil ist bei der Planung von Anschlussbedienungen zu berücksichtigen.

Ist die Bedienung nur als Sperrfahrt möglich, so wird diese in der Betriebsart SH durchgeführt. Eine solche Ausrüstung sollte bei Neu- und Umbauten nicht mehr vorgesehen werden, da sie betrieblich nachteilig ggü. den anderen Lösungen ist. Bei jeglichen Bedienungen in den Betriebsarten SH und SR können die durch die NV erlaubten, maximalen Geschwindigkeiten ggü. den bestehenden betrieblichen Regeln reduziert sein. Daher sind Anschlussbedienungen insbesondere bei längeren Distanzen auf der Strecke in der Betriebsart FS vorzusehen. Alternativ könnte die Anpassung der NV explizit ausschließlich für Anschlussbedienungen sondiert werden.

Bei der Ausrüstung einer Anst analog einem Bahnhof oder einer Abzweigstelle kommen die regulären Planungsregeln zum Einsatz.

6.2 Rückfallebene

Als Rückfallebene wird ein technisches oder organisatorisches System bezeichnet, welches zur Anwendung gebracht wird, wenn das primäre System nicht verfügbar oder nicht funktionsfähig ist. In Bezug auf ETCS im Level 1 wird im Folgenden von der Rückfallebene gesprochen,

wenn eine Fahrt nicht wie vorgesehen durchgeführt werden kann. Beispielsweise kann die Fahrt nicht in der Betriebsart FS oder OS verkehren, da keine MA vorliegt. Dann stehen die Vollüberwachung und weitreichende Überwachungs- und weitere Systemfunktionen nicht zur Verfügung, sodass die Sicherheitsverantwortung nicht mehr vollständig im Systemverbund Stellwerk und ETCS liegen kann, sondern alternative technische wie organisatorische Mittel diese übernehmen. Auch der Mensch (in Form von Fdl und Tf) wird in die Sicherung der Fahrt einbezogen. Im Level 1 bedeutet eine Fahrt in der Rückfallebene häufig, dass die Betriebsart SR zu Anwendung kommt. In wenigen Fällen kann eine alternative Möglichkeit zur Vergabe der MA verfügbar sein, bspw. durch Hilfshandlungen, vgl. Milius et al. [84].

Die Betriebsart SR für Fahrten in der Rückfallebene wird in den meisten Fällen durch die *Override Procedure* (vgl. [147]) an einem EOA erreicht, wenn keine MA vergeben werden kann und diese mit einem schriftlichen Befehl überfahren werden muss. Eine weitere Möglichkeit ist das Wiederaufstarten nach einem *Trip*. Damit einher geht eine reduzierte, maximal zulässige Geschwindigkeit von häufig 40 km/h sowie eine stärkere Verantwortung des Tf.

Wird die Fahrt in der Rückfallebene an einem Hauptsignal als Fahrt mit besonderem Auftrag mit dem Signal Zs 1, Zs 8 oder Zs 7 zugelassen, kann ETCS Überwachungsfunktionen übernehmen. Der Umfang ergibt sich aus den Fähigkeiten des installierten Verbunds aus Stellwerk und ETCS-System.

Kommt das Signal Zs 1 zur Anwendung und ist der Fahrweg nach dem Signal, an dem Zs 1 gezeigt wird, bekannt, eindeutig oder wird *Repositioning* angewendet, so kann eine Ersatz-MA bis zum Folgesignal projektiert werden. Dies lässt eine Fahrt in der Betriebsart FS zu und kann mit einem speziellen, angepassten SSP kombiniert werden, sodass die betrieblichen Regeln auch technisch überwacht werden. Für das Signal Zs 8 sind die Regeln des Signals Zs 1 sinngemäß anzuwenden. Auf die Fahrt im Gegengleis kann mit einer Textmeldung hingewiesen werden, eine Quittierungspflicht ist hierbei nicht zwingend notwendig.

Unter den gleichen Voraussetzungen wie beim Signal Zs 1 kann auch beim Signal Zs 7 eine Ersatz-MA bis zum Folgesignal erstellt werden. Dies erlaubt jedoch eine Fahrt in der Betriebsart OS, sodass zusätzlich ein *Mode Profile* mit dem Paket 80 notwendig ist. Auch hier kann ein gesondertes SSP die sich ergebenden Restriktionen der zulässigen Geschwindigkeit abbilden und diese durch das Fahrzeug technisch überwacht werden.

In einigen Fällen ist es bei Fahrten mit besonderem Auftrag notwendig, auch über das folgende Hauptsignal hinweg auf Sicht zu fahren. Da die Ersatz-MA nur bis zum Folgesignal vergeben werden kann, ist hierfür eine zusätzliche Lösung notwendig. Die maximal zulässige Geschwindigkeit wird im relevanten Bereich mit einer TSR festgelegt, der Auftrag, weiterhin auf Sicht zu fahren, wird mit einer Textmeldung (wichtige Information aber nicht quittierungspflichtig) umgesetzt. Diese wird so lange angezeigt, wie auf Sicht zu fahren ist. In keinem Fall können betriebliche Regelungen zur Durchführung der ersten Fahrt mit besonderem Auftrag technisch überwacht werden. Weiterhin ist es stets möglich, Fahrten mit besonderem Auftrag ohne technische Unterstützung in der Betriebsart SR durchzuführen, nachdem ein entsprechender Befehl erteilt wurde. Auf die vorgestellten Projektierungsoptionen kann dann

verzichtet werden. Die Balisengruppen an den Hauptsignalen übertragen dann auch bei den Signalen Zs 1, Zs 8 und Zs 7 den regulären Haltbegriff und sind mit *Override* zu überfahren.

Da in der Rückfallebene keine Führerstandssignalisierung vorhanden ist und die Verantwortung einer sicheren Fahrt in großen Teilen beim Tf liegt, sind hierfür einige Teile der Außensignalisierung weiterhin notwendig. Dies beinhaltet Lf- und Zs-Signale, sofern sie eine zulässige Geschwindigkeit signalisieren, welche kleiner der örtlich zulässigen Geschwindigkeit in der Betriebsart SR sind. Für die Projektierung ist relevant, dass jegliche TSR zusätzlich mit einem Paket 141 eine maßgebende Neigung für Fahrten in der Betriebsart SR übertragen werden sowie mit TSR eine rudimentäre technische Überwachung technisch gesicherter BÜ realisiert wird, welche zum fraglichen Zeitpunkt als nicht ausreichend gesichert zu betrachten sind. Des Weiteren umfasst die weiterhin notwendige Außensignalisierung u. a. Pfeiftafeln vor BÜ und auch mindestens Vorsignaltafeln (wenn bei ETCS only die veränderlichen Vorsignale entfallen) sowie Pfeif- und Läutetafeln. An Bahnübergängen kann auf ÜS verzichtet werden, wenn stattdessen eine Textmeldung den Sicherungszustand für Fahrten in der Betriebsart SR anzeigt oder wenn betrieblich geregelt ist, dass in der Betriebsart SR jeglicher technisch gesicherter Bahnübergang als nicht ausreichend gesichert anzusehen ist.

7 Kapazitätswirkung

7.1 Grundlagen

Bei Kapazitätsbetrachtungen im Eisenbahnwesen ist es sinnvoll, das folgende Zitat aus dem UIC Leaflet 406 [219] im Sinn zu haben: „*Capacity as such does not exist. Railway infrastructure capacity depends on the way it is utilised*“. Übersetzt bedeutet dies, dass eine gegebene Eisenbahninfrastruktur keine ihr inhärente Kapazität besitzt, sondern sich die Kapazität in Abhängigkeit davon ändert, wie diese Infrastruktur konkret genutzt wird. Häufig wird vom Dreiklang „Infrastruktur – Fahrzeuge – Betrieb“ gesprochen. Jede einzelne Komponente kann durch Änderungen ihrer Eigenschaften einen positiven oder negativen Einfluss auf die Kapazität nehmen. Betrachtet man den Einfluss von Zugbeeinflussungs- und Zugsicherungssystemen, so sind meistens unmittelbar die Infrastruktur und auch die Fahrzeuge von Änderungen betroffen, sodass eine integrierte, systemische Betrachtung notwendig ist.

Aufgrund unterschiedlicher Anforderungen, Stärken und Schwächen wurden mit der Zeit vielfältige Verfahren und Methoden entwickelt, um die Kapazität von Eisenbahninfrastruktur oder Teilsystemen davon zu beschreiben und zu berechnen. Allgemein werden bei Eisenbahnbetriebswissenschaftliche Untersuchungen (EBWU) die folgenden Methoden unterschieden, siehe auch Bešinović und Goverde [8] und Nießen [93]:

- Konstruktion,
- Kompression,
- Analytik und
- Simulation.

Alle modernen, heute angewendeten Verfahren der Eisenbahnbetriebswissenschaft fußen auf dem sogenannten Sperrzeitenmodell, welches die Belegung der Eisenbahninfrastruktur durch eine Fahrt in zeitlicher und räumlicher Dimension beschreibt. Dieses wurde entwickelt u. a. durch Müller [90] und Happel [52, 53], welcher es in der heute bekannten Form zur Anwendungsreife brachte. Einen Überblick über Grundlagen und Anwendung des Sperrzeitenmodells gibt Pachl [95]. Vor der Anwendung des Sperrzeitenmodells muss selbstverständlich die Zeit-Weg-Linie der Züge unter Berücksichtigung der Fahrdynamik möglichst exakt bestimmt werden, vgl. Kache [60].

Mit der Kenntnis über den Kapazitätsverbrauch durch die Sperrzeiten der Zugfahrten kann mit der konstruktiven Methode ein konfliktfreier Fahrplan erstellt werden. Aus diesem lassen sich für ein konkretes Betriebsprogramm Schlüsse ziehen, ob die geplanten Fahrten auch tatsächlich konfliktfrei konstruierbar sind, ob ggf. geforderte Pufferzeiten zwischen den einzelnen Fahrten eingehalten sind und ob sogar noch weitere Fahrten regelkonform eingeplant werden können. Allgemeingültige Qualitätsmaßstäbe können daraus nicht abgeleitet werden, ebenso

wenig können die Aussagen auf Varianten des Fahrplans oder der Infrastruktur übertragen werden.

Mit der Kompressionsmethode existiert ein einfach anzuwendendes Werkzeug, um die Kapazitätsnutzung eines konkreten Fahrplans zu bestimmen und mit angenäherten Grenzwerten eine Vergleichbarkeit herzustellen. Die Methode beruht darauf, die Sperrzeitentreppen der einzelnen Fahrten dichtest möglich aneinander zu schieben und daraus den sogenannten „verketteten Belegungsgrad“ abzuleiten. Heute wird sie in den meisten Fällen nach dem UIC Leaflet 406 [219] durchgeführt.

Im Gegensatz zur Konstruktion oder Kompression nutzen die analytischen Methoden mathematische Warteschlangenmodelle zur Modellierung des Eisenbahnsystems. Das Sperrzeitenmodell fließt hier in Form der Mindestzugfolgezeiten als z. B. Bedienzeiten ein. Mit der Analytik ist es möglich, ohne konkreten Fahrplan diverse Kenngrößen als Erwartungswerte abzuleiten. Dies sind beispielsweise die erwarteten Wartezeiten im Betrieb, welche von den Kundinnen und Kunden letztendlich als Verspätungen wahrgenommen werden. In Deutschland hat es sich etabliert, für die analytische Berechnung von Eisenbahnstrecken das von Schwanhäußer [112, 113] entwickelte Formelwerk „STRELE-Formel“ anzuwenden. Mit diesem können die erwarteten Wartezeiten im Betrieb (Folgeverspätungen) berechnet und mit einem definierten Qualitätsmaßstab (zulässiger *Level of Service*) in Form von zulässigen Wartezeiten verglichen werden, woraus sich der Qualitätsfaktor q_0 ergibt. Aus der analytischen Berechnung erhält man die Nennleistung, welche bei einem Qualitätsfaktor $q_0 = 1,0$ erreicht ist. Ril 405.0102 [184] definiert: Die „Nennleistung als Kenngröße der praktischen infrastrukturbezogenen Leistungsfähigkeit entspricht der Anzahl von Zugtrassen je Untersuchungszeitraum, die auf der zu Grunde gelegten Infrastruktur, bei vorgegebener Struktur des Betriebsprogramms während des Betriebsablaufes mit einer definierten optimalen Qualität verarbeitbar sind“. Dieser Qualitätsmaßstab für Strecken ist heute in der Ril 405.0101 und Ril 405.0104 [183, 186] festgeschrieben und gliedert sich in vier Bereiche:

1. „Premium“: unwirtschaftliche Auslastung, $q_0 < 0,5$;
2. „optimal“: optimale Auslastung, $0,5 \leq q_0 \leq 1,2$;
3. „risikobehaftet“: sehr hohe Auslastung, $1,2 < q_0 \leq 1,5$;
4. „mangelhaft“: zu hohe Auslastung, $q_0 > 1,5$.

Zuletzt kann mit der simulativen Methode sowohl der Prozess der Fahrplanerstellung als auch der Betriebsdurchführung nachgebildet werden. Dabei wird die Konflikterkennung und Konfliktlösung in beiden Fällen von einem Algorithmus übernommen. Durch Mehrfachsimulationen lassen sich Kennwerte für bspw. eine Vielzahl an Fahrplanvarianten oder Betriebstagen ermitteln und so Aussagen mit breiter Gültigkeit ableiten.

Die Untersuchungen und Berechnungen in Abschnitt 7.3 auf der nächsten Seite und in Abschnitt 7.4 auf Seite 124 werden in enger Anlehnung an die Richtlinienfamilie 405 [214] als Stand der Technik für die Anwendung in Deutschland durchgeführt.

7.2 Vergleich von ETCS mit Bestandssystemen

Ein Vorteil von ETCS gegenüber dem bisherigen deutschen System PZB 90 mit drei fest definierten Zugarten und nur abschnittsweise kontinuierlicher Überwachung durch Überwachungsfunktionen liegt in der genauen Abbildung der örtlich zulässigen Geschwindigkeiten. Gerade vor größeren Geschwindigkeitswechseln auf eine niedrigere Geschwindigkeit, welche keine Geschwindigkeitsprüfabschnitte (GPA), sondern einzelne GM erhalten, entstehen unter PZB-Überwachung häufig Konstellationen, in denen systembedingt deutlich stärker heruntergebremst werden muss, als es die zulässige Geschwindigkeit erfordern würde. ETCS besitzt hier den Vorteil, dass die durch Trassierung und Signaltechnik zulässige Geschwindigkeit identisch an das Fahrzeug übermittelt und überwacht wird, sodass ein besseres Ausfahren der örtlich zulässigen Geschwindigkeiten möglich ist und sich damit positiv auf die Leistungsfähigkeit auswirken kann.

Neben den grundlegenden Eigenschaften der Leistungsfähigkeit von Eisenbahninfrastrukturen (siehe oben) kommt in diesem Themenfeld erschwerend hinzu, dass sowohl die Bestandssysteme als auch ETCS selbst eine Vielzahl an Varianten und Ausprägungen zeigen können, welche allgemeingültige Aussagen in vielen Fällen unmöglich machen. Zudem wird je nach EIU als primäres Ziel auch nicht die Steigerung der Leistungsfähigkeit, sondern die Erhöhung der Sicherheit als Ziel verfolgt. Daher müssen die technischen und betrieblichen Besonderheiten der einzelnen EIU sowie die Charakteristiken der Infrastruktur und des Betriebsprogramms im Einzelfall detailliert aufgenommen werden, um so belastbare Ergebnisse erlangen zu können. Zusätzlich ergaben und ergeben sich durch die fortschreitende Entwicklung je nach betrachteter SV abweichende Ergebnistendenzen, auch dies ist bei der Interpretation und Einordnung von Studienergebnissen zu berücksichtigen. Eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Verhältnisse kann im Detail dann nicht zulässig sein. Aus diesem Grund wurden in den letzten Jahrzehnten zahlreiche Studien durchgeführt, welche die Auswirkungen von ETCS auf den Eisenbahnbetrieb und die Leistungsfähigkeit oder Teilaspekte davon untersucht haben. Einige davon wurden bereits in Abschnitt 3.3.2 auf Seite 40 vorgestellt.

Die Infrastrukturdaten der in den folgenden Abschnitten durchgeführten Untersuchungen sowie die Ergebnisdateien sind soweit möglich öffentlich verfügbar, siehe Seite 170.

7.3 Kreuzungsbahnhof einer eingleisigen Regionalstrecke

7.3.1 Untersuchungsgegenstand

Als Erstes wird aufgrund des wahrscheinlichsten Einsatzgebietes von ETCS Level 1 FS in Deutschland eine generische eingleisige Strecke mit zweigleisigen Kreuzungsbahnhöfen betrachtet. Diese dient primär dem SPNV, gelegentlicher Güterverkehr ist möglich. In der Systematik der DB-Streckenstandards ist die Strecke ein Vertreter des Standards „P5/P6 / F3“ gemäß Ril 413.0301 [193]. Ziel dieser Untersuchung ist die Bestimmung der Fahrzeitdifferen-

zen unterschiedlicher Ausrüstungsvarianten. Eine schematische Darstellung der modellierten Infrastruktur zeigt Abbildung 7.1. Wie dort zu sehen ist, wurde die Strecke freigeschnitten von angrenzenden Betriebsstellen. Der Fokus liegt hier auf den Kreuzungsbahnhöfen bzw. auf der zwischen diesen liegenden Strecke als maßgebenden Abschnitt.



Abb. 7.1: Schematische Infrastruktur der modellierten eingleisigen Strecke mit Kreuzungsbahnhöfen. BG an Haupt- und Vorsignalen sind nicht dargestellt. Eigener Screenshot aus LUKS.

Infrastrukturell sind zwei identisch aufgebaute, zweigleisige Kreuzungsbahnhöfe vorhanden. Zwischen benachbarten Kreuzungsbahnhöfen wird eine Strecke von 15 km – gemessen zwischen Bahnhofsmitten – vorgesehen. Beidseits der Bahnhöfe ist modellhaft jeweils eine „halbe Strecke“ vorhanden, sodass die abgebildete Gesamtlänge 30 km beträgt. Damit ist sichergestellt, dass alle untersuchten Fahrten an den Grenzen des Untersuchungsraums im Modell jeweils ihre maximal zulässige Geschwindigkeit fahren können und Unterschiede in den Fahrzeiten alleine auf die Änderungen im Bereich der Kreuzungsbahnhöfe zurückzuführen sind. Die gesamte modellierte Infrastruktur wird als eben ohne Längsneigung angenommen. Die zulässigen Geschwindigkeiten in Abhängigkeit von den betrachteten Szenarien sind in Tabelle 7.1 auf Seite 120 dargestellt. Alle Weichen entsprechen nach Ril 800.0120 [199] der Bauform *EW-54-500-1:12-st*.

7.3.2 Zugfahrten

Als Referenzfahrzeug kommt auch hier der bereits aus Abschnitt 4.4.6 auf Seite 78 bekannte Dieseltriebzug des Typs „LINT 54“ zum Einsatz. Damit können für die ETCS-Szenarien auch die dort bestimmten optimalen Positionen der Infill-BG (siehe Tabelle 4.15 auf Seite 80) herangezogen werden, um die hiesige Ausrüstung abzuleiten.

Die Züge verkehren über die gesamte Infrastruktur. An den Grenzen des Betrachtungsraumes brechen sie mit der dort maximal zulässigen Geschwindigkeit ein bzw. aus. An beiden Bahnhöfen ist jeweils ein Verkehrshalt mit einer planmäßigen Haltezeit von 2,5 min zur Realisierung der Kreuzung unter Einhaltung angemessener Pufferzeiten zwischen den sich kreuzenden Zügen vorgesehen. Um in beiden Richtungen symmetrische Reisezeiten zu erreichen, wird der jeweils erste Bahnhof im durchgehenden Hauptgleis im geraden Strang der Weichen, der jeweils zweite im Überholgleis über abzweigende Weichen befahren.

7.3.3 Infrastrukturvarianten

Aufgrund der de facto Zweiteilung des deutschen Eisenbahnnetzes in EdB und NE wird auch hier entsprechend differenziert. Die Unterschiede spiegeln sich primär in der Dimensionierung der Durchrutschwege bzw. Gefahrpunktabstände sowie der Platzierung der PZB-GM 500 Hz wider. Darüber hinaus wird zur breiteren Abdeckung möglicher Szenarien differenziert in

der Streckengeschwindigkeit und dem Vorsignalabstand bei konventioneller LST. Für die NE-Variante sind die Vorgaben aus der FV-NE [221] sowie der VDV-Schrift 361 [225] berücksichtigt. Die Ausrüstung der EdB-Variante erfolgt nach den Richtlinienfamilien 413 und 819 [216, 217]. Haupt- und Vorsignale sind gemäß den Ril 819.0202 und 819.0203 vorgesehen [203, 204] mit den nominalen Vorsignalabständen. Die Ausrüstung mit den Komponenten der PZB wurde anhand der Ril 819.1210 [206] vorgenommen.

In beiden Fällen ergibt sich damit nach Ril 413.3102 [194] eine Gleisbruttolänge von 530 m und unter Abzug von jeweils 5 m für Signalsicht und ungenaues Halten eine Gleisnutzlänge von 520 m. Ein Streckschutzabschnitt nach Ril 819.0505 [205] ist nicht vorgesehen. Abbildung 7.2 zeigt einen Kreuzungsbahnhof mit allen Elementen für die Doppelausrüstung im Detail.

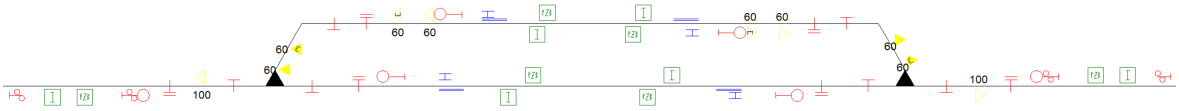


Abb. 7.2: Schematische Infrastruktur eines Kreuzungsbahnhofs mit Doppelausrüstung. Eigener Screenshot aus LUKS.

Es werden die folgenden vier ETCS-Szenarien im Vergleich zum Grundzustand mit PZB-Ausrüstung (Szenario 0) betrachtet:

1. Doppelausrüstung PZB 90 und ETCS Level 1 FS ohne Optimierungen,
2. Doppelausrüstung PZB 90 und ETCS Level 1 FS mit Geschwindigkeitswechsel an der Weichenspitze,
3. Doppelausrüstung PZB 90 und ETCS Level 1 FS mit Geschwindigkeitswechsel an der Weichenspitze und erhöhter Geschwindigkeit im Zweiggleis,
4. ETCS only mit Geschwindigkeitswechsel an der Weichenspitze, erhöhter Geschwindigkeit im Zweiggleis sowie reduzierten Durchrutschwegen und Gefahrpunktabständen.

Im Grundzustand richtet sich die LST nach den Erfordernissen der PZB. Bei der Doppelausrüstung ohne Optimierungen für ETCS werden alle Parameter identisch auf die ETCS-Projektierung umgelegt, sodass beispielsweise weiterhin die zulässige Geschwindigkeit bei abzweigender Weiche am vorherigen Hauptsignal erreicht sein muss. Bei der Platzierung der Infill-BG wird auf die vorhandenen Vorsignale Rücksicht genommen und an diesen jeweils eine der Infill-BG vorgesehen. In der ersten Optimierung wird der Geschwindigkeitswechsel an die Weichenspitze verlegt, sodass bei Einfahrt in das Gleis über den abzweigenden Strang der Weichen erst später gebremst werden muss. Die zweite Optimierung der Doppelausrüstung besteht darin, die mögliche Geschwindigkeit der Weichen im abzweigenden Strang auszunutzen. Die gewählte Bauform der Weichen erlaubt unter Einhaltung aller Nachweise aufgrund ihrer Trassierungsparameter eine Geschwindigkeit von ca. 68 km/h. Da die Projektierung des Geschwindigkeitsprofils von ETCS in 5 km/h-Inkrementen erfolgen kann, können ETCS-Fahrzeuge diese also mit 65 km/h befahren.

In der letzten Variante mit alleiniger ETCS-Ausrüstung können weitere Optimierungen genutzt werden wie z. B. eine Verkürzung der Durchrutschwege und Gefahrpunktabstände und

damit auch der Entwicklungslänge des Bahnhofs bei gleichbleibenden Gleisnutzlängen. Signalabstände werden ggf. gegenüber den anderen Szenarien reduziert. Dies führt bspw. dazu, dass sich in der EdB-Variante der Abstand der Einfahrsignale von 1470 m auf 950 m reduziert. Der Abstand der Weichenmitten verkleinert sich von ursprünglich 1020 m auf noch 760 m. In der NE-Variante bleibt dieser gleich, da die im Grundzustand vorhandenen, minimalen Durchrutschwege und Gefahrpunktabstände nicht weiter gekürzt werden, um negative Auswirkungen auf die ETCS-Bremskurven zu vermeiden.

Notwendige Infill-BG werden soweit möglich in allen ETCS-Szenarien an ihren optimalen Positionen vorgesehen. Basierend auf den Ergebnissen aus Abschnitt 4.4.6 auf Seite 78 und der Tatsache, dass die Zugfahrten in jedem der Kreuzungsbahnhöfe zum Fahrgastwechsel halten, werden in allen ETCS-Szenarien vor allen Hauptsignalen zwei Infill-BG vorgesehen. Dabei können Signal- und Infill-BG zusammenfallen. Die Positionen wurden, wenn notwendig, mit dem in Abschnitt 4.4 auf Seite 70 vorgestellten Optimierungsverfahren ermittelt. Tabelle 7.1 zeigt die Kernparameter der modellierten Szenarien und Regelwerksvarianten und Abbildung 7.3 auf der nächsten Seite eine bemaßte Infrastrukturskizze bei Doppelausrüstung[1].

Tab. 7.1: Parameter der Szenarien und Varianten des Kreuzungsbahnhofs.

Szenario	Parameter	EdB	NE
0	**Streckengeschwindigkeit**	100 km/h	80 km/h
	Vorsignalabstand	1000 m	700 m
	Geschwindigkeit Zweiggleis	60 km/h	
	Geschwindigkeitswechsel	Hauptsignal	
	Länge Durchrutschweg	200 m	50 m
	Länge Gefahrpunktabstand	200 m	50 m
	GM 500 Hz vor Hauptsignal	260 m	250 m
1	**Infill-BG vor Einfahrsignal**	323 m und 1000 m	251 m und 700 m
	Infill-BG vor Ausfahrsignal	323 m und 1000 m	251 m und 700 m
2	**Geschwindigkeit Zweiggleis ETCS**	60 km/h	
	Geschwindigkeitswechsel ETCS	Weichenspitze	
	Infill-BG zu Einfahrsignal	323 m und 1000 m	251 m und 700 m
	Infill-BG zu Ausfahrsignal	323 m und 1000 m	251 m und 700 m
3	**Geschwindigkeit Zweiggleis ETCS**	65 km/h	
	Geschwindigkeitswechsel ETCS	Weichenspitze	
	Infill-BG vor Einfahrsignal	323 m und 1000 m	251 m und 700 m
	Infill-BG vor Ausfahrsignal	323 m und 1000 m	251 m und 700 m
4	**Geschwindigkeit Zweiggleis**	65 km/h	
	Geschwindigkeitswechsel ETCS	Weichenspitze	
	Infill-BG vor Einfahrsignal	317 m und 968 m	256 m und 731 m
	Infill-BG vor Ausfahrsignal	323 m und 1000 m	251 m und 700 m
	Länge Durchrutschweg	70 m	*wie Szenario 0*
	Länge Gefahrpunktabstand	70 m	*wie Szenario 0*
	Vorsignalabstand	*nicht relevant*	
	GM 500 Hz vor Hauptsignal	*nicht relevant*	

[1] Eine größere, bemaßte Version ist im Anhang E auf Seite 181 enthalten.

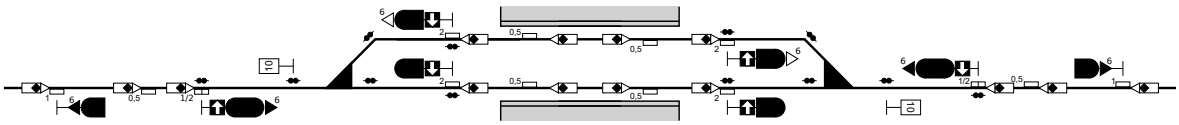


Abb. 7.3: Sicherungstechnisches Schema eines Kreuzungsbahnhofs mit Doppelausrüstung. Auf die Darstellung von Gebäuden, Ersatz- und Vorsichtsignalen, Vorsignalbaken und die Bezeichnung der Elemente wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet. Eigene Darstellung.

7.3.4 Fahrzeiten

Für alle Berechnungen wird an dieser Stelle das für EBWU anerkannte Softwareprodukt LUKS [280] in der Version 3.9.1 genutzt. Dafür werden Infrastruktur und Fahrzeug entsprechend der oben vorgestellten Parameter in das Programm eingegeben, welches daraufhin mikroskopisch eine Fahr- und Belegungszeitrechnung durchführt. Die Ergebnisse der Berechnungen werden mit einer Genauigkeit von 1 s und 1 m ausgegeben.

Zuerst werden die Fahrzeiten auf der modellierten Infrastruktur von 30 km Länge betrachtet. Diese sind als Regelfahrzeiten im Sinne der Ril 405.0103 [185] exklusive Haltezeiten zu verstehen. Die berechneten Fahrzeiten sind in Tabelle 7.2 aufgeführt.

Tab. 7.2: Fahrzeiten exklusive Haltezeiten über die modellierte Infrastruktur.

Szenario	**Fahrzeit** [min]	
	EdB (100 km/h)	**NE** (80 km/h)
0	20:28	24:28
1	20:37	24:40
2	20:32	24:38
3	20:26	24:36
4	20:24	24:36

Es zeigt sich, dass auf der Strecke mit einer maximal zulässigen Geschwindigkeit von 80 km/h (NE) keines der untersuchten Szenarien die Fahrzeit eines PZB-überwachten Zuges im Grundzustand erreichen kann. Die Zeitverluste liegen jedoch lediglich im Bereich von 8 s bis 12 s über den gesamten Betrachtungsraum. Je weiter die ETCS-Ausrüstung optimiert wird, desto geringer wird die Differenz ggü. dem Ausgangsszenario. Mit einer weiteren Optimierung der Bremskurven ließen sich aller Wahrscheinlichkeit nach wenige Sekunden zusätzlich gewinnen. Die Ergebnisse für die Szenarien 3 und 4 (also die optimierte Doppelausrüstung und die ETCS only-Szenario) sind hier identisch, da sich lediglich die Positionen der Infill-BG vor der Einfahrsignalen unterscheidet. Diese besitzen methodisch bedingt keinen Einfluss auf die Fahrzeit, da eine ungehinderte Fahrt unterstellt wird.

In der EdB-Variante erreichen die beiden letzten Szenarien Fahrzeiten, die 1 s bis 4 s unterhalb der Referenz liegen. Lediglich bei nicht optimierter, respektive marginal optimierter ETCS-Ausrüstung zeigt sich ein Fahrzeitverlust von 4 s bis 10 s.

Insgesamt sind in beiden Varianten und allen untersuchten Szenarien mit den hier unterstellten Parametern keine signifikanten Auswirkungen von ETCS auf die Fahrzeiten festzustellen.

Es stellten sich Differenzen im Bereich von −10 s bis 12 s ein, was auf einen Kreuzungsbahnhof heruntergebrochen eine Differenz zwischen −5 s bis 6 s bedeutet. Die intuitive Tendenz, mit einer Optimierung der Ausrüstung geringfügig kürzerer Fahrzeiten zu erreichen, stellt sich ein. Eine allgemeine Aussage, dass mit ETCS die Fahrzeiten in allen Fällen länger oder in allen Fällen kürzer werden, kann nicht getroffen werden. Vielmehr zeigt sich, dass die Unterschiede im Einzelfall mit konkreter Infrastruktur, initial projektierter Ausrüstung und dem voraussichtlichen Fahrzeugeinsatz zu untersuchen sind.

Da LUKS für PZB-überwachte Züge die Geschwindigkeitsüberwachungen als Sollbremskurven annimmt, sind die berechneten Fahrzeiten im Szenario 0 tendenziell sehr optimistisch und daher kürzer als im realen Betrieb realisierbar, insbesondere da im Gültigkeitsbereich der Ril 408 [190] diese Geschwindigkeitsüberwachungen „um mindestens 5 km/h unterfahren“ werden müssen, siehe Ril 483.0101 [196]. Eine Anpassung durch die Anwendenden von LUKS ist nicht möglich. Die in Tabelle 7.2 auf der vorherigen Seite gezeigten Fahrzeiten unter ETCS der Szenarien 1 bis 4 sind entlang der *Permitted Curve* berechnet. Dies bietet die bestmögliche Analogie und damit die beste Vergleichbarkeit. Die Fahrzeiten unter ETCS-Überwachung und Fahrzeitrechnung entlang der *Indication Curve* sind informativ in Tabelle E.1 auf Seite 180 enthalten. Sie sind 29 s bis 30 s in den EdB-Varianten und 25 s bis 26 s in den NE-Varianten verlängert gegenüber den Werten in Tabelle 7.2 auf der vorherigen Seite.

7.3.5 Mindestzugfolgezeiten

Nach den Fahrzeiten eines Zuges wird für dieselben Parameter die Mindestzugfolgezeit zwischen den beiden Kreuzungsbahnhöfen berechnet. Die Mindestzugfolgezeit wird basierend auf dem Sperrzeitenmodell (siehe oben) berechnet und ist in der Ril 405.0102 [184] definiert als „Zeit, in der bei technisch bedingter dichtest möglicher Zugfolge ein nachfolgender Zug einem vorausfahrenden auf dem gemeinsam benutzten Fahrweg behinderungsfrei folgen kann.“ Im vorliegenden Fall wird die Berechnung sowohl für eine Folgefahrt, also zwei aufeinander folgende Fahrten in dieselbe Richtung, als auch für eine Gegenfahrt, also zwei Fahrten in entgegengesetzte Richtungen durchgeführt. Die Gegenfahrt hat im realen Betrieb auf den meisten Strecken die größere Relevanz, da im üblichen Grundangebot im Takt von 60 min oder 30 min dies der vorherrschende Zugfolgefall ist. Folgefahrten treten eher bei Überlagerung mehrerer Linien mit abweichender Haltepolitik oder bei Verstärkerfahrten in den Hauptverkehrszeiten auf.

Die berechneten Mindestzugfolgezeiten enthält Tabelle 7.3 auf der nächsten Seite. Analog zu den vorher betrachteten Fahrzeiten zeigen auch die Mindestzugfolgezeiten in allen Fällen ähnliche Änderungen. In der EdB-Variante erreicht ausschließlich das Szenario 3 bessere Werte als der Ausgangszustand, während in der NE-Variante die beiden besten Szenarien 3 und 4 immer noch jeweils 1 s bis 2 s schlechter sind als der Vergleichsmaßstab. Bedingt durch die sehr geringen Unterschiede ist auch hier für die Praxis davon auszugehen, dass die konkreten Differenzen für jeden Fall gesondert zu untersuchen sind. Durch geringfügig andere Parameter scheint eine Verringerung der Mindestzugfolgezeit auch mit ETCS erreichbar. Zusammenfas-

send kann auch hier davon ausgegangen werden, dass alleine die Einführung eines optimierten ETCS selbst bei Doppelausrüstung auf den meisten eingleisigen Strecken keine signifikanten Auswirkungen auf Konstruierbarkeit bisheriger Fahrpläne haben wird.

Tab. 7.3: Mindestzugfolgezeiten zwischen zwei Kreuzungsbahnhöfen.

Szenario	**Mindestzugfolgezeit Gegenfahrt** [min]		**Mindestzugfolgezeit Folgefahrt** [min]	
	EdB (100 km/h)	**NE** (80 km/h)	**EdB** (100 km/h)	**NE** (80 km/h)
0	09:52	11:56	09:48	11:51
1	09:57	12:00	09:53	11:55
2	09:51	11:58	09:47	11:54
3	09:50	11:57	09:46	11:53
4	09:54	11:57	09:50	11:53

In allen Szenarien und beiden Varianten sind zudem die Mindestzugfolgezeiten der Folgefahrt um 4 s bis 5 s geringer als die der Gegenfahrt. Diese Differenzen zwischen Gegen- und Folgefahrt lassen sich mit dem Sperrzeitenmodell erklären. Erst wenn der Freimeldeabschnitt der Weiche nicht mehr durch den einfahrenden Zug belegt ist, kann die Fahrstraße für den ausfahrenden Zug eingestellt werden. Bei der Folgefahrt hingegen ist die Fahrzeit in der Blockstrecke der freien Strecke maßgebend für die Mindestzugfolgezeit, die Weiche besitzt hier keinen zusätzlichen negativen Einfluss. Die beobachtete Differenz zwischen 4 s und 5 s in einem Szenario lässt sich auf Rundungseffekte des Fahrzeitrechners sowie der Ausgabe zurückführen.

7.3.6 Zusammenfassung

Eine weitergehende EBWU der Auswirkungen auf die Nennleistung einer solchen eingleisigen Strecke mit Kreuzungsbahnhöfen wird nicht vorgenommen. Die berechneten Zeitunterschiede bewegen sich im meist einstelligen Sekundenbereich. Bezogen auf diesen Streckentyp signifikante Änderungen der Fahr- bzw. Mindestzugfolgezeiten stellen sich damit nicht ein, wie die vorherigen Berechnungen gezeigt haben. Rechnerisch mögen in einigen Szenarien ggü. dem Grundzustand zusätzlich eine sehr geringe Anzahl zusätzlicher Züge realisierbar sein, diese sind jedoch in den vorherrschenden Taktfahrplänen des SPNV nicht sinnvoll bzw. marktgerecht einzuplanen.

Auf einer betrieblich und infrastrukturell vergleichbaren, realen NE-Strecke wurden bei der Ein- und Ausfahrt in Kreuzungsbahnhöfe mit dem Werkzeug Fahrplanbearbeitungssystem (FBS) [276] Fahrzeitvorteile der ETCS-Züge im Vergleich zum Bestand mit PZB in Höhe von jeweils wenigen Sekunden ermittelt, vgl. Raths [101] und Raths et al. [102].

7.4 Zweigleisige Mischverkehrsstrecke

7.4.1 Untersuchungsgegenstand

Im Folgenden wird eine generische, zweigleisige Mischverkehrsstrecke betrachtet. Diese soll eine deutsche Strecke mit zugehörigem Betriebsprogramm abbilden, welche durch den dichten, inhomogenen Verkehr die höchste Leistungsanforderung an die LST stellt, aber noch nicht unter die TEN-Verordnung fällt und somit auch zukünftig mit ETCS Level 1 FS betrieben werden könnte. Aus diesem Grund wird die Streckengeschwindigkeit auf 160 km/h festgelegt.

Die Untersuchung baut inhaltlich u. a. auf einer Studie zum Einfluss von ETCS auf die Leistungsfähigkeit im Auftrag der UIC [128] auf, jedoch mit Anpassungen an die heutige Zeit, einem reduzierten Set an Varianten sowie einer veränderten Auswertemethode. Implizit enthalten sind alle Neuerungen der ETCS-Spezifikationen, wie z. B. das harmonisierte Bremskurvenmodell. Des Weiteren werden Festlegungen aus der Ril 413.0301 [193] genutzt, um eine idealtypische Strecke mit realitätsnahem Betriebsprogramm modellieren zu können. Zur Berechnung wird das anerkannte analytische Verfahren der Ermittlung der Streckenleistungsfähigkeit im Betrieb, die STRELE-Formel von Schwanhäußer [112], angewendet.

Ziel der Untersuchung ist es festzustellen, wie sich unter aktuellen Rahmenbedingungen die Leistungsfähigkeit einer solchen Strecke durch den Einsatz von ETCS ggü. dem angenommenen Status quo mit PZB verändert. Im Gegensatz zu anderen Studien wird hier der Fokus auf die Ausrüstung mit Level 1 FS gelegt und eine Level 2-Ausrüstung lediglich als weiterer Vergleichmaßstab hinzugefügt. Dabei wird die Ausrüstung und Projektierung anhand der in Kapitel 4 ab Seite 50 vorgestellten Regeln vorgenommen und die vorhandenen Potenziale von ETCS so weit wie möglich ausgenutzt, vor allem wenn hierfür keine zusätzliche streckenseitige Ausrüstung notwendig ist.

7.4.2 Infrastruktur

Die modellierte generische Mischverkehrsstrecke ist durchgehend zweigleisig ausgeführt und rund 100 km lang. An beiden Enden befinden sich große Knoten, in denen alle Züge des Personenverkehrs halten. Zwischen diesen sind im Abstand von jeweils 10 km in Summe neun Bahnhöfe für Halte des SPNV sowie teilweise mit Überholgleisen für den Schienengüterverkehr (SGV) angeordnet. Der Abstand der Bahnhöfe und Knoten bezieht sich jeweils auf die Betriebsstellenmitte. Eine schematische Streckenübersicht zeigt Abbildung 7.4.



Abb. 7.4: Schematische Infrastruktur der modellierten zweigleisigen Mischverkehrsstrecke. Eigene Darstellung.

Ein Bahnhof (bei Kilometer 40) wird als „kleiner Knoten“ bezeichnet. Hier könnten in der Realität untergeordnete, abzweigende Strecken beginnen oder enden, ohne dass zwischen

diesen und der modellierten Mischverkehrsstrecke ein regelmäßiger Übergang von Zugfahrten stattfinden würde. Tabelle 7.4 listet die wichtigsten Eigenschaften der Bahnhöfe auf. Das dritte Gleis der dreigleisigen Bahnhöfe liegt seitenrichtig für Richtung 1 bei den Kilometern 20 und 80 und seitenrichtig für Richtung 2 bei Kilometer 60. Damit besteht in Richtung 1 eine Möglichkeit mehr, einen Zug des SPNV zu überholen als in Richtung 2.

Tab. 7.4: Bahnhöfe der generischen Mischverkehrsstrecke.

	Knoten		**Bahnhof**	
	groß	**klein**	**viergleisig**	**dreigleisig**
Anzahl	2	1	5	3
Position(en) [km]	0; 100	40	10; 30; 50; 70; 90	20; 60; 80
Anzahl Gleise	4		4	4
Gleisbruttolängen	760 m		760 m	220 m bis 445 m
Gleisnutzlängen PV	420 m		210 m	
Gleisnutzlängen GV	740 m		740 m	—
Überholmöglichkeiten	beidseitig		beidseitig	einseitig
Schema	Abb. 7.5		Abb. 7.6	Abb. 7.7

An jedem Bahnhofskopf ist ein doppelter Gleiswechsel vorhanden, sodass alle Fahrbeziehungen uneingeschränkt möglich sind. Dabei sind die Weichen in einer „V-A-Konfiguration“ punktsymmetrisch angelegt, hinter den Einfahrsignalen des rechten Streckengleises wird die erste Weiche also stets stumpf befahren. Die Weichenverbindungen zwischen den durchgehenden Hauptgleisen sind abzweigend mit 100 km/h befahrbar, für alle übrigen Weichen sind im abzweigenden Strang 80 km/h zulässig. Eine Differenzierung der Weichengeschwindigkeiten nach Zugbeeinflussungssystem wird nicht angenommen. Die Strecke wird ohne Neigungen durchgehend als eben angenommen. Als Durchrutschweg hinter allen Ausfahrsignalen werden im Standard 200 m angesetzt, ebenso für die Gefahrpunktabstände hinter den Einfahrsignalen. Hinter den Blocksignalen zur Regelung der Zugfolge der freien Strecke wird als Gefahrpunktabstand ein Wert von 50 m vorgehalten.

Im Rahmen der Abbildung der Strecke in LUKS wurden die Knotenbahnhöfe als viergleisige Bahnhöfe ohne zusätzliche Strecken modelliert. Dies ist für die vorgesehenen Untersuchungen vollkommen ausreichend und schränkt die Aussagekraft der Ergebnisse nicht ein. Die Abbildungen 7.5 bis 7.7 auf Seiten 125–126 zeigen schematische Spurpläne eines Knotens sowie eines viergleisigen und eines dreigleisigen Bahnhofs. Detaillierte Darstellungen des in LUKS umgesetzten Infrastrukturmodells zeigen Abbildungen F.1 bis F.9 auf Seiten 184–186 im Anhang F.



Abb. 7.5: Schematischer Spurplan eines Knotens ohne LST. Eigene Darstellung.

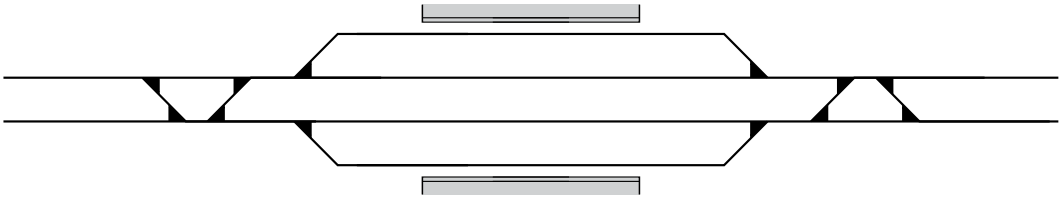


Abb. 7.6: Schematischer Spurplan eines viergleisigen Bahnhofs ohne LST. Eigene Darstellung.

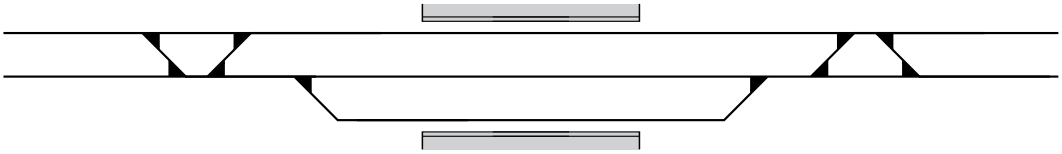


Abb. 7.7: Schematischer Spurplan eines dreigleisigen Bahnhofs ohne LST. Eigene Darstellung.

7.4.3 Betriebsprogramm und Modellzüge

Das Betriebsprogramm besteht für eine Mischverkehrsstrecke typisch aus den drei Verkehrsarten Fernverkehr (FV), NV und Güterverkehr (GV), wobei die beiden letzten jeweils in die Ausprägungen *schnell* und *langsam* unterteilt werden, um so eine Geschwindigkeitsspreizung sowie im Nahverkehr zusätzlich eine unterschiedliche Haltepolitik zu modellieren. Die Zugzahlen orientieren sich an einem alten Stand der Ril 413.0301 [193] sowie der UIC-Studie [128]. Während die Gesamtzugzahl mit 157 Zügen pro Tag und Richtung nur wenig über den beiden genannten Quellen liegt (beide gehen von 150 Zügen pro Tag und Richtung aus), wird im Folgenden eine Strecke modelliert, auf welcher der Nahverkehr gegenüber dem Fernverkehr deutlich überwiegt. Damit wird dem Umstand Rechnung getragen, dass Mischverkehrsstrecken mit hohen Zugzahlen im Fernverkehr eher Teil des TEN-Netzes sind und daher eine Ausrüstung mit ETCS Level 1 zukünftig nicht infrage kommt, vgl. Abschnitt 2.2.1 auf Seite 5. Das gesamte Betriebsprogramm in Form einer differenzierten Tagesganglinie ist in Abbildung 7.8 dargestellt.

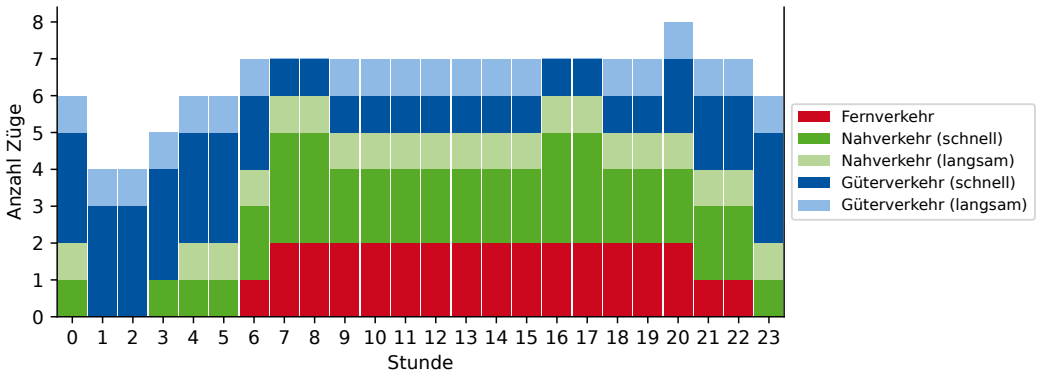


Abb. 7.8: Tagesganglinie einer Richtung der Mischverkehrsstrecke. Eigene Darstellung.

Ausgehend von den im Betriebsprogramm definierten Verkehrsarten werden in Anlehnung an [128] die in Tabelle 7.5 auf der nächsten Seite aufgelisteten fünf Modellzüge erstellt. Dort

sind auch ihre wesentlichen Eigenschaften aufgeführt, welche für die Fragestellung dieser Arbeit besonders relevant sind. Die erstellten Modellzüge bilden exemplarisch den Verkehr auf einer deutschen Mischverkehrsstrecke ab.

Tab. 7.5: Modellzüge zur Untersuchung der Streckenleistungsfähigkeit einer Mischverkehrsstrecke.

	FV	NV		GV	
		schnell	**langsam**	**schnell**	**langsam**
Zuggattung	ICE-W	DPN-D	RB	DGS	EZK
Triebfahrzeug	Velaro D	Desiro HC	TALENT 3	Vectron	Vectron Dual Mode
Baureihe	2x 80 5407	2x 80 0462	2x 80 8442	1x 80 6193	1x 80 2248
Länge	402 m	210 m	129 m	500 m	500 m
Höchstgeschwindigkeit	320 km/h	160 km/h	140 km/h	100 km/h	90 km/h
Masse	982 t	453 t	273 t	1250 t	1000 t
Bremsstellung	R+Wb	R+Mg	R+Mg	P	G
Bremshundertstel	220	190	180	80	80
PZB-Zugart	O	O	O	M	U
ETCS Bremsmodell	Gamma	Lambda	Lambda	Lambda	Lambda

Der Fernverkehr hält lediglich an den beiden Knotenbahnhöfen am Anfang und Ende der Strecke. Die Haltezeit beträgt dort 2 min, ebenso die Mindesthaltezeit. Beidseitig des Betrachtungsraumes bricht er mit der maximal zulässigen Geschwindigkeit ein bzw. aus. Der Nahverkehr beginnt und endet jeweils an den Knotenbahnhöfen an beiden Streckenenden mit einer Haltezeit von jeweils 5 min bei einer Mindesthaltezeit von 1 min. Zwischen den großen Knoten hält der langsame Nahverkehr an allen Bahnhöfen, der schnelle Nahverkehr nur an den fünf großen Bahnhöfen sowie dem kleinen Knoten. An allen Unterwegshalten betragen Haltezeit und Mindesthaltezeit des Nahverkehrs einheitlich 1 min. Für den Güterverkehr sind keine planmäßigen Halte vorgesehen. Er bricht wie auch der Fernverkehr beidseitig in den Betrachtungsraum ein und aus.

7.4.4 Berechnete Szenarien

Auf der zuvor vorgestellten Infrastruktur werden acht Szenarien berechnet. Diese ergeben sich aus der Kombination von drei Blocklängen und drei Zugbeeinflussungssystemen:

- PZB mit 3000 m und 1000 m Blocklänge,
- ETCS Level 1 FS mit 3000 m, 1000 m und 500 m Blocklänge,
- ETCS Level 2 mit 3000 m, 1000 m und 500 m Blocklänge.

Ein PZB-Szenario mit 500 m Blocklänge wird nicht berücksichtigt. Der nominelle, minimale Signalabstand für signalgeführte Züge beträgt 1000 m. Im Bereich hoch belasteter Stammstrecken und anderer S-Bahn-Strecken wurden mit dem „Halbregelabstand“ reguläre Signalabstände von 500 m realisiert [96]. Auf Mischverkehrsstrecken ist eine solche Ausrüstung jedoch nicht anzutreffen und daher nicht als realistischer Vergleichsmaßstab anzusehen.

In den ETCS-Varianten wird jeweils von einem fahrwegspezifischen SSP ausgegangen und die Geschwindigkeitswechsel an den Weichenbeginn gelegt. Ebenso ist eine Geschwindigkeits-

erhöhung in Richtung der Streckengleise unmittelbar nach Befahren der letzten abzweigenden Weiche möglich. In der PZB-Variante hingegen wird der reguläre Planungsfall abgebildet, dass die minimal zulässige Geschwindigkeit im Weichenbereich bereits am vorausliegenden Hauptsignal erreicht sein muss und eine Geschwindigkeitserhöhung erst nach dem Verlassen des anschließenden Weichenbereichs möglich ist.

Aufgrund der a priori festgelegten Distanz zwischen zwei Bahnhöfen von 10 km ergeben sich bei der Planung der Signalstandorte geringe Abweichungen gegenüber der in den Szenarien festgelegten Soll-Blocklänge. Insbesondere sind die Signalabstände im Bahnhofsbereich in den meisten Fällen aufgrund anderer Randbedingungen nur geringfügig anpassbar. Ausgehend von den fixen Standorten der Ein- und Ausfahrsignale und der sich daraus ergebenden Länge der Blockstrecke wurden in Abhängigkeit der Soll-Blocklänge folgende Vorgehen angewendet:

1. 3000 m Soll-Blocklänge: mittlerer Blockabschnitt 3000 m, die Restdistanz wird hälftig auf den jeweils davor und dahinter liegenden Blockabschnitt aufgeteilt;
2. 1000 m und 500 m Soll-Blocklänge: Aufteilung der Blockstrecke in möglichst viele, gleich große Abschnitte, wobei die Soll-Länge in Einzelfällen um nicht mehr als 5 % unterschritten werden darf.

Bei 500 m Blocklänge werden die Durchrutschwege hinter den Ausfahr- und Zwischensignalen und die Gefahrpunktabstände hinter den Einfahrsignalen gleichermaßen auf 70 m reduziert. In der Erstellung wurde darauf geachtet, für die Vergleichsszenarien zur PZB die Signalstandorte so festzulegen, dass diese auch für signalgeführte Züge richtlinienkonform sind. Eine Auswertung der realisierten Blocklängen zeigt Tabelle F.1 auf Seite 182 im Anhang.

Aufgrund der Streckenbelastung mit Mischverkehr unterschiedlicher Geschwindigkeiten und Fahrdynamiken wird in allen Level 1-Szenarien von drei Infill-BG ausgegangen. Vereinfachend werden zur Bestimmung der Infill-BG zwei Ausrüstungen entwickelt. Sie unterscheiden sich in der Distanz zwischen EOA und SvL. Diese entspricht in den Szenarien mit 3000 m und 1000 m Blocklänge 200 m und wird bei 500 m Blocklänge entsprechend der Szenariodefinition auf 50 m reduziert. Als Ausgangsgeschwindigkeit wird jeweils die Höchstgeschwindigkeit des Zuges, jedoch maximal die Streckengeschwindigkeit von 160 km/h für alle Hauptsignale angesetzt. Alle Berechnungen nutzen die aktuellen NV der DB InfraGO AG [21] und eine RS von 20 km/h. In einem ersten Schritt werden die IP unter Nutzung von [32] berechnet. Die auf ganze Meter aufgerundeten Ergebnisse enthält Tabelle 7.6. In den Abbildungen F.10 bis F.19 auf Seiten 187–191 im Anhang sind die vollständigen Bremskurven aller Modellzüge dargestellt.

Tab. 7.6: Berechnete Indication Points der Modellzüge.

	FV	**NV**		**GV**	
		schnell	**langsam**	**schnell**	**langsam**
Ausgangsgeschwindigkeit	160 km/h	160 km/h	140 km/h	100 km/h	90 km/h
IP (SvL 50 m hinter EOA)	1644 m	1671 m	1401 m	1527 m	1503 m
IP (SvL 200 m hinter EOA)	1576 m	1574 m	1258 m	1384 m	1360 m

Zur Berechnung der Leistungsfähigkeitskennwerte mit der STRELE-Formel [112] werden keine detaillierten Daten zu den Positionen aller Infill-BG benötigt, da bei der Ermittlung der Mindestzugfolgezeiten eine ungehinderte Fahrt unterstellt wird. Relevant für das zugrundeliegende Sperrzeitenmodell, mit dem die Mindestzugfolgezeiten bestimmt werden, ist jedoch die Kenntnis über den Beginn der Annäherungsfahrzeit. Dieser ergibt sich aus der Position derjenigen Infill-BG, welche in Fahrtrichtung unmittelbar vor dem IP des Zuges liegt. Auf Basis der Werte in Tabelle 7.6 auf der vorherigen Seite wird der Abstand der weitesten Infill-BG vor dem EOA für die Blocklängen 3000 m und 1000 m auf 1700 m festgelegt. Eine weitere BG zur Übertragung von Infill-Informationen befindet sich am Vorsignal 1000 m vor dem EOA sowie am EOA selbst. Die dritte Infill-BG unmittelbar vor dem EOA wird nicht modelliert. In den Szenarien mit 500 m langen Blockabschnitten werden abgesehen von den BG an den Hauptsignalen bzw. ETCS-Halttafeln jeweils 260 m davor Infill-BG vorgesehen. Damit wird für die Modellzüge eine gute Abdeckung erreicht. Systembedingte Latenzen des ETCS-Systems werden wie folgt berücksichtigt:

- Level 1: 1 s als Übertragungszeit Infill;
- Level 2: 8 s als MA-Übertragungszeit.

Zur Modellierung der in der Analytik benötigten Einbruchsverspätungen wird auf die Näherungswerte nach Ril 405.0204 [189] bei hoher Belastung der Zulaufstrecke zurückgegriffen. Diese sind auch in Tabelle F.2 auf Seite 182 im Anhang aufgeführt. Gemäß Ril 405.0201, 405.0204 und 405.0105 [187–189] wird die Untersuchung der Nennleistung in allen Szenarien für die folgenden Zeiträume durchgeführt:

- 0 h bis 24 h: gesamter Kalendertag;
- 6 h bis 22 h: Tageszeitraum;
- 22 h bis 6 h: Nachtzeitraum;
- 6 h bis 11 h: Morgenspitze;
- 18 h bis 23 h: Abendspitze.

7.4.5 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Berechnungen werden primär anhand des Tageszeitraums (6 h bis 22 h) vorgestellt. Im Anhang F ab Seite 182 sind die Werte auch für die anderen vier Untersuchungszeiträume vorhanden.

Grundlage aller nachfolgenden Leistungsfähigkeitsberechnungen sind die Mindestzugfolgezeiten. Diese werden für jeden der möglichen 25 Zugfolgefälle automatisch ermittelt und sind im Detail in den Matrizen der Mindestzugfolgezeiten im Anhang in Tabellen F.4 bis F.11 auf Seiten 192–193 enthalten. Aus diesen kann dann anhand der Wahrscheinlichkeiten für die einzelnen Zugfolgefälle (fahrplanunabhängig mit dem erweiterten Ganglinienverfahren ermittelt) eine mittlere Mindestzugfolgezeit über alle Zugfolgefälle oder auch nur über die gleichrangigen sowie die ungleichrangigen Zugfolgefälle ermittelt werden. Hier wird die mitt-

lere Mindestzugfolgezeit über alle Zugfolgefälle als erster Vergleichsmaßstab der berechneten Szenarien herangezogen, siehe Abbildung 7.9.

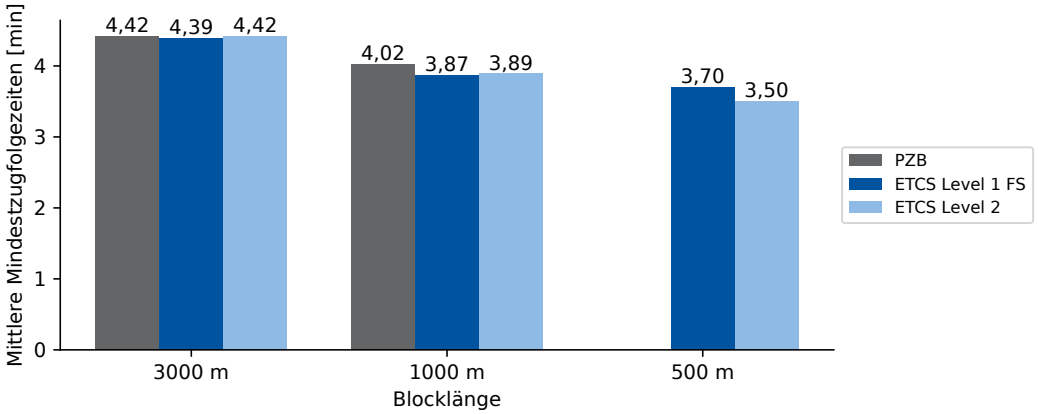


Abb. 7.9: Mittlere Mindestzugfolgezeiten [min] der Mischverkehrsstrecke für den Zeitraum 6 h bis 22 h. Eigene Darstellung.

Klar ersichtlich und intuitiv erwartet reduziert sich die mittlere Mindestzugfolgezeit mit Verkürzung der Blockabschnitte. Zwischen 3000 m und 1000 m beträgt die Reduktion 0,4 min bis 0,53 min, zwischen 1000 m und 500 m fällt sie mit 0,17 min bis 0,39 min geringer aus. Es besteht also ein abnehmender Grenznutzen, der sich aus dem Sperrzeitenmodell erklären lässt. Mit einer Verkürzung der Blockabschnitte reduziert sich die Fahrzeit der Züge im Block, die anderen Zeitanteile bleiben konstant und nehmen daher einen zunehmend ansteigenden Anteil der Sperrzeit ein. Des Weiteren können im Bahnhofsbereich die Haltezeiten maßgebend werden, sodass eine weitere Verkürzung der Blockabschnitte für einige Zugfolgefälle keine Reduktion der Mindestzugfolgezeit mehr bringt.

Die im Kontext dieser Arbeit relevanteren Ergebnisse sind jedoch die Unterschiede zwischen den untersuchten Zugbeeinflussungssystemen innerhalb derselben Blocklängen. Dabei ist zu beachten, dass im Vergleich nicht zwangsläufig derselbe Block oder derselbe Überholungsabschnitt maßgebend sein muss, sondern diese sich unterscheiden können. Unter den vorgestellten Randbedingungen und Parametern sind die ETCS-Varianten in keinem Fall schlechter als die PZB-Variante.

Mit Blick auf die einzelnen Zugfolgefälle zeigt sich erwartungsgemäß ein differenziertes Bild. Je nach Variante und verglichenen Zugbeeinflussungssystemen sind die Änderungen der Mindestzugfolgezeiten positiv oder negativ. Bei 3000 m Blöcken ist ETCS Level 1 FS im Vergleich zur PZB im Vorteil, wenn vor einer abzweigend befahrenen Weiche die Geschwindigkeit erst später reduziert werden kann oder wenn nach der letzten abzweigend befahrenen Weiche die Geschwindigkeit wieder früher erhöht werden kann. Nachteilig wirkt sich die vergrößerte Annäherungsfahrzeit aus, die sich durch einen größeren Abstand zwischen EOA und IP als zwischen Hauptsignal und Vorsignal ergibt. Im Level 2 wirken sich die längeren Latenzen aufgrund der Verarbeitung im RBC und der Funkübertragung negativ aus.

Bei der mit Bestandstechnik und Außensignalisierung im Mischverkehr kleinstmöglichen Blocklänge von 1000 m sind die grundsätzlichen Effekte wie vorher beschrieben selbstverständlich weiterhin vorhanden. Im Ergebnis allerdings zeigen allen voran die Zugfolgefälle „Güterverkehr – Güterverkehr“ und „Güterverkehr – Fernverkehr“ unter Level 1 FS ungünstigere Mindestzugfolgezeiten, während vor allem „Fernverkehr – Güterverkehr“ und „Nahverkehr – Güterverkehr“ deutlich reduzierte Mindestzugfolgezeiten aufweisen können.

Bei den sehr kurzen Blöcken von 500 m ist der maßgebende Block in vielen Fällen durch den Halt im Bahnhof (sofern im Laufweg des ersten Zuges vorhanden) definiert. Dies ergibt sich aus den z. T. zur freien Strecke geringfügig längeren Signalabständen und vor allem aus dem Halt selbst sowie den Zeitverlusten durch das Abbremsen und Beschleunigen. Level 2 ist hierbei mit Ausnahme der Zugfolgefälle „Güterverkehr – Nahverkehr“ und „Güterverkehr – Güterverkehr“ besser als Level 1. Dies liegt darin begründet, dass nach einem Halt keine Fahrt mit RS bis zur folgenden ETCS-Halttafel notwendig ist, sondern mit Vorliegen der MA aus dem Stand ohne Restriktionen der Zugbeeinflussung beschleunigt werden kann. Die Fahrt mit RS ist notwendig, da Untersuchungen der Leistungsfähigkeit im Regelfall eine sogenannte „Halteinfahrt“ annehmen. Das heißt, alle Fahrten, die vor einem Hauptsignal oder einer ETCS-Halttafel einen Fahrplanhalt besitzen, fahren auf ein Halt zeigendes Zielsignal zu. Dies wird auch als „kapazitätsoptimiert“ beschrieben.

Unter Nutzung der berechneten Mindestzugfolgezeiten, des Betriebsprogramms, des angenommenen Verspätungsniveaus sowie des *Level of Service* wird mit der STRELE-Formel die Nennleistung der Mischverkehrsstrecke bestimmt. Da sich zwischen den einzelnen Varianten und Szenarien aus diesen Parametern ausschließlich die Mindestzugfolgezeiten ändern, zeigt sich in der Nennleistung ein zu den Mindestzugfolgezeiten umgekehrt proportionaler Zusammenhang. Durch die notwendige Rundung auf ganze Züge zeigt die Nennleistung geringe Differenzen zwischen den Varianten nicht an. Die berechneten Nennleistungen für den Tageszeitraum sind in Abbildung 7.10 auf der nächsten Seite dargestellt. Die Nennleistungen aller Untersuchungszeiträume und Szenarien sind im Anhang in Tabelle F.12 auf Seite 194 enthalten. Mit der Infrastruktur des Ausgangszustands mit 3000 m langen Blockabschnitten zeigen alle drei untersuchten Systeme dieselbe Nennleistung von 90 Zügen pro 16 h. Bedingt durch die Verkürzung der mittleren Mindestzugfolgezeiten können auf der Infrastruktur mit ETCS-Ausrüstung und 1000 m langen Blöcken in 16 h drei Züge mehr bei gleichem Qualitätsniveau gefahren werden als mit PZB-Ausrüstung. Bei den sehr kurzen Blocklängen zeigt sich, dass mit ETCS Level 2 ggü. Level 1 FS rechnerisch weitere vier Züge in 16 h möglich sind.

Relativ betrachtet – siehe Abbildung 7.11 auf der nächsten Seite – steigt die Nennleistung bei Verkürzung der Blocklängen um 7,8 % bis 11,1 % (3000 m auf 1000 m) respektive um 4,1 % bis 8,0 % (1000 m auf 500 m). Bei 1000 m Blöcken bieten sowohl ETCS Level 1 FS als auch Level 2 eine gut 3 % höhere Nennleistung als PZB, bei 500 m Blöcken besitzt Level 2 einen Vorteil von knapp 4 %.

Anhand der Zugzahl des Betriebsprogramms ist ersichtlich, dass die oben gezeigten Nennleistungen des Tageszeitraumes in allen Fällen überschritten werden. Damit müssen die zu-

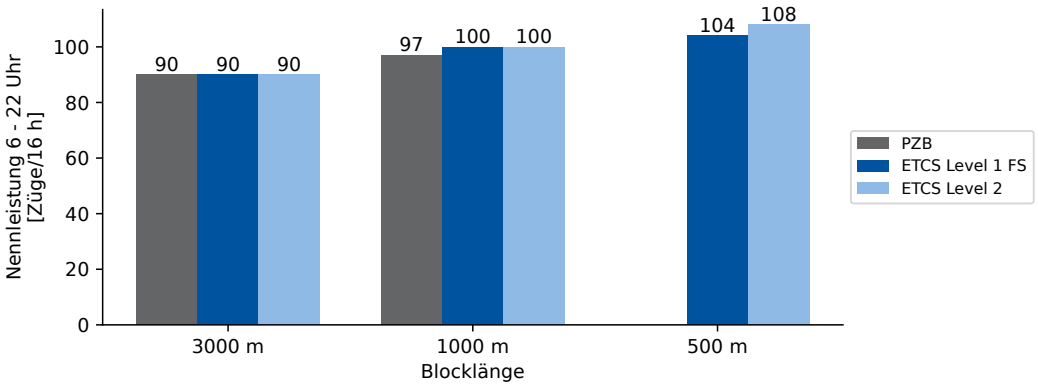


Abb. 7.10: Nennleistung der Mischverkehrsstrecke [Züge pro Richtung] für den Zeitraum 6 h bis 22 h. Eigene Darstellung.

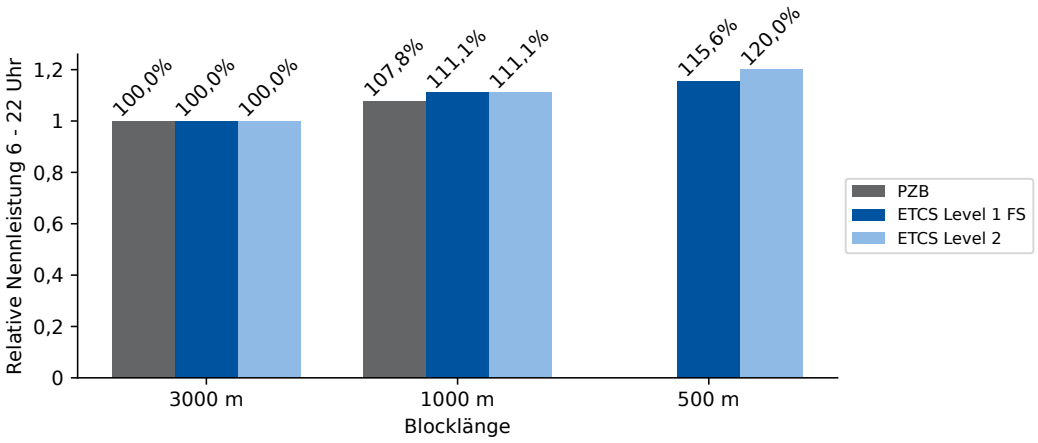


Abb. 7.11: Indexierte Leistungsfähigkeiten der Mischverkehrsstrecken in den untersuchten Szenarien. Eigene Darstellung.

gehörigen Qualitätsfaktoren alle größer als 1,00 sein. Informativ sind sie auszugsweise in Tabelle 7.7 aufgeführt. Die Qualitätsfaktoren aller Untersuchungszeiträume und Szenarien sind im Anhang in Tabelle F.13 auf Seite 194 enthalten.

Tab. 7.7: Qualitätsfaktor der Mischverkehrsstrecke für den Zeitraum 6 h bis 22 h.

System \ Blocklänge	3000 m	1000 m	500 m
PZB	1,89	1,49	—
ETCS Level 1 FS	1,85	1,37	1,25
ETCS Level 2	1,88	1,39	1,11

7.4.6 Erkenntnisse

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass mit entsprechend leistungsfähiger Ausrüstung und Projektierung der Infrastruktur unter Nutzung der im System vorhandenen Optimierungs-

möglichkeiten ggü. der Bestandstechnik mit den untersuchten Parametern keine Einbußen der Streckenleistungsfähigkeit festzustellen sind. Mit einer angepassten, leistungsfähigen Projektierung sind sogar geringe Verbesserungen erzielbar. Die berechneten Ergebnisse decken sich mit den Berechnungen von Landex und Jensen [70].

Wie auch bereits in der vorherigen Untersuchung in Abschnitt 7.3 auf Seite 117 sind die hier erzielten Ergebnisse in Kontext der Methodik einzuordnen und Grenzen sowie mögliche Unsicherheitsfaktoren aufzuzeigen. Zuerst gilt auch hier die Einschränkung, dass die Fahrzeit- und Mindestzugfolgezeitrechnung bei PZB-überwachten Zügen zu optimistischeren Ergebnissen führt, als in der Realität zu erwarten sind. Das Fahren entlang der verdeckt ablaufenden PZB-Überwachungskurven ist für die Tf weder konsistent durchführbar noch nach Regelwerk zulässig. Demgegenüber steht eine Fahrzeit- und Mindestzugfolgezeitrechnung von ETCS-geführten Zügen, die durch die Nutzung der *Indication Curve* deutlich realitätsnähere Ergebnisse liefern kann.

7.4.7 Bewertung

Durch die Berechnung auf generischer, idealtypischer Infrastruktur können selbstverständlich nicht alle Restriktionen berücksichtigt werden. Insbesondere im Bereich der Bahnhöfe sind hierbei Schaltabschnittsgrenzen der Oberleitung zu nennen, welche die mögliche Blockteilung deutlich einschränken können und so zu signifikanten Kapazitätseinbußen führen können, vgl. Denißen et al. [22], Hernández und Hardel [55] und Scherer et al. [107]. Auch BÜ auf der Strecke können bei enger Blockteilung positive Effekte auf die Leistungsfähigkeit zunichtemachen, da ein Halt innerhalb der Einschaltstrecke in den meisten Fällen im Regelbetrieb nicht vorgesehen werden darf und damit Grenzen für die mögliche Blockteilung gesetzt sind. Weitere Objekte, welche die Blockteilung einschränken, haben u. a. Grubor et al. [47] gesammelt.

Als weitere Limitation ist zu nennen, dass neben der Ermittlung der zulässigen Wartezeiten im Betrieb (Folgeverspätungen) durch Befragung von Fdl auch die Forderung der STRELE-Formel nach exponentialverteilten Pufferzeiten in Zeiten vorherrschender Taktverkehre und hoher Streckenauslastungen mittlerweile nicht mehr vollständig erfüllt werden kann, siehe auch Weik et al. [132].

8 Automatisierter Betrieb

8.1 Grundlagen

8.1.1 Allgemeines

Mit Veröffentlichung der ETCS-SRS in Version 4.0.0 im Jahr 2023 stehen Spezifikationen für ATO unter ETCS-Überwachung zur Verfügung. Aktuell umfassen die Spezifikationen mit dem neuen Subset 125 [142] lediglich den GoA 2, also halbautomatisches Fahren (siehe unten). Sie sind dabei uneingeschränkt sowohl mit dem Level 1 als auch dem Level 2 einsetzbar, sodass erstmals ein fast vollständiges, europaweit einheitliches System spezifiziert ist.

Als Vorteile von ATO nennen die Dokumente unter anderem ein besseres Einhalten des Fahrplans, eine hohe Performance des Gesamtsystems, die Möglichkeit zur Einführung vollautomatischer Energiesparfunktionen sowie ein effizientes Konfliktmanagement [142].

Tasler und Knollmann [125] nennen als wesentliche Treiber der Automatisierung für den Personenverkehr die Kapazitätssteigerung ohne Ausbau der Infrastruktur, das Senken der Betriebskosten und die Reduzierung der Ausrüstung. Im Güterverkehr sehen sie Energieeinsparungen, die Möglichkeit des automatischen Ladens und Entladens sowie den Verzicht auf Tf als Vorteile eines automatisierten Betriebs.

8.1.2 Automatisierungsgrade

Im Verkehrsbereich existieren praktisch bei allen Verkehrsträgern unterschiedliche Ausprägungen der Automatisierung des Betriebs. Es hat sich daher etabliert, GoA zu definieren, welche eindeutig festlegen, wer oder was für welche Funktionen zuständig ist. Besonders relevant ist hierbei, ob gewisse Funktionen von einem Menschen oder einem technischen System des teil-, hoch- oder vollautomatisierten Fahrzeugs übernommen werden. Diese Automatisierungsgrade sind im Regelfall derart aufgebaut, dass ein höherer Automatisierungsgrad mit einer größeren Verantwortung der technischen Systeme einhergeht und zugleich alle Funktionalitäten der niedrigeren Grade beinhaltet. Die Definitionen der GoA im Schienenverkehr basieren auf der DIN EN 62267 [175], welche Automatisierungsgrade von GoA 0 bis GoA 4 für städtische Schienenbahnsysteme festlegt. Für die Anwendung im Vollbahnbereich mit ETCS wurden diese Definitionen geschärft und an den Anwendungsfall angepasst. Demnach werden nur die GoA 1 bis 4 definiert, da ein Sichtfahrbetrieb im Regelfall nicht angewendet wird und die bereits vorhandenen Zugbeeinflussungssysteme dem GoA 1 zuzuordnen sind. In ausführlicher Form sind sie in den *ERTMS/ATO Operational Principles* [158] beschrieben, während das verbindliche Subset 125 [142] eine verkürzte *High-Level*-Beschreibung enthält. Die Tabelle 8.1 auf der nächsten Seite gibt einen Überblick über die GoA.

Tab. 8.1: Übersicht der GoA nach [175, 142, 158].

Automatisierungs-grad	Abkürzung	Langform Englisch	Langform Deutsch
GoA 1	NTO	Non-Automated Train Operation	Nicht automatischer Fahrbetrieb
GoA 2	STO	Semi-Automated Train Operation	Halbautomatischer Fahrbetrieb
GoA 3	DTO	Driverless Train Operation	Fahrerloser Fahrbetrieb
GoA 4	UTO	Unattended Train Operation	Unbegleiteter Fahrbetrieb

In den aktuellen ATO-Spezifikationen [142] ist der automatische Betrieb bis einschließlich GoA 2 definiert. Die Weiterentwicklung der Spezifikationen, um auch die GoA 3 und 4 zu umfassen, befindet sich derzeit in Arbeit. Wann diese veröffentlicht werden und darauf aufbauend serienreife Produkte am Markt verfügbar sein werden, ist derzeit nicht terminiert.

8.2 Infrastrukturausrüstung und Projektierung

Im Regelfall kann auch bei automatisiertem Betrieb zuerst nach den in Kapitel 4 ab Seite 50 erarbeiteten Regeln vorgegangen werden. Darauf aufbauend sind weitere Aspekte zu betrachten. Es dürfen keine Projektierungsregeln genutzt werden, in denen Funktionen, die durch die ATO übernommen werden sollen, das visuelle Erkennen von Objekten erfordern. Solche Situationen müssen von vorneherein vermieden und nur in Ausnahmefällen angewendet werden. Diese Ausnahmen sind nur dann möglich, wenn noch ein Tf an Bord ist (GoA 2) oder ein entsprechendes technisches System diese Aufgabe mit mindestens der gleichen Performance und Sicherheit übernehmen kann (GoA 3 bis 4).

Zur Verbesserung der Ortungsgenauigkeit können zusätzliche Ortungs-BG erforderlich werden, insbesondere im Bahnsteigbereich, um ein positionsgenaues Anhalten zu ermöglichen. Wird eine Infrastruktur ausschließlich von automatisierten Fahrzeugen befahren, so sollten die Positionen der Infill-BG entsprechend der dann relevanten Bremskurven platziert werden. Durch den Wegfall einiger Zeitanteile in der Bremskurvenberechnung wird so bspw. die weiteste Infill-BG näher an das EOA heranrücken, was sich wiederum positiv auf die Annäherungsfahrzeit und damit die Kapazität auswirkt. Auch können die benötigten Kabelanlagen reduziert werden.

Je nach gewählter Lösung, den automatisierten Fahrzeugen das Vorliegen einer neuen MA und damit das Heranrücken an die BG am EOA bekanntzumachen, kann die Außensignalisierung weiter reduziert werden. Sie richtet sich dann nur noch nach den Anforderungen, die sich durch die Bewegung von Fahrzeugen unter Aufsicht eines menschlichen Tf – sei es physisch im Fahrzeug oder ferngesteuert per Remote Train Operation (RTO) – ergeben, siehe auch Brandenburger und Naumann [12].

Entsprechend den Anforderungen in [142] ist das EIU in allen Fällen dafür verantwortlich, dass die übermittelten ETCS-Daten mit den zugehörig übermittelten ATO-Daten konsistent sind. Im Idealfall erfolgt die Projektierung beider Teile integriert in einem System, sodass die

Sicherstellung der Konsistenz für die Infrastruktureigenschaften erleichtert wird. Im Gegensatz zur ETCS-Projektierung müssen für die ATO-Projektierung jedoch weitere Daten berücksichtigt werden, sodass umfangreichere Vorarbeiten notwendig sind.

8.3 Auswirkungen auf das Gesamtsystem

Mit der Einführung von ATO werden neue Komponenten und Teilsysteme in das Gesamtsystem eingebracht, welche mit neuen, zusätzlichen Schnittstellen eingebunden werden. Für die Planung und Projektierung der Infrastrukturausrüstung sind hierbei das infrastrukturseitige Teilsystem von ATO (*ATO-Trackside (TS)*) sowie die Verbindung zur fahrzeugseitigen ATO (*ATO-On-board (OB)*), welche über die in den Subsets 126 und 148 [163, 164] definierten Schnittstellen kommunizieren, zu berücksichtigen. Ersteres legt die Sprache (Variablen und Pakete) fest, in welcher die ATO-Daten zwischen Infrastruktur und Fahrzeug ausgetauscht werden. Diese „ATO-Sprache“ ist strukturell vergleichbar mit der „ETCS-Sprache“, siehe Abschnitt 3.1.6 auf Seite 36.

Da das ATO-System in seiner Gesamtheit keine Sicherheitsverantwortung besitzt – es ist gemäß Spezifikationen sowohl fahrzeug- als auch streckenseitig als System mit dem SIL 0 ausgeführt [164] – und die Sicherheit durch ETCS gewährleistet ist, bestehen große technische Freiheiten in der Ausführung des Funkkanals zwischen ATO-OB und ATO-TS. Dies ist insbesondere bei Anwendung im Kombination mit dem ETCS Level 1 von Vorteil, da beispielsweise auf vorhandene Funksysteme wie öffentlichen Mobilfunk zurückgegriffen werden kann und kein dediziertes, sicheres Funknetz wie GSM-R aufgebaut werden muss. Auch wenn im Idealfall eine dauerhafte Verbindung zwischen ATO-OB und ATO-TS bestehen sollte, so ist dies nicht zwangsläufig notwendig. Als Minimum muss an allen Orten, an denen Fahrten beginnen, eine Funkabdeckung vorhanden sein [164]. Dies bedingt allerdings, dass während der Fahrt keine Aktualisierung der Fahrplan- und Streckendaten stattfinden kann und daher möglicherweise ATO durch den Tf deaktiviert und manuell gefahren werden muss. Um auch in nicht-exklusiven Netzwerken eine ausreichende Servicequalität zu erreichen, kann bspw. *Network Slicing* angewendet werden, sofern diese Funktion durch das unterlagerte Funksystem ermöglicht wird. Dabei wird einer jeweiligen Anwendung stets eine definierte Kapazität und Datenrate im Netz vorgehalten, welche auch bei hoher Auslastung garantiert zur Verfügung steht [178, 284].

Jedoch erfahren andere, bereits bestehende Teile des Systems mitunter tiefgreifende Veränderungen. Damit einhergehend wandeln sich mit steigender Automatisierung auch die Berufsbilder der beteiligten Personen. Tf, Fdl und Disponenten finden sich in anderen Arbeitsumgebungen mit neuen und abweichenden Aufgabenbereichen wieder, vgl. Gaebler [43] und Gaebler et al. [44]. Je stärker der Automatisierungsgrad, desto größer wird der Anteil der überwachenden Tätigkeiten und desto größer wird potenziell der Netzbereich, der im Regelbetrieb von einer Person überblickt werden muss. Mit der Einführung eines Traffic Management System (TMS) oder eines Capacity & Traffic Management System (CTMS) können zudem mindestens „einfache“ Abweichungen vom Regelbetrieb ebenso automatisiert ohne menschliches

Eingreifen in einem steuernden Durchgriff über Disposition und Stellwerk bis an das Fahrzeug gelangen. Gleichzeitig können die Reisenden informiert werden.

8.4 Auswirkungen auf die Kapazität

Mit ETCS als „*Enabler*“ für das teil- und hochautomatisierte Fahren auf der Schiene außerhalb abgeschlossener Systeme stellt sich die Frage, welche Auswirkungen dieser Technologiesprung auf die Leistungsfähigkeit des Eisenbahnsystems besitzt.

In Bezug auf das Bewegen der Züge sind mit ATO im Vergleich zu menschlichen Tf deutliche Vorteile zu erwarten. In erster Linie kann ein Zug mit ATO deutlich konsistenter und näher entlang der *Permitted Curve* gefahren werden. Zudem reduzieren sich Zeitanteile für die Reaktionszeit der Tf oder fallen vollständig weg und genaue Haltepositionen können reproduzierbarer angefahren werden als es einem Menschen möglich ist. Dies führt zu einer Reduktion der Fahrzeiten sowie der Mindestzugfolgezeiten im Regelbetrieb, vgl. auch Morton et al. [87] und Suwalski und Wünsch [124]. Gleichzeitig ermöglicht ATO ein vorhersehbares Abfahren vorgegebener Geschwindigkeitsprofile, um beispielsweise eine energieoptimale Fahrweise an den Tag zu legen oder kapazitätsoptimiert prognostizierte oder erkannte Konflikte zu lösen. Mit einem steuernden Durchgriff eines optimierenden Dispositionssystems auf Stellwerke und Fahrzeuge können daher weitere Vorteile des automatisierten Betriebs erwartet werden.

Derzeit wird das automatisierte Fahren in Deutschland vor allem in den S-Bahn-Netzen von Stuttgart und Hamburg vorangetrieben. In einer Untersuchung des Stuttgarter Netzes wurden mit ETCS und ATO ggü. ETCS ohne ATO Reduktionen der Mindestzugfolgezeiten in Höhe von 10 s bzw. 9 % berechnet [58]. Für Hamburg zeigten NEXTRAIL GmbH et al. [92], dass ausgehend vom Bestand mit Außensignalisierung und PZB die Mindestzugfolgezeiten mit ETCS und ATO um 10 % bis 14 % reduziert werden können. Interessant ist auch, dass die Fahrzeuge der Baureihe 490 ggü. den älteren Fahrzeugen der Baureihe 474 im ATO-Betrieb aufgrund besserer Bremseigenschaften um 8 % geringere Mindestzugfolgezeiten erreichen. Dies zeigt auf, dass eine Optimierung immer mit Blick auf das Gesamtsystem und unter Berücksichtigung aller Teilsysteme erfolgen muss.

In Untersuchungen zu den Netzeffekten der DSD kommen Büker et al. [15] zu dem Ergebnis, dass ATO im GoA 2 bei manueller Disposition einen Kapazitätseffekt von etwa 5 % bewirkt, der jedoch meist nicht für zusätzliche Trassen genutzt werden kann, sondern als Qualitätseffekt einen pünktlicheren Betrieb ermöglicht.

Besonders zu beachten bei der Automatisierung des Schienenverkehrs ist der Faktor Mensch. Einerseits die Tf, für die eine gute Arbeitsumgebung mit angemessener Belastung (keine Überlastung und keine Unterauslastung) geschaffen werden muss, und andererseits die Reisenden. In vielen Fällen können die Fahrgastwechselzeiten maßgebend werden für die Mindestzugfolgezeit. Das geplante Betriebsprogramm muss dies berücksichtigen und auch während der üblichen Verkehrsspitzen bspw. im Berufsverkehr einen stabilen Betrieb ermöglichen.

9 Weiterer Forschungsbedarf

Auch wenn ETCS Level 1 FS insgesamt einen hohen Reifegrad aufweist, konnten im Verlaufe dieser Arbeit mehrere Aspekte identifiziert werden, in denen weiterhin Forschungsbedarf besteht. Die hier adressierten Fragestellungen sind dabei überwiegend der anwendungsnahen Forschung zuzuordnen. Insbesondere zeigen sich bestehende Forschungslücken bei der Erstellung konsistenter, anwendungsbezogener Regelwerke für Planung und Betrieb von ETCS Level 1 FS. In diesem Zusammenhang sind neben den technischen Disziplinen auch Erkenntnisse aus der Soziologie und der Arbeitswissenschaft einzubeziehen, da der Faktor Mensch weiterhin eine zentrale Rolle im Gesamtsystem Eisenbahn einnimmt.

Mit ETCS steht eine interoperable und einheitliche Plattform für die schrittweise Automatisierung des Bahnsystems zur Verfügung. Die aktuelle und zukünftige Forschung sollte daher auch Level 1 berücksichtigen, da insbesondere abseits urbaner Ballungsräume erhebliche Potenziale durch eine (Teil-)Automatisierung zu erwarten sind. Dies betrifft zugleich jene Anwendungsfälle, in denen ETCS Level 1 eine technisch und betrieblich geeignete Lösung darstellen kann. Daraus ergibt sich der Bedarf, die spezifischen Eigenschaften des Level 1 systematisch in der zukünftigen Systementwicklung einzubeziehen. In diesem Zusammenhang ist auch zu untersuchen, welche Auswirkungen eine zunehmende Automatisierung auf die Rolle und Handlungen der „Endanwender“ Tf hat und inwieweit sich hierbei Unterschiede zwischen Level 2 und Level 1 ergeben.

Darüber hinaus ergeben sich weitere Forschungs- und Entwicklungsbedarfe innerhalb der ETCS-Spezifikationen selbst. Während der fortlaufenden Weiterentwicklung der Spezifikationen unter Beteiligung des Sektors ist sicherzustellen, dass Level 1 eine gleichwertige Berücksichtigung findet, um eine zunehmende Funktionsdivergenz zwischen Level 1 und Level 2 zu vermeiden. Weiterführend sollte untersucht werden, welche bisher für Level 2 exklusiven Funktionen (z. B. das rückwärtige Übertragen von Infrastrukturinformationen wie Neigungs- und Geschwindigkeitsprofilen) auch im Level 1 nutzbar gemacht werden können und welche Effekte hieraus resultieren.

Jede Änderung im Eisenbahnsystem erfordert die Durchführung eines systematischen Risikomanagementverfahrens. Der Einsatz neuer Zugbeeinflussungstechnik stellt grundsätzlich eine sicherheitsrelevante Änderung dar und wird in vielen Fällen als signifikant einzustufen sein. Entsprechend ist eine umfassende Sicherheitsbewertung erforderlich, die in der Regel auf Basis eines Systemlastenheftes erfolgt. In diesem Kontext ergibt sich die Forschungsfrage hinsichtlich der anzuwendenden Sicherheitsmethodik. Insbesondere ist zu untersuchen, in welchen Fällen der Bezug auf bestehende, etablierte Referenzsysteme zielführend ist und wann eine explizite Risiko- und Gefährdungsanalyse Vorteile bietet. Hierbei sind die Unterschiede der anzuwendenden Rechtsnormen, anerkannte Regeln der Technik und Regelwerke zwischen den EdB und den NE zu berücksichtigen.

Vor einem flächendeckenden Einsatz erscheint es zudem sinnvoll, die Prozesse zur Prüfung von Projektierungsdaten (vgl. Eggenhofer [29]) sowie des *Trackside Approval* (vgl. Hauner und Bohlender [54]) vertieft zu analysieren. Unter wissenschaftlicher Begleitung können hierfür optimale Prozesse und Werkzeuge entwickelt und zur Einsatzreife gebracht werden, um die Effizienz, Nachvollziehbarkeit und Sicherheit über den gesamten Zulassungs- und Abnahmeprozess zu verbessern.

10 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es, die grundsätzliche Anwendbarkeit von ETCS Level 1 FS unter technischen und betrieblichen Rahmenbedingungen systematisch zu untersuchen. Dabei wurde ein besonderes Augenmerk auf das Anwendungsbeispiel Deutschland gelegt.

Es konnte gezeigt werden, dass trotz des Fokus auf Level 2 die Anwendung von ETCS Level 1, insbesondere in der vollständig interoperablen Ausführung FS, auf vielen Infrastrukturen sowohl gegenüber dem Bestand als auch dem Level 2 vorteilhaft sein kann. Vor allem außerhalb des Regelungsbereichs der TEN-Verordnung zeigen sich vielfältige Anwendungsfälle, welche den Rollout von ETCS in der Fläche maßgeblich unterstützen können.

Im weiteren Verlauf wurden die grundlegende Systemarchitektur und das Systemdesign für eine erfolgreiche Anwendung von ETCS Level 1 FS (am Beispiel Deutschland) entwickelt. Dabei wurden keine betrieblichen Situationen festgestellt, welche der erfolgreichen Anwendung von Level 1 FS grundsätzlich entgegenstehen. In allen untersuchten Fällen konnte eine im Vergleich zu den Referenzsystemen im Bestand mindestens gleichwertige und gleich sichere Lösung entwickelt werden. In mehreren Fällen bietet die Anwendung von ETCS Level 1 FS sogar Vorteile gegenüber dem Bestand, vor allem in Bezug auf die Arbeitsumgebung der Tf.

Ebenso belegen die durchgeführten eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Untersuchungen, dass für die angedachten Anwendungsfälle ETCS keine negativen Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems haben muss. Mit einer entsprechenden Planung kann die Leistungsfähigkeit auf dem Niveau des Bestands gehalten und in einzelnen Anwendungsfällen sogar verbessert werden.

Die vorliegende Arbeit untersuchte die technischen und betrieblichen Aspekte von ETCS Level 1 FS. Für eine erfolgreiche Anwendung in der Praxis sind jedoch auch weitere Rahmenbedingungen wie definierte Planungs- und Genehmigungsverfahren gerade im Bereich der NE notwendig, welche zukünftig geschaffen werden müssen, um den Einsatz von ETCS Level 1 FS zu fördern.

Mit einer fortschreitenden Verbreitung von ETCS in Deutschland bei unterschiedlichen EIU steigt die Notwendigkeit einer nationalen Koordinierungsstelle sowie einer zentralen Vergabestelle für die Werte bestimmter ETCS-Variablen (vgl. [162]). Dies sollte nicht einem kommerziellen Anbieter oder einem einzelnen EIU überlassen werden, um eine neutrale und diskriminierungsfreie Vergabe im Interesse des gesamten Sektors zu gewährleisten. Im April 2026 wurde bekannt, dass das Bundesministerium für Verkehr (BMV) eine entsprechende „ERTMS-Koordinierungsstelle“ eingerichtet hat [263]. Diese soll in einem ersten Schritt zentrale Anlaufstelle für den Sektor sein sowie die Förderung der strecken- und fahrzeugseitigen Umrüstung koordinieren.

Wichtig hierbei ist vor allem ein abgestimmter Rollout zwischen Infrastruktur und Fahrzeugen. Die betroffenen EVU sind bei der Fahrzeugausrüstung mit ganz eigenen Herausforderun-

gen konfrontiert, siehe auch [131]. Ein Alleingang auf Seiten der Infrastrukturbetreiber wie auch der Verkehrsunternehmen muss vermieden werden. Hier hat die Vergangenheit oftmals gezeigt, dass auf das Gesamtsystem bzw. den Sektor bezogen keine zufriedenstellenden Lösungen erzielt wurden. In dieser Abstimmung soll und muss die Koordinierungsstelle eine starke Rolle einnehmen und ist daher mit einem entsprechenden Mandat auszustatten.

Die Systementwicklung von Regelwerken für die Anwendung von ETCS Level 1 FS in Deutschland ist mit der Erstellung von Planungsregeln nicht abgeschlossen. Die Regeln müssen in der Praxis angewendet, validiert und kontinuierlich weiterentwickelt werden. Hierzu sind Pilotprojekte unerlässlich. Dazu müssen die Systemanforderungen strukturiert in ein Lastenheft überführt werden, welches als Grundlage für die Ausschreibungen der anzuwendenden EIU dient. Auch die ETCS-Spezifikationen enthalten mit dem Subset 091 [167] umfangreiche Sicherheitsanforderungen und Grundlagen der Nachweisführung. Das Lastenheft und das darauf aufbauende Pflichtenheft müssen entsprechend den Vorgaben für die Entwicklung von Systemen mit Sicherheitsrelevanz erstellt und zertifiziert werden. Dabei sind die in Abschnitt 2.2.1 auf Seite 5 und Abschnitt 2.2.2 auf Seite 10 dargelegten Prozesse zu durchlaufen. Durch die rechtliche Trennung zwischen EdB und NE unterscheiden sich die notwendigen Schritte und Prozessdetails. Aufgrund der derzeitigen Vorreiterrolle des VDV in Bezug auf ETCS Level 1 FS kann davon ausgegangen werden, dass die Zulassungsreife zuerst im Bereich der NE erreicht werden wird. Bei einer späteren Übernahme bzw. Erweiterung auf Infrastrukturen der EdB sind die TSI, EIGV und nachgeordnete Vorschriften maßgebend. Daher erscheint es sinnvoll, gemeinsam mit den Aufsichtsbehörden die Unterschiede herauszuarbeiten, damit spätere Doppelarbeit vermieden wird und die Ausweitung des Anwendungsbereiches keiner Neuentwicklung gleich kommt.

Die Produkte der Systemlieferanten müssen einen umfassenden Zulassungsprozess durchlaufen, sofern noch keine Zulassung für den Einsatz in Deutschland vorliegt oder kein entsprechendes, im Ausland eingesetztes System per *Cross Acceptance* angewendet werden kann.

Zuletzt sind die notwendigen betrieblichen Regelwerke zu erstellen oder anzupassen, da sich ETCS grundlegend von der konventionellen Technik unterscheidet. Dieser Schritt bietet die Chance, das betriebliche Regelwerk umfassend zu modernisieren und anwendergerecht zu gestalten.

Damit ETCS Level 1 FS auch in Zukunft weiterhin angewendet werden kann, ist es notwendig, auf europäischer Ebene die Möglichkeit offenzuhalten, Level 1 bei neuen Projekten in Betrieb zu nehmen. Dies bedeutet auf technischer Ebene, dass auch die zukünftigen ETCS-Spezifikationen Level 1 enthalten müssen. Auch eine Weiterentwicklung parallel zum Level 2 ist wünschenswert, um eine möglichst große Gleichheit zwischen den Levels zu behalten. Auf politischer Ebene müssen sowohl die EU-Kommission als auch die ERA die Einsatzzwecke und damit die Notwendigkeit von Level 1 nicht nur anerkennen, sondern aktiv unterstützen. Damit kann erreicht werden, dass die Industriepartner weiterhin entsprechende Produkte anbieten, weiter- und neu entwickeln.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1: Vereinfachte Systemarchitektur von ERTMS/ETCS 23
Abb. 3.2: Schema von ETCS Level 0 27
Abb. 3.3: Schema von ETCS Level 1 mit Infill via Eurobalisen 28
Abb. 3.4: Schema von ETCS Level 1 mit Infill via Euroloop oder RIU 28
Abb. 3.5: Schema von ETCS Level 2 mit streckenseitiger Gleisfreimeldung 29
Abb. 3.6: Schema von ETCS Level 2 mit zugseitiger Gleisfreimeldung 30
Abb. 3.7: Schema von ETCS Level NTC 30
Abb. 3.8: Beispielhafte ETCS-Bremskurven ohne Release Speed 33
Abb. 3.9: Beispielhafte ETCS-Bremskurven mit Release Speed 35

Abb. 4.1: Schematische Darstellung einer Infrastrukturausrüstung zur Sicherung startender Züge 69
Abb. 4.2: Flussdiagramm des Algorithmus zur Bestimmung der optimalen Positionen der Infill-BG 71
Abb. 4.3: Schematische Darstellung der modellierten Infrastruktur 72
Abb. 4.4: Qualitatives Beispiel der Trajektorien eines Zuges in Abhängigkeit der Infill-BG, an der die Infill-Informationen übertragen werden 75
Abb. 4.5: Beispiel des zweidimensionalen Plots der Trajektorien 77
Abb. 4.6: Beispiel des dreidimensionalen Plots, der den gewichteten Fahrzeitverlust über alle möglichen Positionen der Infill-BG zeigt 78
Abb. 4.7: ETCS-Bremskurven des Testzuges LINT 54 aus 120 km/h 80
Abb. 4.8: Trajektorien bei drei optimal platzierten Infill-BG im Testfall LINT 54 bei 120 km/h 81
Abb. 4.9: Trajektorien bei zwei optimal platzierten Infill-BG im Testfall LINT 54 bei 120 km/h 82
Abb. 4.10: Schematische Darstellung einer BÜ/BÜ-Kette 90
Abb. 4.11: Schematische Darstellung gekoppelter BÜ 90
Abb. 4.12: Schematische Darstellung der Zufahrtsicherung 96

Abb. 7.1: Schematische Infrastruktur der modellierten eingleisigen Strecke mit Kreuzungsbahnhöfen 118
Abb. 7.2: Schematische Infrastruktur eines Kreuzungsbahnhofs mit Doppelausrüstung 119
Abb. 7.3: Sicherungstechnisches Schema eines Kreuzungsbahnhofs mit Doppelausrüstung 121
Abb. 7.4: Schematische Infrastruktur der modellierten zweigleisigen Mischverkehrsstrecke 124
Abb. 7.5: Schematischer Spurplan eines Knotens ohne LST 125
Abb. 7.6: Schematischer Spurplan eines viergleisigen Bahnhofs ohne LST 126
Abb. 7.7: Schematischer Spurplan eines dreigleisigen Bahnhofs ohne LST 126

Abb. 7.8: Tagesganglinie einer Richtung der Mischverkehrsstrecke 126
Abb. 7.9: Mittlere Mindestzugfolgezeiten der Mischverkehrsstrecke 130
Abb. 7.10: Nennleistung der Mischverkehrsstrecke für den Zeitraum 6 h bis 22 h 132
Abb. 7.11: Indexierte Leistungsfähigkeiten der Mischverkehrsstrecken in den untersuchten Szenarien 132

Abb. E.1: Bemaßtes sicherungstechnisches Schema eines Kreuzungsbahnhofs mit Doppelausrüstung 181

Abb. F.1: Modellierte Infrastruktur der freien Strecke bei 3000 m Blocklänge 184
Abb. F.2: Modellierte Infrastruktur der freien Strecke bei 1000 m Blocklänge 184
Abb. F.3: Modellierte Infrastruktur der freien Strecke bei 500 m Blocklänge 184
Abb. F.4: Modellierte Infrastruktur eines viergleisigen Bahnhofs bzw. Knotens bei 3000 m Blocklänge 185
Abb. F.5: Modellierte Infrastruktur eines viergleisigen Bahnhofs bzw. Knotens bei 1000 m Blocklänge 185
Abb. F.6: Modellierte Infrastruktur eines viergleisigen Bahnhofs bzw. Knotens bei 500 m Blocklänge 185
Abb. F.7: Modellierte Infrastruktur eines dreigleisigen Bahnhofs bei 3000 m Blocklänge 186
Abb. F.8: Modellierte Infrastruktur eines dreigleisigen Bahnhofs bei 1000 m Blocklänge 186
Abb. F.9: Modellierte Infrastruktur eines viergleisigen Bahnhofs bei 500 m Blocklänge 186
Abb. F.10: ETCS-Bremskurven des Modellzugs FV bei einem Abstand zwischen EOA und SvL von 200 m 187
Abb. F.11: ETCS-Bremskurven des Modellzugs FV bei einem Abstand zwischen EOA und SvL von 50 m 187
Abb. F.12: ETCS-Bremskurven des Modellzugs NV schnell bei einem Abstand zwischen EOA und SvL von 200 m 188
Abb. F.13: ETCS-Bremskurven des Modellzugs NV schnell bei einem Abstand zwischen EOA und SvL von 50 m 188
Abb. F.14: ETCS-Bremskurven des Modellzugs NV langsam bei einem Abstand zwischen EOA und SvL von 200 m 189
Abb. F.15: ETCS-Bremskurven des Modellzugs NV langsam bei einem Abstand zwischen EOA und SvL von 50 m 189
Abb. F.16: ETCS-Bremskurven des Modellzugs GV schnell bei einem Abstand zwischen EOA und SvL von 200 m 190
Abb. F.17: ETCS-Bremskurven des Modellzugs GV schnell bei einem Abstand zwischen EOA und SvL von 50 m 190
Abb. F.18: ETCS-Bremskurven des Modellzugs GV langsam bei einem Abstand zwischen EOA und SvL von 200 m 191
Abb. F.19: ETCS-Bremskurven des Modellzugs GV langsam bei einem Abstand zwischen EOA und SvL von 50 m 191

Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1: Verfügbarkeit der ETCS-Betriebsarten nach Level 31
Tab. 3.2: Kategorien der ETCS-Variablen nach Präfix 37

Tab. 4.1: ETCS-Pakete für BG des Typs „ETCS Stop Marker bzw. Hauptsignal“ 56
Tab. 4.2: ETCS-Pakete für BG des Typs „Sperr- bzw. Rangiersignal“ 56
Tab. 4.3: ETCS-Pakete für ungesteuerte BG des Typs „Rangierhalttafel“ 57
Tab. 4.4: ETCS-Pakete für gesteuerte BG des Typs „Rangierhalttafel“ 57
Tab. 4.5: ETCS-Pakete für BG des Typs „Infill“ 57
Tab. 4.6: ETCS-Pakete für BG des Typs „Überwachungssignal“ 58
Tab. 4.7: ETCS-Pakete für BG des Typs „Überwachungssignalwiederholer“ 58
Tab. 4.8: ETCS-Pakete für BG des Typs „Halteplatz“ 60
Tab. 4.9: Mindestabstand einer Balise vor einem EOA oder LOA 63
Tab. 4.10: Bewertungsübersicht möglicher Lösungen zur Sicherung anfahrender Züge 67
Tab. 4.11: Notwendige Eingangsparameter des Algorithmus zur Optimierung 73
Tab. 4.12: Eingangsparameter des Algorithmus in seiner Python-Implementierung . . 76
Tab. 4.13: Ausgabeparameter des Algorithmus als Ergebnis der Optimierung 77
Tab. 4.14: Stufenfunktionen zur Approximation der Anfahr- und Bremsbeschleunigung des Testzuges LINT 54 79
Tab. 4.15: Ergebnisse aus der Optimierung der Infill-BG für den Testzug LINT 54 . . . 80
Tab. 4.16: Ergebnisse der Evaluation unterschiedlicher Strategien zur manuellen Platzierung von drei Infill-BG im Testfall LINT 54 83
Tab. 4.17: Ergebnisse der Evaluation unterschiedlicher Strategien zur manuellen Platzierung von zwei Infill-BG im Testfall LINT 54 83

Tab. 5.1: Standardzuteilung der ETCS-Pakete zu den Balisen einer BG 101

Tab. 7.1: Parameter der Szenarien und Varianten des Kreuzungsbahnhofs 120
Tab. 7.2: Fahrzeiten exklusive Haltezeiten über die modellierte Infrastruktur 121
Tab. 7.3: Mindestzugfolgezeiten zwischen zwei Kreuzungsbahnhöfen 123
Tab. 7.4: Bahnhöfe der generischen Mischverkehrsstrecke 125
Tab. 7.5: Modellzüge zur Untersuchung der Streckenleistungsfähigkeit einer Mischverkehrsstrecke 127
Tab. 7.6: Berechnete Indication Points der Modellzüge 128
Tab. 7.7: Qualitätsfaktor der Mischverkehrsstrecke für den Zeitraum 6 h bis 22 h . . . 132

Tab. 8.1: Übersicht der GoA 135

Tab. B.1: Liste referenzierter ETCS-Pakete 175

Tab. C.1: Umsetzung von weiteren ortsfesten Signalen in ETCS 177

Tab. C.2: Umsetzung von weiteren ortsfesten Orientierungszeichen in ETCS 178

Tab. E.1: Fahrzeiten exklusive Haltezeiten über die modellierte Infrastruktur unter ETCS entlang der *Indication Curve* 180

Tab. F.1: Statistische Auswertung der Blockabschnitte nach Szenario 182
Tab. F.2: Näherungswerte der Einbruchsverspätungen der Modellzüge bei hoher Belastung der Zulaufstrecken 182
Tab. F.3: Relevante Einstellungen der analytischen Berechnungen in LUKS 183
Tab. F.4: Matrix der Mindestzugfolgezeiten im Szenario PZB mit 3000 m Blocklänge 192
Tab. F.5: Matrix der Mindestzugfolgezeiten im Szenario ETCS Level 1 FS mit 3000 m Blocklänge 192
Tab. F.6: Matrix der Mindestzugfolgezeiten im Szenario ETCS Level 2 mit 3000 m Blocklänge 192
Tab. F.7: Matrix der Mindestzugfolgezeiten im Szenario PZB mit 1000 m Blocklänge 192
Tab. F.8: Matrix der Mindestzugfolgezeiten im Szenario ETCS Level 1 FS mit 1000 m Blocklänge 193
Tab. F.9: Matrix der Mindestzugfolgezeiten im Szenario ETCS Level 2 mit 1000 m Blocklänge 193
Tab. F.10: Matrix der Mindestzugfolgezeiten im Szenario ETCS Level 1 FS mit 500 m Blocklänge 193
Tab. F.11: Matrix der Mindestzugfolgezeiten im Szenario ETCS Level 2 mit 500 m Blocklänge 193
Tab. F.12: Nennleistung der Mischverkehrsstrecke nach Szenario und Untersuchungszeitraum 194
Tab. F.13: Qualitätsfaktor der Mischverkehrsstrecke nach Szenario und Untersuchungszeitraum 194

Bibliografie

Literatur

[1] Stephan Altmann, Moritz Cichos, Matthias Kopitzki und Jörn Pachl. „Ein neues Betriebsverfahren für den digitalen Bahnbetrieb“. In: *Der Eisenbahningenieur* (Aug. 2023), S. 38–42.

[2] Lionel Arend, Laurent Pott, Nico Hoffmann und Ronny Schanck. „ETCS Level 2 ohne GSM-R“. In: *SIGNAL+DRAHT* 110 (Okt. 2018), S. 18–28.

[3] Stefano Baglivo, Vincent Blateau und Fabio Senesi. „Innovative ETCS-Funktionen für stark beanspruchte Bahnknoten“. In: *Der Eisenbahningenieur* (Juni 2020), S. 50–54.

[4] Bane NOR. *Nasjonal Signalplan 2023. Fornyelse av jernbanens signalanlegg*. Dokumentnummer 2000001364. Version 002. 16. Okt. 2023. URL: https://www.banenor.no/contentassets/e26a6e252d174bc2b171eb87c2b2afe3/nasjonal-signalplan-2023.pdf (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[5] Banedanmark. *Operational Rules for fjernbane*. Version ORF-26-1 valid from 02.02.2026. 2026. URL: https://www.bane.dk/-/media/Bane/Dokumenter/Jernbanevirksomhed/Sikkerhed/Trafikale-regler/ORF-dokumenter/ORF/ORF-26_1-english.pdf (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[6] Peter Barth et al. „Innovationskooperation zur LST-Infrastruktur im Digitalen Knoten Stuttgart“. In: *SIGNAL+DRAHT* 114 (Juli 2022), S. 37–46.

[7] Marc Behrens et al. „Schnelle Leit- und Sicherungstechnik für mehr Fahrwegkapazität“. In: *Der Eisenbahningenieur* (Juni 2021), S. 50–55.

[8] Nikola Bešinović und Rob M. P. Goverde. „Capacity Assessment in Railway Networks“. In: *Handbook of Optimization in the Railway Industry*. Hrsg. von Ralf Borndörfer et al. International Series in Operations Research & Management Science 268. Cham: Springer, 2018. Kap. 2. ISBN: 978-3-319-72152-1. DOI: 10.1007/978-3-319-72153-8.

[9] Anika Biehl. „Einbindung moderner Überwachungsarten für Bahnübergänge auf ETCS-Strecken“. Diplomarbeit. Technische Universität Dresden, 20. Juni 2022. URL: https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa2-807300 (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[10] Thomas Bielefeld. „Erste Anlagen der Überwachungsart ÜS_{OE} bei DB und NE – ein Erfahrungsbericht“. In: *SIGNAL+DRAHT* 98 (Sep. 2006), S. 28–31.

[11] Benoît Bienfait. „Die Zukunft der Mobilität in Europa“. In: *SIGNAL+DRAHT* 113 (Sep. 2021), S. 6–12.

[12] Niels Brandenburger und Anja Naumann. „Menschliche Problemlösung macht automatisierten Bahnverkehr erfolgreich“. In: *SIGNAL+DRAHT* (März 2018), S. 6–13.

[13] Lars Brune, Pascal Kahnert, Julia Kalkreiber und Bavo Lens. „ETCS an Landesgrenzen: Interoperabilität und Ausrüstungsvarianten“. In: *SIGNAL+DRAHT* 113 (Juli 2021), S. 23–35.

[14] Thorsten Büker. „ETCS Level 1 LS (ESG) unter dem Aspekt der Leistungsfähigkeit“. In: *Eisenbahntechnische Rundschau* (Nov. 2017), S. 24–31.

[15] Thorsten Büker et al. „Zum verkehrlichen Nutzen der Digitalen Schiene Deutschland“. In: *Der Eisenbahningenieur* (Feb. 2024), S. 47–52.

[16] Bundesamt für Verkehr BAV. *ERTMS-Strategie BAV. Stand 2023*. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr,Energie und Kommunikation UVEK, 2023. URL: https://www.bav.admin.ch/dam/de/sd-web/7GXoUMsIHCIv/ertms.pdf (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[17] Matthias Busse und Michael Dambon. „Geschwindigkeitswechsel in ETCS Full Supervision“. In: *Der Eisenbahningenieur* (Aug. 2020), S. 30–33.

[18] Federico Cuppi et al. „High density European Rail Traffic Management System (HD-ERTMS) for urban railway nodes: The case study of Rome“. In: *Journal of Rail Transport Planning & Management* 17 (15. Dez. 2020), S. 100232. ISSN: 2210-9706. DOI: 10.1016/j.jrtpm.2020.100232.

[19] Alessandro D'Alcide et al. „ERTMS-Regional – über die verbesserte Signalisierung von Regionalstrecken“. In: *SIGNAL+DRAHT* 116 (Okt. 2024), S. 6–13.

[20] DB Netz AG. *Lastenheft ETCS - Betrieblich-technische Systemfunktionen für ETCS SRS Baseline 3* -. Baseline: 6.7 (ZV 3.0.2). 2021.

[21] DB Netz AG. *Übersicht der nationalen Werte für ETCS auf den Strecken der DB Netz AG*. Systementwicklung Zentrale Systeme (I.NDE 231), 27. Jan. 2022. URL: https://www.dbinfrago.com/resource/blob/11089680/192c84ec7797bdaa1001c91ca0b8cb44/ETCS-Nationale-Werte-data.pdf (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[22] Jonas Denißen et al. „Optimierung der Blockteilung mit ETCS Level 2 im Digitalen Knoten Stuttgart“. In: *SIGNAL+DRAHT* 113 (Juli 2021), S. 60–67.

[23] Deutsche Bahn AG. *ETCS Glossar*. DBETCS-2027549129-441473. Version 1.0 DB offen. 30. Okt. 2023. URL: https://www.dbinfrago.com/resource/blob/12464316/cdb58f68651536964547d56a25d03057/Glossar_ETCS-data.pdf (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[24] Deutscher Bundestag. Wissenschaftliche Dienste. *Rechtliche Grundlagen des europäischen Zugbeeinflussungssystems (European Train Control System – ETCS)*. Sachstand WD 5 - 3000 - 071/24. 30. Apr. 2024. URL: https://www.bundestag.de/resource/blob/1005818/3e0213b1ff576da88646b5b864e13e51/WD-5-071-24-pdf.pdf (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[25] Frank Dietrich et al. „Nachrüstung von 333 Triebzügen für den Digitalen Knoten Stuttgart“. In: *ZEVrail* 146 (Mai 2022), S. 170–181.

[26] Digirail. *Towards ETCS over FRMCS in Finland - Return of experience on LETE/5G based deployment*. Präsentation. 28. Apr. 2022. URL: https://www.era.europa.eu/system/files/2022-12/1_-_towards_etcs_over_frmcs_in_finland_-_rex_on_lte5g_based_deployment_jari_pylvanainen.pdf (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[27] Josef Doppelbauer. „Zukunft ERTMS – Welche Faktoren das Spiel verändern werden". In: *Der Eisenbahningenieur* (Juni 2022), S. 70–72.

[28] Frederik Düpmeier. „SmartLogic – Mit smarter Sicherungslogik im Stellwerk Kapazitätspotenziale heben". In: *SIGNAL+DRAHT* 116 (Jan. 2024), S. 32–39.

[29] Martin Eggenhofer. „Effiziente Datenprüfung streckenseitiger ETCS-Systeme". In: *SIGNAL+DRAHT* 109 (Sep. 2017), S. 40–44.

[30] Eisenbahn-Bundesamt. *Nationaler Umsetzungsplan ETCS*. Version 1.11. 11. Dez. 2017. URL: https://www.eba.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Europa/ERTMS/Nationaler_Umsetzungsplan_ETCS.html (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[31] Eisenbahnbundesamt. *Liste der in Deutschland genehmigten Betreiber von Eisenbahnstrecken*. 29. Apr. 2024. URL: https://www.eba.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Eisenbahnunternehmen/EIU/eiu_oeff.xlsx (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[32] European Railway Agency. *Braking Curves Simulation Tool v5.1*. 14. Okt. 2024. URL: https://www.era.europa.eu/sites/default/files/2025-02/era_braking_curves_tool_v5.1.xlsm (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[33] European Union Agency for Railways. *Structural TSIs and their amendments, by year*. Sep. 2023. URL: https://www.era.europa.eu/system/files/2022-10/TSIs%20chronology%20table.pdf (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[34] Eurostat. *Data Browser. Total length of railway lines*. 24. Okt. 2024. DOI: 10.2908/TTR00003.

[35] Lars Fehlauer. „Auswirkungen flacher ETCS Bremskurven auf zeitabhängige Streckenausrüstungen". Diplomarbeit. Technische Universität Dresden, 18. Dez. 2018. URL: https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa2-338010 (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[36] Lars Fehlauer und Richard Kahl. „Einfluss der ETCS-Bremskurven auf die Infrastrukturplanung". In: *Der Eisenbahningenieur* (Aug. 2019). Hrsg. von 34–37.

[37] Lars Fehlauer und Richard Kahl. „Verhinderung betrieblicher Einschränkungen durch ETCS-Bremskurven an Bahnübergängen". In: *Der Eisenbahningenieur* (Aug. 2020), S. 34–37.

[38] André Feltz. „Bahnbetrieb im 21. Jahrhundert". In: *SIGNAL+DRAHT* 112 (Okt. 2020), S. 3.

[39] André Feltz und Lionel Arend. „Stellwerksevolution in Luxemburg durch Integration von ETCS". In: *Eisenbahntechnische Rundschau* (Juli 2023), S. 32–36.

[40] André Feltz, Nils Nießen, Jürgen Jacobs und Tobias Walke. „Ermittlung der Leistungsfähigkeit des Luxemburger Eisenbahnnetzes unter Berücksichtigung von ETCS Level 1 FS“. In: *Eisenbahntechnische Rundschau* (Nov. 2016), S. 14–20.

[41] Klaus Finken, Thomas Hamblock und Georg Klöters. „ZSB 2000 auf dem Weg zu ETCS“. In: *SIGNAL+DRAHT* 111 (Okt. 2019), S. 32–37.

[42] Jonas Förster et al. „ETCS-Bremskurven im Spiegel der Praxis“. In: *Der Eisenbahningenieur* (Juni 2023), S. 45–50.

[43] Fabian Gaebler. „Auswirkungen des vollautomatischen Bahnbetriebs auf ETCS und weitere Umsysteme“. Diplomarbeit. Technische Universität Dresden, 1. Juni 2022. URL: https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa2-803171 (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[44] Fabian Gaebler, Richard Kahl und Michael Krahl. „Vollautomatischer Bahnbetrieb mit ETCS und weiteren Umsystemen. Eine Untersuchung der Auswirkungen des vollautomatischen Bahnbetriebs auf ETCS und weitere Umsysteme“. In: *Der Eisenbahningenieur* (Jan. 2023), S. 31–34.

[45] Fabian Gaebler und Michael Krahl. „Aktuelle Überlegungen zur Weiterentwicklung der ETCS-Ortung“. In: *SIGNAL+DRAHT* 116 (Juni 2024), S. 33–41.

[46] Stefan Gaider und Ramo Begic. „ETCS / Migration ETCS L2 in Österreich: ETCS Level 2 VSS“. In: *SIGNAL+DRAHT* 117 (Jan. 2025), S. 34–42.

[47] Nenad Grubor et al. „Ansatz zur teilautomatisierten kapazitätsoptimierten Blockteilung von ETCS L2oS-Bereichen“. In: *Eisenbahntechnische Rundschau* (Dez. 2024), S. 28–35.

[48] Karol Gruszka, Łukasz Sitarek, Dobromir Jasiński und Jakub Salamon. „ETCS L1 LS und die Interoperabilität des europäischen Eisenbahnnetzes“. In: *SIGNAL+DRAHT* (Sep. 2024), S. 11–20.

[49] Frank Gülicher, Christoph Theuergarten und Ulrich Kohlenberger. „Digitale Schiene Deutschland – Infrastrukturprojekte für eine digitale Zukunft“. In: *SIGNAL+DRAHT* 116 (Juli 2024), S. 6–13.

[50] Adrian-Leander Gütschow, Björn Norwig und Matthias Kopitzki. „Der Digitale Befehl: Prozessbeschleunigung und Arbeitserleichterung im Betrieb“. In: *Deine Bahn* (Feb. 2023), S. 34–37.

[51] Fabian O. Hampel, Albrecht Morast, Nils Nießen und Christian Schindler. „Automatischer Eisenbahnverkehr: Aufgaben des Triebfahrzeugführers am Beispiel der Streckenbeobachtung“. In: *IRSA 2021: Tagungsband*. 3. International Railway Symposium Aachen (3. International Railway Symposium Aachen, 21.–23. Nov. 2021). Hrsg. von Rik W. De Doncker, Nils Nießen, Nadine Friesen und Christian Schindler. Aachen, 2022. DOI: 10.18154/RWTH-2022-01717.

[52] Oskar Happel. „Bahnhofleistungsplan: ein Verfahren zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit von Bahnhöfen“. Dissertation. Technische Hochschule Aachen, 1950.

[53] Oskar Happel. „Sperrzeiten als Grundlage für die Fahrplankonstruktion“. In: *Eisenbahntechnische Rundschau* 8 (Feb. 1959), S. 79–90.

[54] Markus Hauner und Tim Bohlender. „ERTMS Trackside Approval bei der DB InfraGO AG – Erfahrungsbericht nach drei Jahren“. In: *SIGNAL+DRAHT* 116 (Juni 2024), S. 16–23.

[55] Lylly Hernández und Sascha Hardel. „Schaltabschnittsgrenzen und Bahnübergänge schränken Kapazitätseffekte von ETCS Level 2 ein“. In: *SIGNAL+DRAHT* 115 (Feb. 2023), S. 24–30.

[56] Florian Hutter und Manfred Zekl. „ETCS – Erfolgreiche Inbetriebnahme der Red Line in Thailand“. In: *SIGNAL+DRAHT* 115 (Juli 2023), S. 69–76.

[57] Simon Indola et al. *Public Mobile Radio Networks Suitability for ETCS Traffic*. Publications of the FTIA 25/2023. Helsinki: Finnish Transport Infrastructure Agency, 2023. URL: https://digirata.fi/wp-content/uploads/2023/06/Public-Mobile-Radio-Networks-Suitability-for-ETCS-Traffic.pdf (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[58] Ingenieurgemeinschaft „Machbarkeitsstudie ETCS S-Bahn Stuttgart“. *Untersuchung zur Einführung von ETCS im Kernnetz der S-Bahn Stuttgart. Abschlussbericht*. Version 2.0. 31. Jan. 2019. URL: https://vm.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-mvi/intern/Dateien/PDF/Abschlussbericht_Untersuchung_ETCS_Stuttgart.pdf (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[59] International Union of Railways – UIC Rail System Department. *FRMCS and 5G for rail: challenges, achievements and opportunities*. Dez. 2020. ISBN: 978-2-7461-3033-3. URL: https://uic.org/IMG/pdf/brochure_frmcs_v2_web.pdf (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[60] Martin Kache. *Fahrdynamik der Schienenfahrzeuge. Grundlagen der Leistungsauslegung sowie der Energiebedarfs- und Fahrzeitrechnung*. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2024. ISBN: 978-3-658-41713-0. DOI: 10.1007/978-3-658-41713-0.

[61] Richard Kahl und Ulrich Maschek. „ETCS an Infrastrukturgrenzen“. In: *Der Eisenbahningenieur* (Okt. 2024), S. 9–11.

[62] Martin Kerekeš und Roland Stadlbauer. „Wie ETCS Level 1 auch künftig Maßstäbe setzt“. In: *SIGNAL+DRAHT* (Nov. 2024), S. 61–66.

[63] Tim Kipshagen. „Einsatzmöglichkeiten von ETCS L1 FS auf Regionalstrecken“. Masterarbeit. RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Schienenbahnwesen und Verkehrswirtschaft, 29. März 2018.

[64] Fabian Kirschbauer. „Einbindung von Bahnübergängen auf ETCS-Strecken“. Studienarbeit. Technische Universität Dresden, 6. Nov. 2015. URL: https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-213266 (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[65] Georg Klöters, Marcell Gransch und Benedikt Janßen. „Intelligente digitale Ansteuerung von Eurobalisen“. In: *SIGNAL+DRAHT* 113 (Juli 2021), S. 68–76.

[66] Richard Kretzschmar, Susanne Hillmann und Christian Scholtka. „Simulation von ETCS-Transitionen im ETCS-Labor des DZSF“. In: *Der Eisenbahningenieur* (Okt. 2024), S. 14–18.

[67] Bernd Krüger, Matthias Ide und Klaus Finken. „ETCS L2 ohne GSM-R – Erfahrungsbericht zur neuen ETCS-Architektur bei der CFL mit ZSB 2000“. In: *SIGNAL+DRAHT* 116 (Jan. 2024), S. 16–23.

[68] Michael Kümmling und Sven Wanstrath. „Maximierung der Fahrwegkapazität mit Digitaler Leit- und Sicherungstechnik“. In: *Eisenbahntechnische Rundschau* (Juli 2022), S. 16–21.

[69] Markus Kuttig-Trölenberg, Jörg Schurig und Raimo Koch. „Die Zukunft von ETCS Level 3 Hybrid“. In: *SIGNAL+DRAHT* 113 (Juli 2021), S. 38–45.

[70] Alex Landex und Lars Wittrup Jensen. „Infrastructure Capacity in the ERTMS Signaling System“. In: *RailNorrköping 2019. 8th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis (ICROMA)*. Hrsg. von Anders Peterson, Martin Joborn und Markus Bohlin. 2019, S. 607–622. URL: https://ep.liu.se/ecp/069/040/ecp19069040.pdf (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[71] Peter Laumen. „ETCS Level 1 im Kontext digitaler Stellwerkstechnik“. In: *SIGNAL+DRAHT* 15 (Juli 2023), S. 33–41.

[72] Peter Laumen. „ETCS Level 1 in the context of digital interlocking technology“. Dissertation. RWTH Aachen University, 30. Juni 2023. DOI: 10.18154/RWTH-2023-10380.

[73] Peter Laumen, Tim Kipshagen und Nils Nießen. „ETCS L1 – Eine optimierte ETCS-Architektur für Regionalstrecken“. In: *SIGNAL+DRAHT* 111 (Nov. 2021), S. 16–24.

[74] Peter Laumen, Tobias Müller und Nils Nießen. „Integration of Level Crossing in ETCS“. In: *IRSA 2019: Tagungsband*. 2nd International Railway Symposium Aachen (2. International Railway Symposium Aachen, 26.–28. Nov. 2019). Hrsg. von Rik W. De Doncker, Nils Nießen und Christian Schindler. Aachen, 2020. DOI: 10.18154/RWTH-2019-11977.

[75] Michael Lehmann, Jürgen Vogel und Harald Dambietz. „Fahrstraßenüberwachte Sicherung von Bahnübergängen in der digitalen Leit- und Sicherungstechnik“. In: *Deine Bahn* (Apr. 2023), S. 52–56.

[76] Jan O. Lübs. „Entwicklung eines Betriebsverfahrens für die Neue Sekundärbahn“. Masterarbeit. Technische Universität Dresden, 28. Sep. 2021. URL: https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa2-797308 (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[77] Silvano Martello und Paolo Toth. *Knapsack Problems. Algorithms and Computer Implementation*. Wiley-Interscience series in discrete mathematics and optimization. New York: Wiley & Sons, 30. Nov. 1990. ISBN: 978-0-471-92420-3.

[78] Ulrich Maschek. *Sicherung des Schienenverkehrs. Grundlagen und Planung der Leit- und Sicherungstechnik*. 5. Aufl. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2022. ISBN: 978-3-658-37632-1.

[79] Ulrich Maschek und Richard Kahl. „LRBC - der Zugleitbetrieb mit ETCS“. In: *Der Eisenbahningenieur* (Okt. 2021), S. 6–8.

[80] Ulrich Maschek, Richard Kahl und Mario Fietze. „Entwicklung von ETCS-Varianten für den Einsatz von ETCS auf Nebenbahnen. Forschungsergebnisse zu ETCS-Ausrüstungsvarianten für schwach belastete Bahnen“. In: *Der Eisenbahningenieur* (März 2023), S. 57–60.

[81] Dirk Menne. „Betriebliche Anforderungen“. In: Ana Cosovic et al. *Planungs- und Betriebsmanagement für das System Bahn*. DB-Fachbuch. Hrsg. von Nils Nießen und Andreas Oetting. 1. Aufl. Bahn Fachverlag GmbH, 2023, S. 38–63. ISBN: 978-3-943214-29-1.

[82] Daria Menzel, Martin Sommer und Jochen Trinckauf. „Neue Sekundärbahn – innovative Fahrzeugbewegungssicherung“. In: *SIGNAL+DRAHT* 112 (Nov. 2020), S. 6–11.

[83] Michael Meyer zu Hörste. „Aspekte der Migration zur Voll-Automatisierung des Bahnbetriebs“. In: *SIGNAL+DRAHT* (Aug. 2017), S. 29–33.

[84] Birgit Milius et al. *Unterstützungsmaßnahmen bei der Durchführung von betrieblichen Hilfshandlungen*. Projektnummer 2019-5-S-1217. Berichte des Deutschen Zentrums für Schienenverkehrsforschung, Bericht 49. Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung beim Eisenbahn-Bundesamt, 2024. DOI: 10.48755/DZSF.240002.01.

[85] Albrecht Morast. „Fahrerloser Eisenbahnverkehr auf Regionalstrecken – Potenziale unterschiedlicher Betriebsverfahren“. Dissertation. RWTH Aachen University, 24. Aug. 2023. DOI: 10.18154/RWTH-2023-08476.

[86] Albrecht Morast, Christopher Wink, Laurent Pott und Nils Nießen. „ETCS-Ausrüstung auf der CFL-Nordstrecke in Luxemburg“. In: *Eisenbahntechnische Rundschau* (Sep. 2022), S. 60–65.

[87] David Morton, Maik Bähr, Rolf Detering und Gregor Theeg. „Optimierung der Zugfolgezeiten mittels ETCS und ATO“. In: *SIGNAL+DRAHT* (Okt. 2012), S. 16–19.

[88] Tobias Mücke und Michael Krahl. „Erstes ETCS-Projekt bei einer NE“. In: *SIGNAL+DRAHT* 113 (Juli 2021), S. 46–51.

[89] Tobias Müller. „Integration von Bahnübergängen in ETCS L1 FS auf Regionalstrecken“. Masterarbeit. RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Schienenbahnwesen und Verkehrswirtschaft, 24. Sep. 2018.

[90] Wilhelm Müller. *Eisenbahnanlagen und Fahrdynamik*. Bd. 2: Bahnlinie und Fahrdynamik der Zugförderung. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer, 1953.

[91] *Nationaler Umsetzungsplan Deutschland 2024*. 12. Juli 2024. URL: https://transport.ec.europa.eu/document/download/3e233929-da50-4ce2-9276-aff640e939d4_en?filename=NIP_ERTMS_2024_DE.pdf (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[92] NEXTRAIL GmbH, quattron management consulting GmbH und VIA Consulting & Development GmbH. *Abschlussbericht. Technische Machbarkeitsuntersuchung Rollout Digitale S-Bahn Hamburg*. 21. Nov. 2021. URL: https://daten.transparenz.hamburg.de/Dataport.HmbTG.ZS.Webservice.GetRessource100/GetRessource100.svc/ac9ac324-60c2-435a-a3a7-9112f1df9556/Akte__740.8421-005_008.pdf (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[93] Nils Nießen. „Methoden für eisenbahnbetriebswissenschaftliche Untersuchungen“. In: Ana Cosovic et al. *Planungs- und Betriebsmanagement für das System Bahn*. Hrsg. von Nils Nießen und Andreas Oetting. 1. Aufl. DB-Fachbuch. Berlin: Bahn Fachverlag GmbH, 2023. Kap. 3.4. ISBN: 978-3-943214-29-1.

[94] Taschko Nikolov und Georgi Ganchev. „Software Model for Optimization of Infill Balise Location in ETCS, Level 1 in Railway Transport“. In: *ICEST 2015. Proceedings of the L International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies*. Hrsg. von Kalin Dimitrov. Sofia: Faculty of Telecommunications, Technical University of Sofia, 2015, S. 237–240. URL: http://rcvt.tu-sofia.bg/ICEST2015_57.pdf (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[95] Jörn Pachl. *Das Sperrzeitmodell in der Fahrplankonstruktion. Anwendung – Spezialfälle – Alternativen*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015. ISBN: 978-3-658-11127-4. DOI: 10.1007/978-3-658-11128-1.

[96] Jörn Pachl. *Systemtechnik des Schienenverkehrs. Bahnbetrieb planen, steuern und sichern*. 11. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018. ISBN: 978-3-658-38266-7. DOI: 10.1007/978-3-658-38266-7.

[97] Markus Pelz und Boris Dickgießer. „Lösungen für automatisiertes Fahren im Fern-, Güter- und Regionalverkehr“. In: *SIGNAL+DRAHT* (Sep. 2015), S. 35–39.

[98] Richard Poschinger, Christof Jungo, Ernst Kleine und Martin Espenschied. „Cyber-Security-Maßnahmen für ERTMS aus Sicht der Bahnbetreiber“. In: *SIGNAL+DRAHT* 115 (Sep. 2023), S. 63–72.

[99] Jari Pylvänäinen et al. *Kohti digitaalista ja älykästä rautatieliikennettä. Digirata-selvityksen loppuraportti*. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 2020:6. Liikenne- ja viestintäministeriö, 2. Apr. 2020. URL: http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-243-589-7 (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[100] Vahid Ranjbar, Nils O.E. Olsson und Hans Sipliä. „Impact of signalling system in capacity – Comparing legacy ATC, ETCS level 2 and ETCS hybrid level 3 systems“. In: *Journal of Rail Transport Planning & Management* 23 (3. Juni 2022), S. 100322. DOI: 10.1016/j.jrtpm.2022.100322.

[101] Frederic Raths. „Machbarkeit und betriebliche Vorteile von ETCS und ATO auf NE-Infrastrukturen am Beispiels der Rurtalbahn“. Masterarbeit. RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Schienenbahnwesen und Verkehrswirtschaft, 25. Mai 2023.

[102] Frederic Raths, Christopher Wink und René Zweigel. „Betriebliche Auswirkungen durch ETCS und ATO am Beispiel einer NE-Strecke“. In: *IRSA 2023: Tagungsband*. 4. International Railway Symposium Aachen (4. International Railway Symposium Aachen, 22.–23. Nov. 2023). Hrsg. von Nils Nießen, Christian Schindler und DVV Media Group GmbH. Aachen, 2024. DOI: 10.18154/RWTH-2024-02417.

[103] Ton van Rijn und Carsten Söffker. „ETCS für Herausforderungen und Chancen angesichts wachsender Städte“. In: *SIGNAL+DRAHT* (Juni 2017), S. 12–17.

[104] Tomas Rosberg und Birgitta Thorslund. „Impact on driver behavior from ERTMS speed-filtering“. In: *Journal of Rail Transport Planning & Management* 26 (25. Apr. 2023), S. 100386. DOI: 10.1016/j.jrtpm.2023.100386.

[105] Tomas Rosberg et al. „Driveability analysis of the european trail transport management system (ERTMS) - A systematic literature review“. In: *Journal of Rail Transport Planning & Management* 18 (23. Feb. 2021), S. 100240. DOI: 10.1016/j.jrtpm.2021.100240.

[106] Enrique Santiso et al. „Announcement Signals and Automatic Braking Using Virtual Balises in Railway Transport Systems“. In: *Sensors* 22.5 (2. März 2022). Hrsg. von Hossam A. Gabbar und Jusyna Tomaszewska. DOI: 10.3390/s22051943.

[107] Philipp Scherer, Thorsten Büker, Michael Schedel und Sascha Hardel. „Zu netzweiten Kapazitätseffekten der DSD – Impulse zur Steigerung des Nutzens“. In: *Eisenbahntechnische Rundschau* (März 2025), S. 26–31.

[108] Ben-Julian Schmidt. „Untersuchung der Machbarkeit und Kapazitätspotenzialen verkürzter Blockabschnitte mit ETCS Level 1 Full Supervision“. Masterarbeit. RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Schienenbahnwesen und Verkehrswirtschaft, 20. Apr. 2022.

[109] Lars Schnieder. *European Train Control System. Einführung in das einheitliche europäische Zugbeeinflussungssystem*. Springer Berlin / Heidelberg, 2023. ISBN: 978-3-662-66054-6. DOI: 10.1007/978-3-662-66055-3.

[110] Stefanie Schöne, Frederik-Alexander Adebahr, Christian Meirich und Tobias Bekehermes. „Betriebliche Differentialanalyse für den automatisierten Regionalbahnbetrieb“. In: *Eisenbahntechnische Rundschau* (Okt. 2023), S. 18–22.

[111] Jan Schröder, Christoph Gonçalves Alpoim, Boris Dickgießer und Volker Knollmann. „Digitale S-Bahn Hamburg – Erstmalige Realisierung von ‚ATO over ETCS‘ in Deutschland“. In: *SIGNAL+DRAHT* 113 (Juli 2021), S. 52–59.

[112] Wulf Schwanhäußer. *Die Bemessung der Pufferzeiten im Fahrplangefüge der Eisenbahn*. Aachen: Heft 20; Veröffentlichung des Verkehrswissenschaftlichen Instituts der RWTH Aachen, 1974.

[113] Wulf Schwanhäußer. „Wirtschaftlich und betrieblich optimale Zugzahlen auf Eisenbahnstrecken“. In: *Eisenbahntechnische Rundschau* (Sep. 2009), S. 488–495.

[114] Robert Schwenzer. „Auswirkungen unterschiedlicher ETCS-Bremskurven an Landesgrenzen“. Diplomarbeit. Technische Universität Dresden, 14. Juni 2021. URL: https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa2-760975 (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[115] Robert Schwenzer und Lars Brune. „ETCS-Bremskurvenkonflikte an Landesgrenzen“. In: *Der Eisenbahningenieur* (Juni 2022), S. 65–69.

[116] György Sélley, Richard Kahl und Ulrich Maschek. *ETCS und DSTW auf Regional- und Nebenbahnen*. Projektnummer 2020-14-W-1202. Berichte des Deutschen Zentrums für Schienenverkehrsforschung, Bericht 58. Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung beim Eisenbahn-Bundesamt, 2024. DOI: 10.48755/DZSF.240011.01.

[117] Vishy Shanker. „The Ideal Positioning of Infill Balises“. In: *IRSE News* (172 Nov. 2011), S. 9.

[118] Hendrik Siebert. „Erarbeitung eines ETCS-Ausrüstungskonzeptes für Nichtbundeseigene Eisenbahnen“. Masterarbeit. Technische Universität Dresden, 11. Sep. 2020. URL: https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa2-828670 (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[119] Peri Smith, Arnab Majumdar und Washington Y. Ochieng. „An overview of lessons learnt from ERTMS implementation in European railways“. In: *Journal of Rail Transport Planning & Management* 2 (4 7. Nov. 2013), S. 79–87. DOI: 10.1016/j.jrtpm.2013.10.004.

[120] M. Soler, J. López und J. M. Mera. „Simulation system for the optimization of block distribution under the ERTMS-1 signalling system. Computer System Design and Operation in Railway and Other Transit Systems“. In: *Computers in Railways XIII*. Hrsg. von C. A. Brebbia et al. Bd. 127. WIT Press, 2012, S. 61–72. ISBN: 978-1-84564-616-5. DOI: 10.2495/CR120061.

[121] Dirk Spiegel und Christian Hauswald. „Vollautomatisiertes, fahrerloses Fahren auf der Schiene“. In: *Der Eisenbahningenieur* (Mai 2024), S. 18–22.

[122] Roland Stadlbauer. „Neue Trends bei ETCS Level 1“. In: *SIGNAL+DRAHT* 111 (März 2019), S. 6–12.

[123] Patrick Steinebach. „ETCS in Deutschland – Wollen statt Sollen“. In: *SIGNAL+DRAHT* 115 (Juli 2023), S. 3.

[124] Ireneus Suwalski und Henry Wünsch. „ATO over ETCS als Schlüssel für mehr Effizienz, Kapazität und Nachhaltigkeit – Erfahrung und Strategien aus der Praxis“. In: *SIGNAL+DRAHT* 113 (Sep. 2021), S. 13–24.

[125] Gerd Tasler und Volker Knollmann. „Einführung des hochautomatisierten Fahrens – auf dem Weg zum vollautomatischen Bahnbetrieb“. In: *SIGNAL+DRAHT* (Juni 2018), S. 6–14.

[126] Daniel Trenschel, Mike Tietze, Elisabeth Kretschmer und David Schindler. „ETCS-Planung im Projekt ‚Elektrifizierung Knappenrode–Horka'". In: *Der Eisenbahningenieur* (Apr. 2024), S. 18–23.

[127] Jochen Trinckauf, Ulrich Maschek und Richard Kahl, Hrsg. *ETCS in Deutschland*. 2. Aufl. Leverkusen: Trackomedia, 29. Aug. 2024. 532 S. ISBN: 978-3-96245-263-6.

[128] Verkehrswissenschaftliches Institut – Lehrstuhl für Schienenbahnwesen und Verkehrswirtschaft der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen. *Influence of ETCS on line capacity. Generic Study*. Hrsg. von International Union of Railways (UIC). ERTMS Platform. Infrastructure Department. Paris, März 2008. ISBN: 978-2-7461-1455-5.

[129] VIA Consulting & Development GmbH. *Einfluss des European Train Control System (ETCS) auf die Leistungsfähigkeit von Knoten*. Hrsg. von International Union of Railways (UIC). Paris, Mai 2010. ISBN: 978-2-7461-1844-7.

[130] Valeria Vignali et al. „A methodology for the design of sections block length on ETCS L2 railway networks". In: *Journal of Rail Transport Planning & Management* 13 (15. Nov. 2019), S. 100160. ISSN: 2210-9706. DOI: 10.1016/j.jrtpm.2019.100160.

[131] Mario Weber und Franz Jost. „ETCS-Rollout – Bestandsaufnahme aus Sicht eines Eisenbahnverkehrsunternehmens". In: *SIGNAL+DRAHT* 116 (Juli 2024), S. 16–22.

[132] Norman Weik, Nora Niebel und Nils Nießen. „Capacity analysis of railway lines in Germany – A rigorous discussion of the queueing based approach". In: *Journal of Rail Transport Planning & Management* 6 (2 28. Juni 2016), S. 99–115. DOI: 10.1016/j.jrtpm.2016.06.001.

[133] Ekkehard Wendler. *Einfluss von Zugbeeinflussungskomponenten mit Infill-Funktionalität auf das Leistungsverhalten von Bahnanlagen*. Verkehrswissenschaftliches Institut der RWTH Aachen, Nov. 2006.

[134] Andre Wenning, Bernd Krueger, Matthias Ide und Christoph Gralla. „ETCS-Level 1 FS (plus) mit ETCS-Level 2-Funktionalitäten". In: *Der Eisenbahningenieur* (Okt. 2023).

[135] Christopher Wink. *Python Quellcode: Infill Optimization*. 11. Sep. 2024. DOI: 10.5281/zenodo.12698730.

[136] Christopher Wink und Nils Nießen. „Determining the Optimal Positions of Infill Balise Groups for ERTMS/ETCS Level 1 Applications". English. In: *Applied Sciences* 14.18 (Special Issue Application of Intelligent Transportation Systems in Railway: 2nd Edition 11. Sep. 2024). Hrsg. von Valerio De Martinis und Raimond Matthias Wüst. DOI: 10.3390/app14188165.

[137] Christopher Wink et al. „Nationale Planungsregeln ETCS Level 1 Full Supervision für Deutschland". In: *SIGNAL+DRAHT* 117 (Apr. 2025), S. 19–26.

[138] Christopher Wink et al. „Prototypische ETCS-Projektierung für Level 1 Full Supervision“. In: *IRSA 2021: Tagungsband*. 3. International Railway Symposium Aachen (3. International Railway Symposium Aachen, 21.–23. Nov. 2021). Hrsg. von Rik W. De Doncker, Nils Nießen, Nadine Friesen und Christian Schindler. Aachen, 2022. DOI: 10.18154/RWTH-2022-01707.

[139] Mirco Witschorke, Ulrich Maschek und Matthias Barz. „Anforderungen an den Rangierbetrieb in ETCS Level 2 ohne Signale“. In: *Der Eisenbahningenieur* (Juni 2022), S. 61–64.

[140] Jiateng Yin et al. „Research and development of automatic train operation for railway transportation systems: A survey“. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 85 (12. Sep. 2017), S. 548–572. ISSN: 0968-090X. DOI: 10.1016/j.trc.2017.09.009.

Spezifikationen

[141] EEIG ERTMS Users Group. *Engineering Rules for harmonised marker boards*. 21E089. Version 2-. 16. Apr. 2025. URL: https://www.era.europa.eu/sites/default/files/2026-04/index101%20-%2021e089_2_engineering%20rules%20for%20harmonised%20marker%20boards.pdf (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[142] ERA * UNISIG * EEIG ERTMS Users Group. *ERTMS/ATO System Requirements Specification*. Subset-125. Version 1.1.0. 6. Dez. 2024. URL: https://www.era.europa.eu/sites/default/files/2026-04/index084_subset-125%20v1.1.0.pdf (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[143] ERA * UNISIG * EEIG ERTMS Users Group. *ERTMS/ETCS System Requirements Specification. Chapter 1: Introduction*. Subset-026-1. Version 4.0.0. 5. Juli 2023. URL: https://www.era.europa.eu/system/files/2023-09/index004_-_SUBSET-026_v400.zip (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[144] ERA * UNISIG * EEIG ERTMS Users Group. *ERTMS/ETCS System Requirements Specification. Chapter 2: Basic System Description*. Subset-026-2. Version 4.0.0. 5. Juli 2023. URL: https://www.era.europa.eu/system/files/2023-09/index004_-_SUBSET-026_v400.zip (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[145] ERA * UNISIG * EEIG ERTMS Users Group. *ERTMS/ETCS System Requirements Specification. Chapter 3: Principles*. Subset-026-3. Version 4.0.0. 5. Juli 2023. URL: https://www.era.europa.eu/system/files/2023-09/index004_-_SUBSET-026_v400.zip (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[146] ERA * UNISIG * EEIG ERTMS Users Group. *ERTMS/ETCS System Requirements Specification. Chapter 4: Modes and Transitions*. Subset-026-4. Version 4.0.0. 5. Juli 2023. URL: https://www.era.europa.eu/system/files/2023-09/index004_-_SUBSET-026_v400.zip (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[147] ERA * UNISIG * EEIG ERTMS Users Group. *ERTMS/ETCS System Requirements Specification. Chapter 5: Procedures*. Subset-026-5. Version 4.0.0. 5. Juli 2023. URL: https://www.era.europa.eu/system/files/2023-09/index004_-_SUBSET-026_v400.zip (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[148] ERA * UNISIG * EEIG ERTMS Users Group. *ERTMS/ETCS System Requirements Specification. Chapter 6: Management of older System Versions*. Subset-026-6. Version 4.0.0. 5. Juli 2023. URL: https://www.era.europa.eu/system/files/2023-09/index004_-_SUBSET-026_v400.zip (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[149] ERA * UNISIG * EEIG ERTMS Users Group. *ERTMS/ETCS System Requirements Specification. Chapter 7: ERTMS/ETCS Language*. Subset-026-7. Version 4.0.0. 5. Juli 2023. URL: https://www.era.europa.eu/system/files/2023-09/index004_-_SUBSET-026_v400.zip (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[150] ERA * UNISIG * EEIG ERTMS Users Group. *ERTMS/ETCS System Requirements Specification. Chapter 8: Messages*. Subset-026-8. Version 4.0.0. 5. Juli 2023. URL: https://www.era.europa.eu/system/files/2023-09/index004_-_SUBSET-026_v400.zip (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[151] ERA * UNISIG * EEIG ERTMS Users Group. *ERTMS/ETCS System Requirements Specification. Chapter 9: Classification of clauses*. Subset-026-9. Version 4.0.0. 5. Juli 2023. URL: https://www.era.europa.eu/system/files/2023-09/index004_-_SUBSET-026_v400.zip (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[152] ERA * UNISIG * EEIG ERTMS Users Group. *FFFIS for Eurobalise*. Subset-036. Version 4.0.0. 5. Juli 2023. URL: https://www.era.europa.eu/system/files/2023-09/index009_-_SUBSET-036_v400.pdf (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[153] ERA * UNISIG * EEIG ERTMS Users Group. *FFFIS for Euroloop*. Subset-044. Version 2.4.0. 29. Feb. 2012. URL: https://www.era.europa.eu/system/files/2023-09/index016_-_subset-044_v240.pdf (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[154] ERA * UNISIG * EEIG ERTMS Users Group. *FIS Juridical Recording*. Subset-027. Version 4.0.0. 5. Juli 2023. URL: https://www.era.europa.eu/system/files/2023-09/index005_-_SUBSET-027_v400.pdf (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[155] ERA * UNISIG * EEIG ERTMS Users Group. *Glossary of Terms and Abbreviations*. Subset-023. Version 4.0.0. 5. Juli 2023. URL: https://www.era.europa.eu/system/files/2023-09/index003_-_SUBSET-023_v400.pdf (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[156] ERA * UNISIG * EEIG ERTMS Users Group. *Train Interface FIS*. Subset-034. Version 4.0.0. 5. Juli 2023. URL: https://www.era.europa.eu/system/files/2023-09/index007_-_SUBSET-034_v400.pdf (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[157] ERTMS Users Group. *ERTMS/ATO Glossary*. 13E154. Version 2-. 5. Juli 2023. URL: https://www.era.europa.eu/system/files/2023-09/index102_-_ATO_Glossary_v2-.pdf (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[158] ERTMS Users Group. *ERTMS/ATO Operational Principles*. 12E108. Version 2-. 14. Dez. 2023. URL: https://www.era.europa.eu/sites/default/files/2024-12/index64_12e108_2_ato_operational_principles.pdf (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[159] European Railway Agency. *ERA_ERTMS_040026: Introduction to ETCS Braking Curves*. Version 1.5. 12. Aug. 2020. URL: https://www.era.europa.eu/system/files/2022-11/Introduction%20to%20ETCS%20braking%20curves.pdf (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[160] European Railway Agency. *ETCS Driver Machine Interface*. ERA_ERTMS_015560. Version 4.0.0. 5. Juli 2023. URL: https://www.era.europa.eu/system/files/2023-12/index006_-_ERA_ERTMS_015560_v400.zip (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[161] European Railway Agency. *ETCS System Version Management*. Subset-104. Version 4.0.0. 5. Juli 2023. URL: https://www.era.europa.eu/system/files/2023-09/index060_-_SUBSET-104_v400.pdf (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[162] European Railway Agency. *Responsibilities and rules for the assignment of values to ETCS variables*. Subset-054. Version 4.0.0. 5. Juli 2023. URL: https://www.era.europa.eu/system/files/2023-09/index023_-_SUBSET-054_v400.pdf (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[163] UNISIG. *ATO-OB / ATO-TS FFFIS. Application Layer*. Subset-126. Version 1.1.0. 10. Dez. 2024. URL: https://www.era.europa.eu/sites/default/files/2026-04/index085_subset-126%20v1.1.0.pdf (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[164] UNISIG. *ATO-OB / ATO-TS FFFIS. Transport and Security Layers*. Subset-148. Version 1.0.0. 5. Juli 2023. URL: https://www.era.europa.eu/system/files/2023-09/index086_-_SUBSET-148_v100.pdf (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[165] UNISIG. *Dimensioning and Engineering Rules*. Subset-040. Version 4.0.0. 5. Juli 2023. URL: https://www.era.europa.eu/system/files/2023-09/index013_-_SUBSET-040_v400.pdf (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[166] UNISIG. *Performance Requirements for Interoperability*. Subset-041. Version 4.0.0. 5. Juli 2023. URL: https://www.era.europa.eu/system/files/2023-09/index014_-_SUBSET-041_v400.pdf (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[167] UNISIG. *Safety Requirements for the Technical Interoperability of ETCS in Levels 1 & 2*. Subset-091. Version 4.0.0. 5. Juli 2023. URL: https://www.era.europa.eu/system/files/2023-09/index027_-_SUBSET-091_v400.pdf (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[168] UNISIG. *Trackside-Trainborne FIS for RADIO IN-FILL*. Subset-047. Version 4.0.0. 5. Juli 2023. URL: https://www.era.europa.eu/system/files/2023-09/index019_-_SUBSET-047_v400.pdf (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[169] UNISIG. *Trainborne FFFIS for RADIO IN-FILL*. Subset-048. Version 3.0.0. 3. März 2012. URL: https://www.era.europa.eu/system/files/2023-09/index020_-_subset-048_v300.pdf (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

Normen

[170] *DIN EN 50126-1 (VDE 0115-103-1): 2025-09. Bahnanwendungen – Spezifikation und Nachweis von Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit (RAMS) – Teil 1: Generischer RAMS-Prozess; Deutsche Fassung EN 50126-1:2017 + A1:2024*. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. und VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V., Sep. 2025.

[171] *DIN EN 50126-2 (VDE 0115-103-2): 2018-10. Bahnanwendungen – Spezifikation und Nachweis von Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit (RAMS) – Teil 2: Systembezogene Sicherheitsmethodik; Deutsche Fassung EN 50126-2:2017*. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. und VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V., Okt. 2018.

[172] *DIN EN 50129 (VDE 0813-129): 2019-06. Bahnanwendungen. Telekommunikationstechnik, Signaltechnik und Datenverarbeitungssysteme – Sicherheitsbezogene elektronische Systeme für Signaltechnik; Deutsche Fassung EN 50129:2018: + AC:2019*. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. und VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V., Juni 2019.

[173] *DIN EN 50159 (VDE 0813-159): 2011-04. Bahnanwendungen – Telekommunikationstechnik, Signaltechnik und Datenverarbeitungssysteme. Sicherheitsrelevante Kommunikation in Übertragungssystemen; Deutsche Fassung EN 50159:2010*. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. und VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V., Apr. 2011.

[174] *DIN EN 50716 (VDE 0115-716): 2024-09. Bahnanwendungen. Anforderungen für die Softwareentwicklung; Deutsche Fassung EN 50716:2023*. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. und VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V., Sep. 2024.

[175] *DIN EN 62267 (VDE 0831-267): 2010-07. Bahnanwendungen. Automatischer städtischer schienengebundener Personenverkehr (AUGT) – Sicherheitsanforderungen. (IEC 62267:2009); Deutsche Fassung EN 62267:2009*. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. und VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V., Juli 2010.

[176] *International Standard ISO/IEC 8859-1. Information technology – 8-bit single-byte code graphic character sets –. Part 1: Latin alphabet No. 1*. First Edition. 15. Apr. 1998.

[177] Rail Safety and Standards Board Limited, Hrsg. *Rail Industry Standard RIS-0713-CCS. Lineside Signalling Layout Driveability Assessment Requirements*. Issue 1.1. 13. März 2018.

[178] Reza Rokui et al. *A Framework for Network Slices in Networks Built from IETF Technologies*. Hrsg. von Adrian Farrel und John Drake. RFC 9543. März 2024. DOI: 10.17487/RFC9543.

[179] *Sektorleitlinie für die Zulassungsbewertung von Signal-, Telekommunikations- und Elektrotechnischen Anlagen (Technische Vorschrift)*. Ausgabe 2.0 vom 27.03.2024. Gültig ab 01.06.2024. Arbeitskreis Sektorleitlinie. URL: https://www.eba.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Infrastruktur/AllgemeineVorschriften/VV_GIuV/Sektorleitlinie/22_Sektorleitlinie.html (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

Technisches und betriebliches Regelwerk

[180] CRR on behalf of the Irish Railway industry stakeholders. *Irish Railway Standard IRS-305-A. Requirements for Class A ETCS CT Systems and for IM Operating Rules in the Republic of Ireland (trackside)*. Issue A. 24. Aug. 2022. URL: https://www.crr.ie/assets/files/pdf/220824_irs-305-a.pdf (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[181] DB InfraGO AG. *Handbuch 436 | Zug- und Rangierfahrten im Zugleitbetrieb durchführen (ZLB)*. Version 8.0 - Gültig ab 13.12.2015.

[182] DB InfraGO AG. *Handbuch 437 | Zug- und Rangierfahrten im Signalisierten Zugleitbetrieb durchführen*. Version 5.0 - gültig ab 13.12.2015.

[183] DB InfraGO AG. *Richtlinie 405.0101 | Grundsätze für EBWU*. Version 4.0 - Gültig ab 01.11.2021.

[184] DB InfraGO AG. *Richtlinie 405.0102 | Fahrwegkapazität – Begriffe*. Version 2.0 - Gültig ab 01.10.2022.

[185] DB InfraGO AG. *Richtlinie 405.0103 | Fahrwegkapazität – Zeitverbrauch bei Nutzung der Fahrwegkapazität*. Version 2.0 - Gültig ab 01.10.2022.

[186] DB InfraGO AG. *Richtlinie 405.0104 | Fahrwegkapazität – Kenngrößen und Qualitätsmaßstäbe*. Version 2.3 - Gültig ab 01.10.2022.

[187] DB InfraGO AG. *Richtlinie 405.0105 | Theoretische Grundlagen*. Version 2.2 - Gültig ab 01.01.2019.

[188] DB InfraGO AG. *Richtlinie 405.0201 | Fahrwegkapazität – Grundsätze der Verfahrensweise und Methode – Inhalt und Durchführung eisenbahnbetriebswissenschaftlicher Untersuchungen*. Version 2.0 - Gültig ab 01.10.2022.

[189] DB InfraGO AG. *Richtlinie 405.0204 | Fahrwegkapazität – Grundsätze der Verfahrensweise und Methode – Aufbereitung des Betriebsprogramms*. Version 2.2 - Gültig ab 01.10.2022.

[190] DB InfraGO AG. *Richtlinie 408 – Fahrdienstvorschrift*.

[191] DB InfraGO AG. *Richtlinie 408.0331 | Züge fahren; Zustimmung des Fahrdienstleiters zur Abfahrt auf einem Bahnhof*. Version 10.0 - Gültig ab 14.12.2025.

[192] DB InfraGO AG. *Richtlinie 408.2331 | Züge fahren; Zustimmung des Fahrdienstleiters zur Abfahrt auf einem Bahnhof*. Version 6.0 - Gültig ab 14.12.2025.

[193] DB InfraGO AG. *Richtlinie 413.0301 | Streckenstandards*. Version 4.0 - Gültig ab 01.01.2022.

[194] DB InfraGO AG. *Richtlinie 413.3102 | Gleisarten und Gleislängen*. Version 1.0 - Gültig ab 01.07.2023.

[195] DB InfraGO AG. *Richtlinie 438.000 „Fahrdienstvorschrift; FV-NE“*. Gültig ab 13.12.2020.

[196] DB InfraGO AG. *Richtlinie 483.0101 | PZB-Fahrzeugeinrichtungen bedienen*. Version 8.0 - Gültig ab 14.12.2025.

[197] DB InfraGO AG. *Richtlinie 483.0202 | LZB-Fahrzeugeinrichtungen bedienen; Führerraumanzeigen und Bedienung*. Version 2.0 - Gültig ab 14.12.2025.

[198] DB InfraGO AG. *Richtlinie 483.0701 | ETCS-Fahrzeugeinrichtungen bedienen*. Version 4.0 - Gültig ab 12.12.2021.

[199] DB InfraGO AG. *Richtlinie 800.0120 | Auswahl der Weichen, Kreuzungen und Hemmschuhauswurfvorrichtungen*. Version 1.1 - Gültig ab 15.02.2018.

[200] DB InfraGO AG. *Richtlinie 815.2000 | Grundsätze für die Planung von Bahnübergängen*. Version 1.2 - Gültig ab 30.11.2021.

[201] DB InfraGO AG. *Richtlinie 815.6023 | Bahnübergänge planen und instand halten; LST-Anlagen an BÜSA planen. Überwachungsart ÜS planen*. Version 1.2 - Gültig ab 30.11.2021.

[202] DB InfraGO AG. *Richtlinie 815.6024 | Bahnübergänge planen und instand halten; Signalgesteuerte BÜSA Überwachungsart ÜSoE planen*. Version 1.2 - Gültig ab 30.11.2021.

[203] DB InfraGO AG. *Richtlinie 819.0202 | Signale für Zug- und Rangierfahrten; Hauptsignale*. Version 4.0 - Gültig ab 01.10.2012.

[204] DB InfraGO AG. *Richtlinie 819.0203 | Signale für Zug- und Rangierfahrten; Vorsignale*. Version 3.0 - Gültig ab 01.10.2024.

[205] DB InfraGO AG. *Richtlinie 819.0505 | Flankenschutzgrundsätze*. Version 5.0 - Gültig ab 01.09.2022.

[206] DB InfraGO AG. *Richtlinie 819.1310 | Punktförmige Zugbeeinflussung (PZB) - Grundsätze für das Ausrüsten von Strecken*. Version 5.0 - Gültig ab 29.07.2024.

[207] DB InfraGO AG. *Richtlinie 819.1311 | Punktförmige Zugbeeinflussung (PZB); Planen der induktiven Sicherung anfahrender Züge (INA)*. Version 2.0 - Gültig ab 29.07.2024.

[208] DB InfraGO AG. *Richtlinie 819.1340 | Grundsätze für die Ausrüstung mit ETCS*. Version 1.1 - Gültig ab 20.09.2023.

[209] DB InfraGO AG. *Richtlinie 819.1343 | Grundsätze zur Erstellung der Entwurfsplanung zur Ausrüstung von Strecken mit ETCS Level 2*. Version 2.1 - Gültig ab 10.01.2024.

[210] DB InfraGO AG. *Richtlinie 819.1344 | Grundsätze zur Erstellung der Ausführungsplanung PT1 mit ETCS Level 2*. Version 2.2- Gültig ab 12.05.2021.

[211] DB InfraGO AG. *Richtlinie 819.1347 | Vorgaben bei Doppelausrüstung (ETCS und PZB/LZB)*. Version 2.1 - Gültig ab 13.12.2023.

[212] DB InfraGO AG. *Richtlinie 819.1350 | Balisengestützter Systemwechsel von Class-B Systemen (ETCS-basierte Transition) Grundsätze für das Ausrüsten von Strecken*. Version 1.0 - Gültig ab 01.06.2018.

[213] DB InfraGO AG. *Richtlinien 301 – Signalbuch*. Version 12.0 - Gültig ab 15.12.2024.

[214] DB InfraGO AG. *Richtlinien-Familie 405 | Fahrwegkapazität*.

[215] DB InfraGO AG. *Richtlinien-Familie 815 | Bahnübergänge planen und instand halten*.

[216] DB InfraGO AG. *Richtlinien-Familie 819 | Infrastruktur gestalten*.

[217] DB InfraGO AG. *Richtlinien-Familie 819 | LST-Anlagen planen*.

[218] DB InfraGO AG. *Richtlinien-Familie 848 | Digitale Bahntechnik planen und bauen*.

[219] International Union of Railways. *UIC Leaflet 406: Capacity*. 2. Aufl. Paris, 2013.

[220] International Union of Railways. *UIC leaflet 544-1. Brakes - Braking Performance*. 6. Aufl. Okt. 2014.

[221] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V. (VDV). *Fahrdienstvorschrift für Nichtbundeseigene Eisenbahnen (FV-NE)*. – Ausgabe 1984 – Fassung 2024. Gültig ab 15.12.2024. URL: https://vdv-regelwerke.de/wp-content/uploads/2024/04/VDV_FV_NE_B22_komplett_WEB.pdf (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[222] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V. (VDV). *VDV-Schrift 332 „Sicherheitsintegritätsanforderungen für Bahnsignalanlagen bei Nichtbundeseigenen Eisenbahnen (NE)“*. Ausgabe 07/08.

[223] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V. (VDV). *VDV-Schrift 334 „Richtlinien für die Zulassung und Abnahme von Bahnsignalanlagen bei Nichtbundeseigenen Eisenbahnen (SIG RZA-NE)“*. Ausgabe 11/07.

[224] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V. (VDV). *VDV-Schrift 360 „Eisenbahn-Stell-Einrichtungen (ESE)“*. Ausgabe 11/07.

[225] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V. (VDV). *VDV-Schrift 361 „Eisenbahn-Signal-Anlagen (ESA)“. Signaltechnische Grundsätze für Nichtbundeseigene Eisenbahnen*. Ausgabe 6/2016.

[226] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V. (VDV). *VDV-Schrift BÜV-NE „Vorschrift für die Sicherung der Bahnübergänge bei nichtbundeseigenen Eisenbahnen“*. Ausgabe 08/2020.

Rechtsvorschriften

[227] *Allgemeines Eisenbahngesetz vom 27. Dezember 1993 (BGBl. I S. 2378, 2396; 1994 I S. 2439), das zuletzt durch Artikel 3 des Gesetzes vom 22. Dezember 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 409) geändert worden ist*.

[228] *Bundesgesetz über Eisenbahnen, Schienenfahrzeuge auf Eisenbahnen und den Verkehr auf Eisenbahnen (Eisenbahngesetz 1957 – EisbG), BGBl. Nr. 60/1957. Zuletzt geändert durch BGBl. I Nr. 115/2024*.

[229] *Durchführungsverordnung (EU) 2018/868 der Kommission vom 13. Juni 2018 zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 1301/2014 und der Verordnung (EU) Nr. 1302/2014 hinsichtlich der Bestimmungen über Energiemesssysteme und Energiedatenerfassungssysteme*. URL: http://data.europa.eu/eli/reg_impl/2018/868/oj.

[230] *Durchführungsverordnung (EU) 2019/773 der Kommission vom 16. Mai 2019 über die technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Verkehrsbetrieb und Verkehrssteuerung" des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union und zur Aufhebung des Beschlusses 2012/757/EU*. URL: http://data.europa.eu/eli/reg_impl/2019/773/oj.

[231] *Durchführungsverordnung (EU) 2019/776 der Kommission vom 16. Mai 2019 zur Änderung der Verordnungen (EU) Nr. 321/2013, (EU) Nr. 1299/2014, (EU) Nr. 1301/2014, (EU) Nr. 1302/2014, (EU) Nr. 1303/2014 und (EU) 2016/919 der Kommission sowie des Durchführungsbeschlusses 2011/665/EU der Kommission im Hinblick auf die Angleichung an die Richtlinie (EU) 2016/797 des Europäischen Parlaments und des Rates und Umsetzung der in dem Delegierten Beschluss (EU) 2017/1474 der Kommission festgelegten spezifischen Ziele*. URL: http://data.europa.eu/eli/reg_impl/2019/776/oj.

[232] *Durchführungsverordnung (EU) 2020/387 der Kommission vom 9. März 2020 zur Änderung der Verordnungen (EU) Nr. 321/2013, (EU) Nr. 1302/2014 und (EU) 2016/919 hinsichtlich der Erweiterung des Verwendungsgebiets und der Übergangszeiträume*. URL: http://data.europa.eu/eli/reg_impl/2020/387/oj.

[233] *Durchführungsverordnung (EU) 2021/2238 der Kommission vom 15. Dezember 2021 zur Änderung der Durchführungsverordnung (EU) 2019/773 in Bezug auf den Übergang zur Aufhebung der Sonderfälle für Zugschlusssignale*. URL: http://data.europa.eu/eli/reg_impl/2021/2238/oj.

[234] *Durchführungsverordnung (EU) 2023/1693 der Kommission vom 10. August 2023 zur Änderung der Durchführungsverordnung (EU) 2019/773 der Kommission über die technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Verkehrsbetrieb und Verkehrssteuerung" des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union*. URL: http://data.europa.eu/eli/reg_impl/2023/1693/oj.

[235] *Durchführungsverordnung (EU) 2023/1694 der Kommission vom 10. August 2023 zur Änderung der Verordnungen (EU) Nr. 321/2013, (EU) Nr. 1299/2014, (EU) Nr. 1300/2014, (EU) Nr. 1301/2014, (EU) Nr. 1302/2014, (EU) Nr. 1304/2014 und der Durchführungsverordnung (EU) 2019/777*. URL: http://data.europa.eu/eli/reg_impl/2023/1694/oj.

[236] *Durchführungsverordnung (EU) 2023/1695 der Kommission vom 10. August 2023 über die technische Spezifikation für die Interoperabilität der Teilsysteme „Zugsteuerung, Zugsicherung und Signalgebung" des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union und zur*

Aufhebung der Verordnung (EU) 2016/919. URL: http://data.europa.eu/eli/reg_impl/2023/1695/oj.

[237] *Durchführungsverordnung (EU) Nr. 402/2013 der Kommission vom 30. April 2013 über die gemeinsame Sicherheitsmethode für die Evaluierung und Bewertung von Risiken und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 352/2009*. URL: http://data.europa.eu/eli/reg_impl/2013/402/oj.

[238] *Durchführungsverordnung(EU) 2015/1136 der Kommission vom 13. Juli 2015 zur Änderung der Durchführungsverordnung (EU) Nr. 402/2013 über die gemeinsame Sicherheitsmethode für die Evaluierung und Bewertung von Risiken*. URL: http://data.europa.eu/eli/reg_impl/2015/1136/oj.

[239] *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*.

[240] Eisenbahn-Bundesamt, Hrsg. *Verwaltungsvorschrift für die Überwachung der Erstellung von Signal-, Telekommunikations- und Elektrotechnischen Anlagen (VV BAU-STE)*. Version Ausgabe 5.1, Gültig ab 15.07.20220. Bonn.

[241] Eisenbahn-Bundesamt Sachgebiet 333, Hrsg. *Zusammenstellung der Bestimmungen der Eisenbahn-Signalordnung 1959 (ESO 1959), einschließlich der gemäß ESO (4) genehmigten Signale mit vorübergehender Gültigkeit und der gemäß ESO (5) erlassenen Anweisungen zur Durchführung der ESO, gültig für das Netz der Eisenbahnen des Bundes (EbB)*. 13. Dez. 2020. URL: https://www.eba.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/GesetzeundRegelwerk/Bundesrecht/11_eso_2020-12-13.pdf (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[242] *Eisenbahn-Inbetriebnahmegenehmigungsverordnung vom 26. Juli 2018 (BGBl. I S. 1270), die durch Artikel 2 der Verordnung vom 17. Juni 2020 (BGBl. I S. 1298) geändert worden ist*.

[243] *Eisenbahn-Prüfsachverständigenverordnung vom 5. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2077)*.

[244] *Eisenbahn-Signalordnung 1959 in der im Bundesgesetzblatt Teil III, Gliederungsnummer 933-6, veröffentlichten bereinigten Fassung, die zuletzt durch Artikel 517 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist*.

[245] *Eisenbahngesetz (EBG) vom 20. Dezember 1957 (Stand am 1. Juli 2024). SR 742.101*.

[246] *Entscheidung Nr. 1692/96/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Juli 1996 über gemeinschaftliche Leitlinien für den Aufbau eines transeuropäischen Verkehrsnetzes*. Nicht mehr in Kraft. URL: http://data.europa.eu/eli/dec/1996/1692/oj.

[247] *Richtlinie (EU) 2016/797 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Mai 2016 über die Interoperabilität des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union (Neufassung)*. URL: http://data.europa.eu/eli/dir/2016/797/oj.

[248] *Richtlinie 2001/16/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. März 2001 über die Interoperabilität des konventionellen transeuropäischen Eisenbahnsystems*. Nicht mehr in Kraft. URL: http://data.europa.eu/eli/dir/2001/16/oj.

[249] *Richtlinie 2004/50/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. April 2004 zur Änderung der Richtlinie 96/48/EG des Rates über die Interoperabilität des transeuropäischen Hochgeschwindigkeitsbahnsystems und der Richtlinie 2001/16/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über die Interoperabilität des konventionellen transeuropäischen Eisenbahnsystems*. Nicht mehr in Kraft. URL: http://data.europa.eu/eli/dir/2004/50/oj.

[250] *Richtlinie 2008/57/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Juni 2008 über die Interoperabilität des Eisenbahnsystems in der Gemeinschaft (Neufassung)*. Nicht mehr in Kraft. URL: http://data.europa.eu/eli/dir/2008/57/oj.

[251] *Richtlinie 2012/34/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. November 2012 zur Schaffung eines einheitlichen europäischen Eisenbahnraums (Neufassung)*. URL: http://data.europa.eu/eli/dir/2012/34/oj.

[252] *Richtlinie 96/48/EG des Rates vom 23. Juli 1996 über die Interoperabilität des transeuropäischen Hochgeschwindigkeitsbahnsystems*. Nicht mehr in Kraft. URL: http://data.europa.eu/eli/dir/1996/48/oj.

[253] *Straßenverkehrs-Ordnung vom 6. März 2013 (BGBl. I S. 367), die zuletzt durch Artikel 24 der Verordnung vom 11.Dezember 2024 (BGBl. 2024 I S. 411) geändert worden ist*.

[254] *Verordnung (EU) 2024/1679 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Juni 2024 über Leitlinien der Union für den Aufbau des Transeuropäischen Verkehrsnetzes, zur Änderung der Verordnungen (EU) 2021/1153 und (EU) Nr. 913/2010 und zur Aufhebung der Verordnung (EU) Nr. 1315/2013*. URL: http://data.europa.eu/eli/reg/2024/1679/oj.

[255] *Verordnung (EU) Nr. 1302/2014 der Kommission vom 18. November 2014 über eine technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeuge — Lokomotiven und Personenwagen“ des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union Text von Bedeutung für den EWR*. URL: http://data.europa.eu/eli/reg/2014/1302/oj.

[256] *Verordnung (EU) Nr. 1315/2013 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2013 über Leitlinien der Union für den Aufbau eines transeuropäischen Verkehrsnetzes und zur Aufhebung des Beschlusses Nr. 661/2010/EU*. Nicht mehr in Kraft. URL: http://data.europa.eu/eli/reg/2013/1315/oj.

[257] *Verordnung des Bundesministers für Verkehr, Innovation und Technologie über den Bau, den Betrieb und die Organisation von Eisenbahnen (Eisenbahnverordnung 2003 – EisbVO 2003), BGBl. II Nr. 209/2003. Zuletzt geändert durch BGBl. II Nr. 156/2014*.

[258] *Verordnung über Bau und Betrieb von Eisenbahnen (Eisenbahnverordnung, EBV) vom 23. November 1983 (Stand am 1. Juli 2024). SR 742.141.1*.

[259] *Verordnung über den Bau und Betrieb von Eisenbahnen (Eisenbahnbau- und -betriebsverordnung – EisbBBV), BGBl. II Nr. 398/2008. Zuletzt geändert durch BGBl. I Nr. 125/2006*.

[260] *Verordnung über die Interoperabilität des transeuropäischen Eisenbahnsystems (Transeuropäische-Eisenbahn-Interoperabilitätsverordnung – TEIV) vom 5. Juli 2007 (BGBl I S. 1305), zuletzt geändert durch die Zehnte Verordnung zur Änderung eisenbahnrechtlicher Vorschriften vom 12. Mai 2016*. Nicht mehr in Kraft.

Internetseiten

[261] Bane NOR. *ERTMS - fremtidens signalsystem*. URL: https://www.banenor.no/prosjekter/alle-prosjekter/nytt-digitalt-signalsystem/ (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[262] Banedanmark. *Digitale signalsystemer på fjernbanen og S-banen*. 2024. URL: https://www.bane.dk/Borger/Baneprojekter/Signalprogrammet (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[263] Bundesministerium für Verkehr. *Digitalisierung bei der Schiene wird vorangetrieben*. Pressemitteilung. 17. Apr. 2026. URL: https://www.bmv.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2026/030-schnieder-ertms-Koordinierungsstelle.html (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[264] DB InfraGO AG. *ETCS Migrationsstrategie*. 2. Juli 2026. URL: https://www.dbinfrago.com/web/schienennetz/etcs/etcs-migrationsstrategie-11089586 (zuletzt geprüft am 26. 07. 2026).

[265] DB InfraGO AG. Netzzugang und Regulierung. *Infrastrukturregister. Interaktive Karte*. 2024. URL: https://geovdbn.deutschebahn.com/isr (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[266] Deutsche Bahn AG. Digitale Schiene Deutschland. *Betriebliches Regelwerk. Richtlinienfamilie 400*. 2024. URL: https://digitale-schiene-deutschland.de/Betriebliches_Regelwerk_Ril400 (zuletzt geprüft am 27. 11. 2024).

[267] Digirail. *Digirail*. 2024. URL: https://digirata.fi/en/ (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[268] Europäische Union. *Transeuropäische Netze (TEN)*. URL: https://eur-lex.europa.eu/DE/legal-content/glossary/trans-european-networks-tens.html (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[269] Europäische Union – Generaldirektor Kommunikation. *Arten von Rechtsvorschriften*. URL: https://european-union.europa.eu/institutions-law-budget/law/types-legislation_de (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[270] Europe's Rail. *Shift2Rail*. URL: https://rail-research.europa.eu/shift2rail/ (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[271] European Commission – Directorate-General for Mobility and Transport. *ERTMS*. URL: https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/rail/ertms_en (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[272] European Union Agency for Railways. *European Rail Traffic Management System (ERTMS)*. URL: https://www.era.europa.eu/domains/infrastructure/european-rail-traffic-management-system-ertms_en (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[273] European Union Agency for Railways. *Technical Specifications for Interoperability (TSIs)*. URL: https://www.era.europa.eu/domains/technical-specifications-interoperability_en (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[274] Freie und Hansestadt Hamburg. Behörde für Verkehr und Mobilitätswende. *Hamburg bekommt modernstes S-Bahn-Netz mit komplett digitalisiertem Betrieb*. Pressemitteilung. Hamburg, 22. Jan. 2025. URL: https://www.hamburg.de/politik-und-verwaltung/behoerden/bvm/aktuelles/pressemeldungen/hamburg-bekommt-modernstes-s-bahn-netz-mit-komplett-digitalisiertem-betrieb-1011312 (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[275] INFRABEL nv. *Projects & realizations. ETCS*. 7. Dez. 2025. URL: https://infrabel.be/en/project/etcs (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[276] Institut für Regional- und Fernverkehrsplanung iRFP e. K. *Das Fahrplanbearbeitungssystem FBS*. URL: https://www.irfp.de/das-fahrplanbearbeitungssystem-fbs.html (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[277] ÖBB-Infrastruktur Aktiengesellschaft. *ETCS Ausbau*. 2024. URL: https://infrastruktur.oebb.at/de/geschaeftspartner/schienennetz/dokumente-und-daten/etcs-zugbeeinflussung/etcs-ausbau (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[278] Tom Preston-Werner. *Semantic Versioning 2.0.0*. URL: https://semver.org/spec/v2.0.0.html (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[279] Python Software Foundation. *What's New In Python 3.13*. Hrsg. von Adam Turner und Thomas Wouters. 7. Okt. 2024. URL: https://docs.python.org/3/whatsnew/3.13.html (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[280] quattron management consulting gmbh. *LUKS – Leistungsuntersuchung Knoten und Strecken*. URL: https://www.quattron.com/leistungen/software-it-digital-data-management/luks/ (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[281] SNCF Réseau. *L'ERTMS, une signalisation performante au standard européen*. 3. Okt. 2024. URL: https://www.sncf-reseau.com/fr/le-reseau-de-demain/faire-circuler-plus-de-trains-grace-lertms (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[282] Technische Universität Dresden. Institut für Verkehrstelematik. *Neue Sekundärbahn - Innovative Fahrzeugbewegungssicherung zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit von Bahnstrecken mit regionalem Verkehr*. 11. Okt. 2018. URL: https://tu-dresden.de/bu/verkehr/vis/itvs/forschung/forschungsprojekte/neue-sekundaerbahn-innovative-fahrzeugbewegungssicherung-zur-verbesserung-der-wirtschaftlichkeit-von-bahnstrecken-mit-regionalem-verkehr (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[283] UNIFE. *Deployment Statistics*. 2024. URL: https://www.ertms.net/facts-figures/deployment-statistics/ (zuletzt geprüft am 05. 06. 2026).

[284] Vodafone GmbH. *Automatisierte S-Bahnen in Hamburg ab sofort im Livebetrieb*. 22. Sep. 2022. URL: https://newsroom.vodafone.de/automatisierte-s-bahnen-in-hamburg-ab-sofort-im-livebetrieb (zuletzt geprüft am 14. 08. 2026).

Datenverfügbarkeit

Ein Großteil der in dieser Dissertation verwendeten, erstellten und analysierten Datensätze ist über das Repositorium Zenodo öffentlich zugänglich und kann unter dem folgenden DOI eingesehen und heruntergeladen werden: 10.5281/zenodo.15173909.

Aus urheberrechtlichen Gründen können jedoch nicht alle Daten veröffentlicht werden, da die Rechte Dritter an Teilen der Daten einer offenen Bereitstellung entgegenstehen. Informationen zu diesen eingeschränkten Datensätzen sowie zu den Möglichkeiten eines individuellen Zugangs sind auf Anfrage beim Autor erhältlich.

Anhang

A Im Level 1 mögliche ETCS-Betriebsarten

Nachfolgend werden die im Level 1 relevanten Betriebsarten in der Reihenfolge der Spezifikation jeweils kurz vorgestellt und ihre möglichen Anwendungsszenarien generisch aufgezeigt.

In der Betriebsart Isolation (IS) ist die ETCS-Fahrzeugeinrichtung physisch von dem Rest des Fahrzeugs (insbesondere den Bremssystemen) getrennt und ausgeschaltet, z. B. durch Umlegen eines entsprechenden Störschalters. ETCS kann daher keine Überwachungsfunktionen bereitstellen, die Sicherheitsverantwortung liegt vollständig beim Tf und in den betrieblichen Regelungen.

Wenn das ETCS-Fahrzeuggerät nicht mit Energie versorgt ist, wechselt es in die Betriebsart No Power (NP). Dabei wird ständig die EB kommandiert sowie – wenn fahrzeugseitig implementiert – die Cold Movement Detection (CMD) aktiviert, um Bewegungen des Fahrzeugs bspw. durch Schleppen zu erkennen.

Im Fehlerfall geht das ETCS-System in die Betriebsart System Failure (SF) über und kommandiert dauerhaft eine EB.

Ein Fahrzeug wechselt automatisch in die Betriebsart Sleeping (SL), wenn es von einem anderen Fahrzeug ferngesteuert wird und kein eigener Führerstand aktiv ist. Daher führt die OBU keine Überwachungsfunktionen aus, die eigene Position wird jedoch weiterhin aktualisiert.

Die Betriebsart Stand By (SB) wird als die Default-Betriebsart bezeichnet und kann nicht manuell gewählt werden. Das Fahrzeuggerät ist eingeschaltet und bereit, die sogenannte *Start of mission procedure* mit Zugdateneingabe und Wahl des ETCS-Levels durchzuführen. Es wird überwacht, dass sich das Fahrzeug nicht weiter als der entsprechende NV bewegt, ansonsten erfolgt ein Bremseingriff bis zum Stillstand.

Für das freie Rangieren mit aktiver ETCS-Fahrzeugeinrichtung wird die Betriebsart SH genutzt. Dabei wird lediglich einen feste, maximale Geschwindigkeit überwacht und deren Einhaltung gewährleistet. Es sind keine Zugdaten notwendig (da nicht sinnvoll) und Richtungswechsel können schnell vollzogen werden. Die Sicherheitsverantwortung für die Fahrt liegt im Wesentlichen beim Tf. Als rudimentäre Sicherungsmaßnahme existiert quasi eine Fahrsperrenfunktion. Diese kann beim Überfahren von Halt zeigenden, mit ETCS ausgerüsteten Signalen eine Zwangsbremsung auslösen. Alternativ kann dem Fahrzeug eine Liste von erwarteten, zulässig zu überfahrenden Balisengruppen bekanntgemacht werden. Erkennt es dann eine Balisengruppe, die nicht Element dieser Liste ist, wird ebenso eine Zwangsbremsung ausgelöst. Da in dieser Betriebsart auch geschobene Fahrten möglich sind, kann ein Bremseingriff technisch bedingt erst dann erfolgen, wenn das Tfz die entsprechende Balisengruppe erreicht.

Eine vollständige Überwachung der Fahrbewegungen und die Anzeige vollständiger Führungsgrößen kennzeichnen die Betriebsart FS. Diese Betriebsart wird vom Fahrzeug automatisch gewählt, wenn alle Bedingungen dafür erfüllt sind. Dazu zählen das Vorhandensein

eines gültigen Geschwindigkeits- und Gradientenprofils über die gesamte Zuglänge sowie eine entsprechende MA. Ebenso müssen die Zugdaten eingegeben und bestätigt sein. FS kennzeichnet die bezogen auf die Überwachungsfunktionen höchste Betriebsart von ETCS. Es findet eine kontinuierliche Überwachung anhand eines zugspezifischen dynamischen Geschwindigkeitsprofils statt. Die auf dem DMI angezeigten Führungsgrößen umfassen mindestens die tatsächliche Geschwindigkeit, die aktuell zulässige Geschwindigkeit, sowie die Entfernung bis zum nächsten Zielpunkt und der dort maximal zulässigen Geschwindigkeit. Mit Ausnahme der Annäherung an ein EOA mit RS ist ETCS für die Sicherung der Zugbewegung verantwortlich.

Mit der Betriebsart SR wird die Verantwortung für die Sicherheit der Fahrzeugbewegungen an den Tf übertragen. Im Level 1 stellt diese Betriebsart einen regulären Betriebszustand im Regelbetrieb nach dem Aufstarten dar, bis auf dem Fahrzeug eine gültige MA vorliegt. Dies bedingt die Vorbeifahrt des vollständigen Zuges an der entsprechenden Balisengruppe, damit alle Infrastruktureigenschaften über die gesamte Zuglänge bekannt sind und entsprechend von ETCS berücksichtigt und überwacht werden können. Eine Übertragung der vor der Balisengruppe gültigen Infrastrukturdaten ist nicht vorgesehen. Des Weiteren wird SR auch als Rückfallebene genutzt, um beispielsweise ein Halt zeigendes Signal oder eine EOA zu überfahren, bzw. wenn streckenseitige Störungen die Vergabe einer regulären MA verhindern. Die Überwachung beschränkt sich auf eine als NV vorgegebene maximal zulässige Geschwindigkeit sowie optional auf maximale Zeiten oder Distanzen, während derer ein Fahrzug in der Betriebsart SR bewegt werden darf. Des Weiteren ist eine Fahrsperrenfunktion analog zur Betriebsart SH möglich.

Die Betriebsart OS kann ausschließlich von der Infrastruktur vorgegeben werden. Damit wird angekündigt, dass die Fahrt in einen Bereich führt, in dem der Fahrweg nicht zwangsläufig frei sein muss. Beispielsweise ist dem Stellwerkssystem der tatsächliche Belegungszustand unbekannt oder aber er ist bekannt und nicht „frei“. In der Betriebsart OS wird also die Verantwortung für das Feststellen des freien Fahrwegs bzw. das Anhalten von etwaigen Hindernissen an den Tf übertragen. Letzteres tritt z. B. bei der Einfahrt in ein (teil-)besetztes Gleis auf. In dieser Betriebsart erfolgt weiterhin eine Überwachung anhand der zugrundeliegenden MA. Die Anzeige der Führungsgrößen ist standardmäßig unterdrückt, kann jedoch manuell aktiviert werden. Die Betriebsart kann auch zur Anwendung kommen, wenn Geschwindigkeits- und/oder Gradientenprofil nicht für die gesamte Zuglänge vorliegen.

Beim Überfahren eines EOA oder LOA und in gewissen Fehlerfällen erfolgt der Wechsel in die Betriebsart Trip (TR). Dabei wird eine nicht auflösbare Zwangsbremsung bis zum Stillstand ausgelöst und nach dem Stillstand ebendieser überwacht. Auf dem DMI wird eine Textmeldung zum Grund des Trip angezeigt. Nach Stillstand muss eine Bestätigung durch den Tf erfolgen.

Nach der Bestätigung der Zwangsbremsung durch den Tf wechselt das fahrzeugseitige ETCS-System in die Betriebsart Post Trip (PT). Der Grund des vorherigen Trip wird weiterhin angezeigt, um bei der Umsetzung der technisch und betrieblich notwendigen Handlungen zu unterstützen. Im Level 1 ist die Weiterfahrt bis zum Erhalt einer neuen vollständigen MA ausschließlich in der Betriebsart SR möglich.

Ein Tfz, welches als zusätzliches Tfz genutzt wird und dabei nicht mit dem führenden Fahrzeug elektrisch verbunden, sondern mit einem eigenen Tf besetzt ist, muss in die Betriebsart Non Leading (NL) versetzt werden. Eine Überwachung der Fahrzeugbewegungen findet in dieser Betriebsart nicht statt, die Position wird jedoch weiterhin aktualisiert.

Wird das Fahrzeug nicht vom Tf, sondern durch ATO gefahren, befindet sich das Fahrzeuggerät in der Betriebsart Automated Driving (AD). Diese Betriebsart muss nach den aktuellen Spezifikationen, die nur den GoA 2 enthalten, aktiv vom Tf angefordert werden; er kann ihn auch jederzeit wieder verlassen und die Kontrolle über das Fahrzeug übernehmen. Die Überwachungsfunktionen entsprechen denen in der Betriebsart FS mit der Ausnahme, dass beim Überschreiten der SBI keine Intervention erfolgt. Mit Stillstand an einem geplanten Halt wird die Betriebsart AD wieder automatisch deaktiviert.

In der Betriebsart Reversing (RV) ist die Rückwärtsfahrt eines Zuges vom besetzten Führerstand an der (ursprünglichen) Zugspitze erlaubt. Primärer Anwendungszweck ist das schnellstmögliche Verlassen eines Gefahrenbereiches, bspw. bei einem Brandfall im Tunnel unter Wahrung einer technischen Überwachung. Dafür wird einerseits eine maximale Geschwindigkeit überwacht, anderseits eine maximale Distanz, die sich der Zug entgegen der ursprünglichen Fahrtrichtung bewegen darf. Einige Alarme und Systemeingriffe werden in dieser Betriebsart unterdrückt.

Zugbewegungen in der Betriebsart LS finden ähnlich wie in der Betriebsart FS unter ETCS-Überwachung statt. Allerdings werden keine Führungsgrößen angezeigt, die Überwachung findet verdeckt im Hintergrund statt. Daher sind in jedem Fall die Außensignale weiterhin maßgebend und damit zu beachten, sodass bei LS nicht von einer Führerstandssignalisierung gesprochen wird. Der Wechsel in diese Betriebsart erfolgt automatisch, wenn dies von der Infrastruktur kommandiert wird und alle Bedingungen erfüllt sind. Die Überwachung findet anhand eines zugspezifischen dynamischen Geschwindigkeitsprofils statt. Abweichend von FS kann LS auch aktiv sein, wenn Geschwindigkeits- und Gradientenprofil noch nicht für die gesamte Zuglänge, sondern nur ab der Zugspitze bekannt sind. LS wird meist angewendet, um mit Bestandssystemen die interoperable Befahrbarkeit einer Infrastruktur herzustellen und das Überwachungsverhalten bestehender (meist punktförmiger) Zugbeeinflussungssysteme nachzubilden.

Die Betriebsart Passive Shunting (PS) wird primär auf gekuppelten, nicht arbeitenden und nicht ferngesteuerten Tfz beim Rangieren genutzt. Ein weiteres Anwendungsszenario sind rangierende Tfz mit einem ETCS-Fahrzeuggerät, aber zwei Führerständen. Ist beim Richtungswechsel keiner der Führerstände besetzt, wird die OBU in die Betriebsart PS versetzt.

B Referenzierte ETCS-Pakete

Die folgenden ETCS-Pakete sind im Verlauf der Arbeit aufgeführt. In Tabelle B.1 werden sie mit dem Wortlaut der Spezifikation [149] inklusive kurzer Erläuterung aufgeführt.

Tab. B.1: Liste referenzierter ETCS-Pakete.

Number	Name	Description
0	Virtual Balise Cover marker	Indication to on-board that the telegram can be ignored according to a VBC
3	National Values	Downloads a set of National Values to the train
5	Linking	Linking Information.
6	Virtual Balise Cover order	The packet sets/removes a Virtual Balise Cover
12	Level 1 Movement Authority	Transmission of a movement authority for Level 1.
16	Repositioning Information	Transmission of the update of an MA section
21	Gradient Profile	Transmission of the gradient.
27	International Static Speed Profile	Static speed profile and optionally speed limits depending on the international train category
32	Session management for RBC interfaced to FRMCS only	Packet to give the identity of the RBC with which a session shall be established or terminated.
39	Track Condition Change of traction system	The packet gives information about change of the traction system.
41	Level Transition Order	Packet to identify where a level transition shall take place. In case of mixed levels, the successive M_LEVELTR's go from the highest priority level to the lowest one.
42	Session Management for RBC interfaced to GSM-R	Packet to give the identity and telephone number of the RBC with which a session shall be established or terminated.
45	Conditional Level Transition Order	Packet for a conditional level transition. The successive M_LEVELTR's go from the highest priority level to the lowest one.
52	Permitted Braking Distance Information	This packet requests the on-board calculation of speed restrictions which ensure a given permitted brake distance in case of an EB, or SB, intervention
65	Temporary Speed Restriction	Transmission of temporary speed restriction.
66	Temporary Speed Restriction Revocation	Transmission of temporary speed restriction revocation.
67	Track Condition Big Metal Masses	The packet gives details concerning where to ignore integrity check alarms of balise transmission due to big metal masses trackside.
68	Track Condition	The packet gives details concerning the track ahead to support the driver when e.g. lower pantograph
70	Route Suitability Data	The packet gives the characteristics needed to enter a route.
73	Packets for sending plain text messages.	*(none)*
80	Mode profile	Mode profile associated to an MA

Tab. B.1: Liste referenzierter ETCS-Pakete (Fortsetzung).

Number	Name	Description
88	Level Crossing information	Level Crossing information
132	Danger for Shunting information	Transmission of the aspect of a shunting signal
136	Infill location reference	Defines location reference for all data contained in the same radio message or balise/loop telegram respectively, following this packet.
137	Stop if in Staff Responsible	Information to stop a train in staff responsible.
141	Default Gradient for Temporary Speed Restriction	It defines a default gradient to be used for TSR supervision when no gradient profile (packet 21) is available
145	Inhibition of balise group message consistency reaction	Indication to on-board that the balise group message consistency reaction (service brake command) can be inhibited for this balise group message only, in case one or more balise telegram(s) of the group is/are missing or is/are detected but not decoded.
254	Default balise, loop or RIU information	Indication to on-board that balise telegram, loop message or RIU information contains default information due to a fault of the trackside equipment.
255	End of Information	This packet consists only of NID_PACKET containing 8 bit 1s. It acts as a finish flag; the receiver will stop reading the remaining part of the message/telegram when receiving eight bits set to one in the NID_PACKET field.

C Anhang zu Abschnitt 4.2

Ergänzend zu den Festlegungen in Tabellen 4.1 bis 4.8 auf Seiten 56–60 werden hier weitere, dort nicht explizit genannte Signale und Orientierungszeichen sowie deren Abbildung in ETCS aufgeführt.

Tab. C.1: Umsetzung von weiteren ortsfesten Signalen in ETCS.

Signale	Umsetzung	Bemerkung
Zs 1	Pakete 12, 21, 27, 132 und 137	optional, zusätzliches Paket 73 optional
Zs 2 & Zs 2v	Paket 73	–
Zs 3 & Zs 3v	Paket 27	–
Zs 6	Paket 73	optional
Zs 7	Pakete 12, 21, 27, 132 und 137	optional, zusätzliche Pakete 65 und 73 optional
Zs 8	Pakete 12, 21, 27, 132 und 137	optional, zusätzliches Paket 73 optional
Zs 9	Paket 88	–
Zs 10	Paket 27	–
Zs 13	Paket 73	–
Lf 1 – 3	Paket 65	–
Lf 4 & Lf 5	Paket 27 oder 65	–
Lf 6 & Lf 7	Paket 27	–
Sh 0 & Sh 1	Pakete 12, 21, 27, 132 und 137	
El 1v, El 1 & El 2	Paket 68	bei Systemwechsel zusätzlich Paket 39
El 3 – 5	Paket 68	bei Systemwechsel zusätzlich Paket 39
El 6	Paket 70	optional
Ne 1	Pakete 12, 21, 27, 132 und 137	–
Ne 2	*wie Vr 0*	wenn alleinstehend
Ne 6	Paket 73	optional
Ne 12	Paket 73	optional
Ne 13a	Paket 73	optional
Ne 13b	Paket 73	optional
Ne 14	Pakte 137	in der Regel mit Haupt- oder Sperrsignal kombiniert
So 106	*wie Vr 0*	–
Bü 2 & Bü 3	Paket 73	–
So 14 & So 15	Paket 73	–
Bü 4	Paket 68	in wenigen Anwendungsfällen alternativ Paket 73
Pf 2	Paket 68	–
Bü 5	Paket 73	–

Tab. C.2: Umsetzung von weiteren ortsfesten Orientierungszeichen in ETCS.

Orientierungszeichen	**Umsetzung**	**Bemerkung**
Bü-Ankündetafel	Paket 73	optional
Bü-Kennzeichentafel	Paket 73	optional
Zugfunktafel	Paket 73	–
„ICE“-Zeichen	*wie El-Signale*	–
NBÜ-Kennzeichen	Paket 68	–
Bezeichnungstafel für Tunnel	Paket 73	optional
GSM-R-Funknetztafel	Paket 73	–

D Anhang zu Abschnitt 4.4

Beispiele von JSON-Dateien der Parametereingabe (Code D.1) und einer Ergebnisausgabe (Code D.2) der Optimierung von Infill-Balisengruppen.

Code D.1: Beispiel einer JSON-Datei mit Eingangsparametern.

```
{
    "track": {
        "line_speed": 160,
        "release_speed": 20,
        "gradient": 0,
        "balises": 3,
        "balise_group_distance": 50,
        "balise_positions": [1500, 0, 0]
    },
    "train": {
        "speed": 160,
        "deceleration": {
            "steps": [0, 80, 160],
            "values": [0, -0.7, -0.8]
        },
        "acceleration": {
            "steps": [0, 30, 80, 160],
            "values": [0, 0.5, 0.4, 0.3]
        },
        "rotating_mass": 10,
        "indication_point": 1400,
        "min_cruise_time": 6,
        "processing_time": 1.5
    },
    "tech": {
        "steps": 10,
        "weighting": "TIME",
        "plot_trajectories": true,
        "plot_3d": true,
        "rotate_plot": false,
        "locale": "de"
    }
}
```

Code D.2: Beispiel der Ergbnissausgabe im JSON-Format.

```
    "results": {
        "infill_positions": [1500, 665, 256],
        "additional_runtime": 61.9
    }
```

E Anhang zu Abschnitt 7.3

Tab. E.1: Fahrzeiten exklusive Haltezeiten über die modellierte Infrastruktur unter ETCS entlang der *Indication Curve*.

Szenario	**Fahrzeit** [min]	
	EdB (100 km/h)	**NE** (80 km/h)
0	*nicht relevant*	
1	21:07	25:05
2	21:01	25:04
3	20:56	25:01
4	20:54	25:01

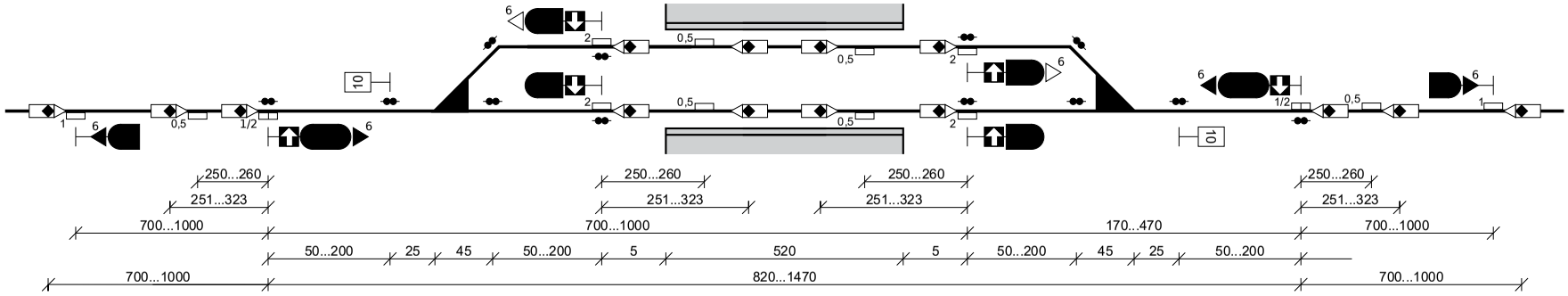


Abb. E.1: Bemaßtes sicherungstechnisches Schema eines Kreuzungsbahnhofs mit Doppelausrüstung. Auf die Darstellung von Gebäuden, Ersatz- und Vorsichtsignalen, Vorsignalbaken und die Bezeichnung der Elemente wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet. Eigene Darstellung.

F Anhang zu Abschnitt 7.4

Allgemeines

Tab. F.1: Statistische Auswertung der Blockabschnitte nach Szenario.

Länge (Soll)	**3000 m**	**1000 m**	**500 m**
Anzahl (Ist)	41	91	200
Länge Minimum (Ist)	1020 m	1020 m	475 m
Länge Mittel (Ist)	2477 m	1116 m	508 m
Länge Median (Ist)	2818 m/2817 m	1087 m/1079 m	510 m/508 m
Länge Maximum (Ist)	3000 m	1560 m	547 m/548 m
Bei zwei angegebenen Werten gilt der erste für Richtung 1 und der zweite für Richtung 2			

Tab. F.2: Näherungswerte der Einbruchsverspätungen der Modellzüge bei hoher Belastung der Zulaufstrecken nach Ril 405.0204 [189].

	FV	**NV schnell**	**NV langsam**	**GV schnell**	**GV langsam**
Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer Einbruchsverspätung p_{ve} [%]	50	60	60	60	60
Mittlere Einbruchsverspätung je Verspätungsfall t_{ve} [min]	5,0	4,5	4,5	10	10

Tab. F.3: Relevante Einstellungen der analytischen Berechnungen in LUKS.

Fahrzeit- und Belegungsrechnung – Fahrzeit und Dynamik		
PZB-Fahrdynamik	PZB-Geschwindigkeitsüberwachung auswerten	aktiviert
	PZB-Startprogramm berücksichtigen (mit Halt beginnende Züge)	aktiviert
Analytik – Mindestzugfolgezeitrechnung		
Bestimmung Überholungsabschnitte	Kreuzung gleichrangiger Züge zulassen	aktiviert
	Maximaler Abstand vor Überholungspunkt	3000 m
	Maximaler Abstand nach Überholungspunkt	3000 m
Berechnung Mindestzugfolgezeiten	Alle Halte auf Mindesthaltezeit kürzen	aktivert
	Züge mit entfallenden Betriebshalten auf durchgehendes Hauptgleis legen	aktiviert
	Biegezuschläge entfernen	aktiviert
	Bauzuschläge entfernen	aktiviert
	Sonderzuschläge entfernen	aktiviert
	Brems- und Beschleunigungsphasen beachten (nach R405)	aktiviert
	Mindesthaltezeitenzuschlag für beginnende und endende Zugfahrten	0 s
Streckenuntersuchungen	Mindeststrecke für Fahrt ohne Überholung bei Güterzügen	3000 m
	Rangordnung der Zugfolgefälle	Ungleichrangige Zugfolgefälle gleichrangig, wenn günstiger (Matrixvergleich)
	Behinderung bei der Benutzung von falschliegenden Überholgleisen in Berechnung einbeziehen	aktiviert
Analytik – Wartezeitrechung		
Allgemein	Ermittlung der Zugfolgefälle	Fahrplan-unabhängig (Erweitertes Ganglinienverfahren)
Wartezeiten im Betrieb	Berechnungsverfahren	Mittelwert-basiert
	Automatische Verspätungskappung	deaktiviert
	Berücksichtigung des Zacken-Lücken-Problems	deaktiviert
Belegungsgrad	Maximaler Belegungsgrad	1,00

In LUKS modellierte Infrastruktur

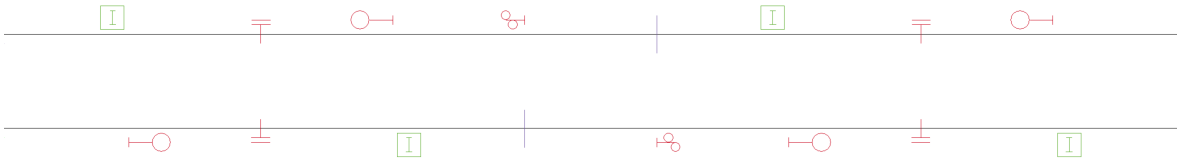


Abb. F.1: Modellierte Infrastruktur der freien Strecke bei 3000 m Blocklänge. Eigener Screenshot aus LUKS.

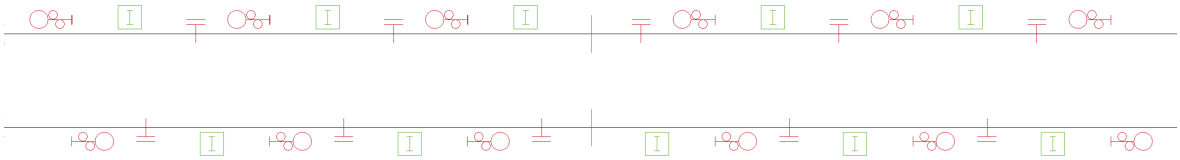


Abb. F.2: Modellierte Infrastruktur der freien Strecke bei 1000 m Blocklänge. Eigener Screenshot aus LUKS.

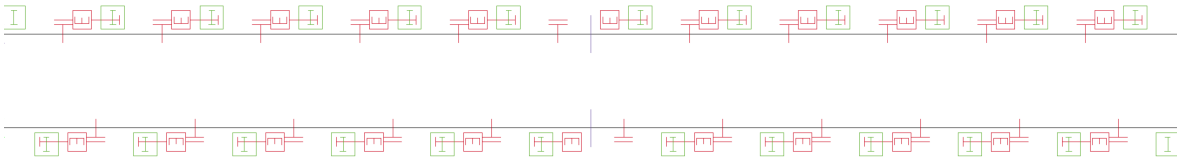


Abb. F.3: Modellierte Infrastruktur der freien Strecke bei 500 m Blocklänge. Eigener Screenshot aus LUKS.

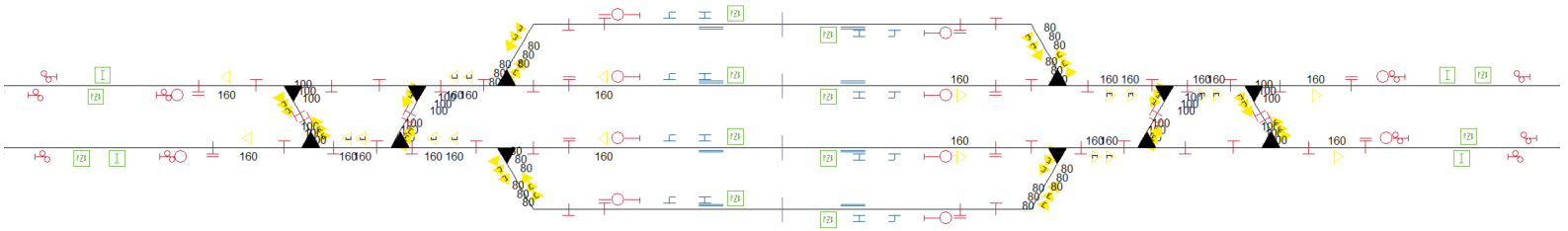


Abb. F.4: Modellierte Infrastruktur eines viergleisigen Bahnhofs bzw. Knotens bei 3000 m Blocklänge. Eigener Screenshot aus LUKS.

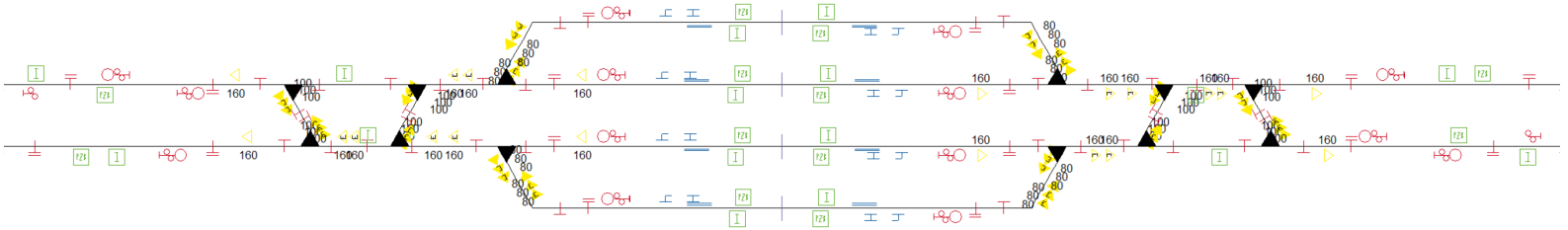


Abb. F.5: Modellierte Infrastruktur eines viergleisigen Bahnhofs bzw. Knotens bei 1000 m Blocklänge. Eigener Screenshot aus LUKS.

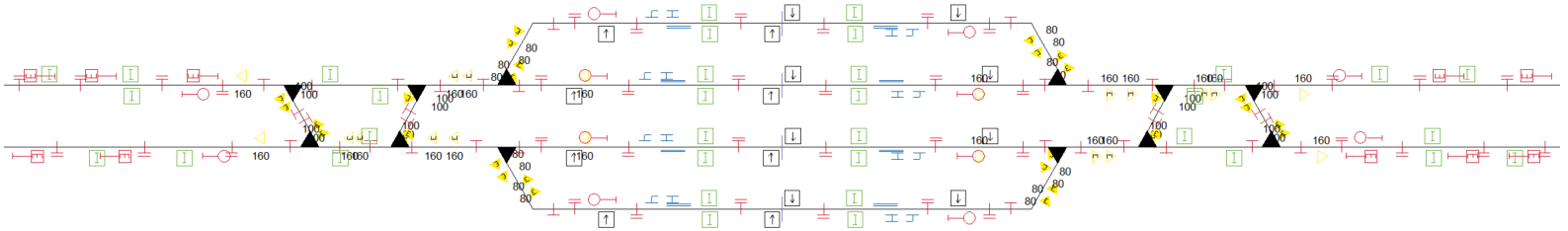


Abb. F.6: Modellierte Infrastruktur eines viergleisigen Bahnhofs bzw. Knotens bei 500 m Blocklänge. Eigener Screenshot aus LUKS.

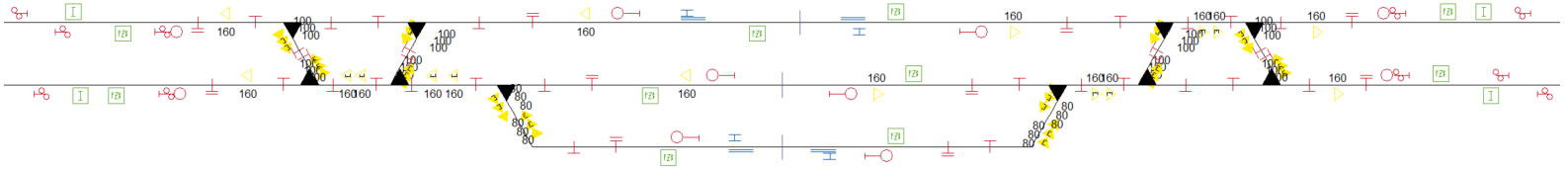


Abb. F.7: Modellierte Infrastruktur eines dreigleisigen Bahnhofs bei 3000 m Blocklänge. Eigener Screenshot aus LUKS.

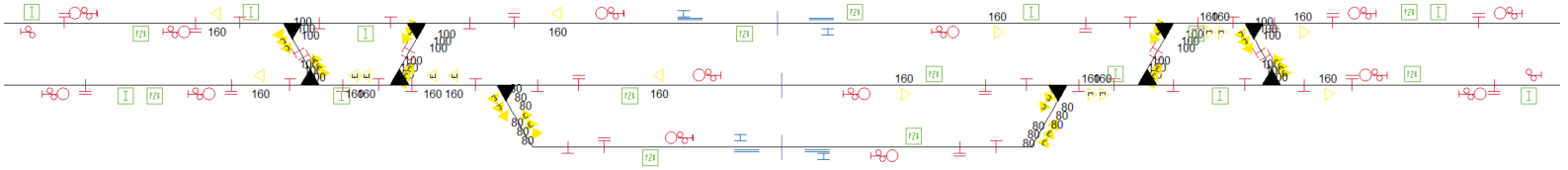


Abb. F.8: Modellierte Infrastruktur eines dreigleisigen Bahnhofs bei 1000 m Blocklänge. Eigener Screenshot aus LUKS.

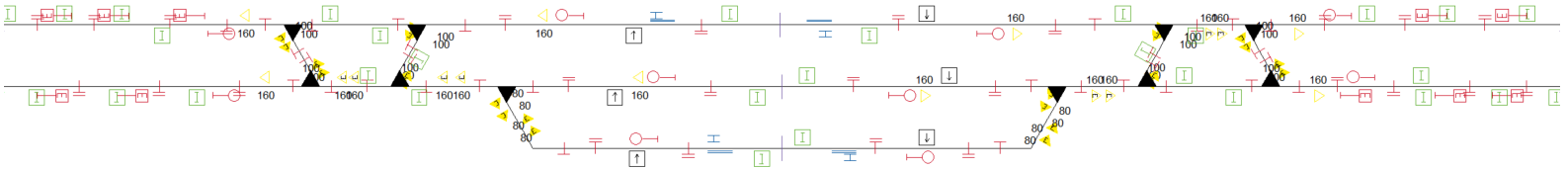


Abb. F.9: Modellierte Infrastruktur eines dreigleisigen Bahnhofs bei 500 m Blocklänge. Eigener Screenshot aus LUKS.

Bremskurven

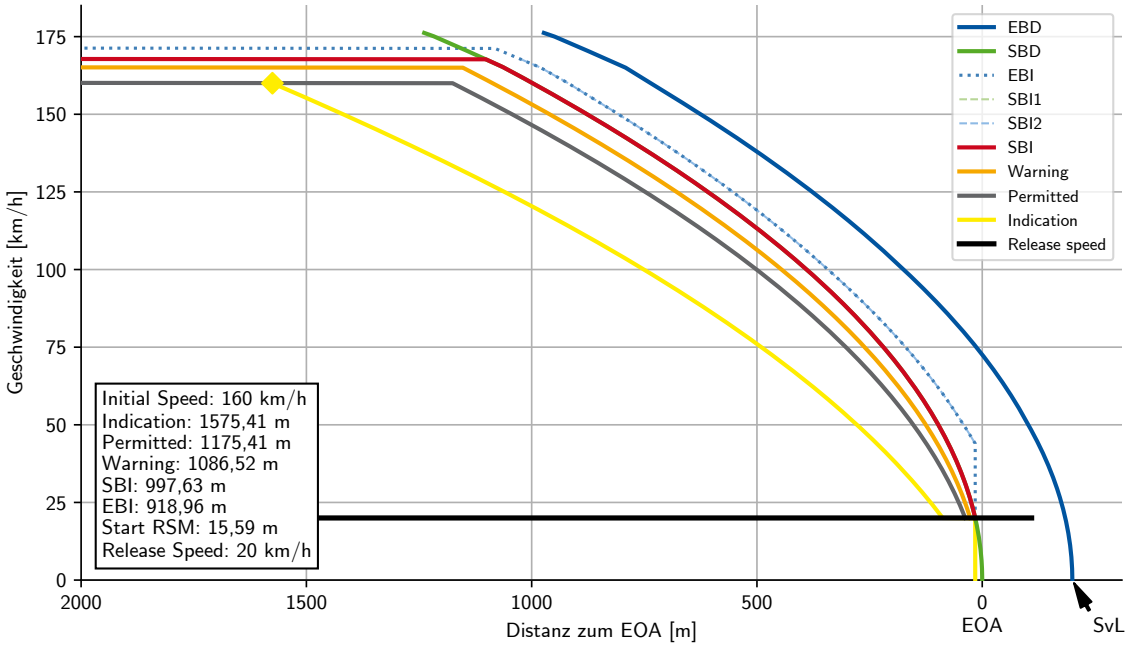


Abb. F.10: ETCS-Bremskurven des Modellzugs FV aus einer Geschwindigkeit von 160 km/h und bei einem Abstand zwischen EOA und SvL von 200 m. Die Fahrtrichtung ist von links nach rechts. Eigene Darstellung auf Basis einer Berechnung mit [32].

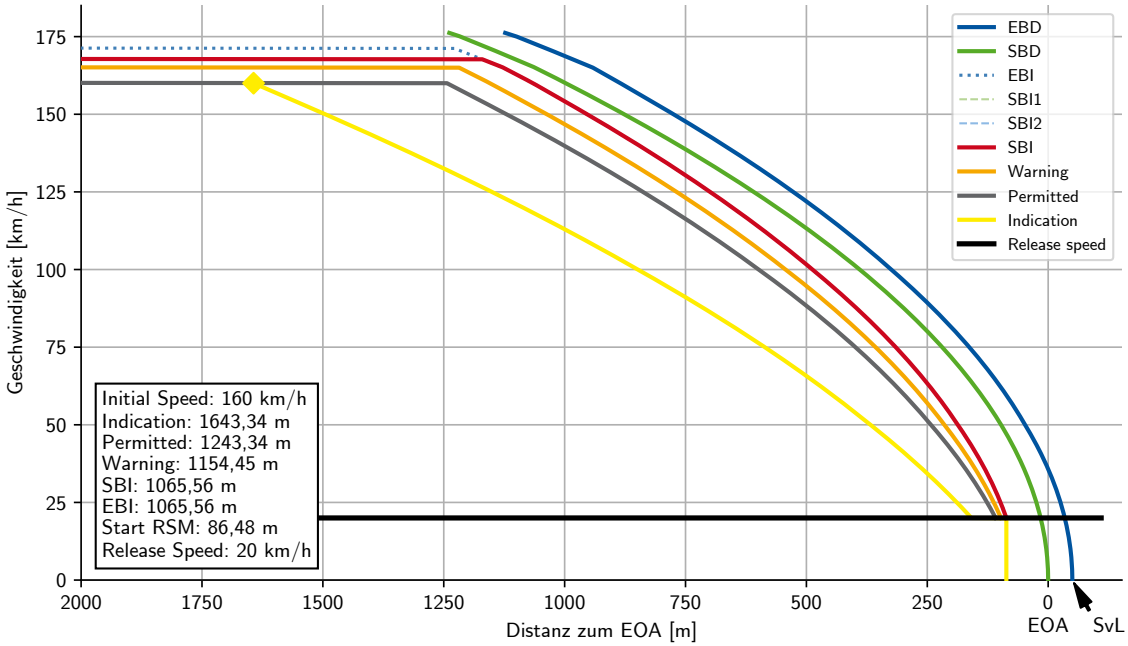


Abb. F.11: ETCS-Bremskurven des Modellzugs FV aus einer Geschwindigkeit von 160 km/h und bei einem Abstand zwischen EOA und SvL von 50 m. Die Fahrtrichtung ist von links nach rechts. Eigene Darstellung auf Basis einer Berechnung mit [32].

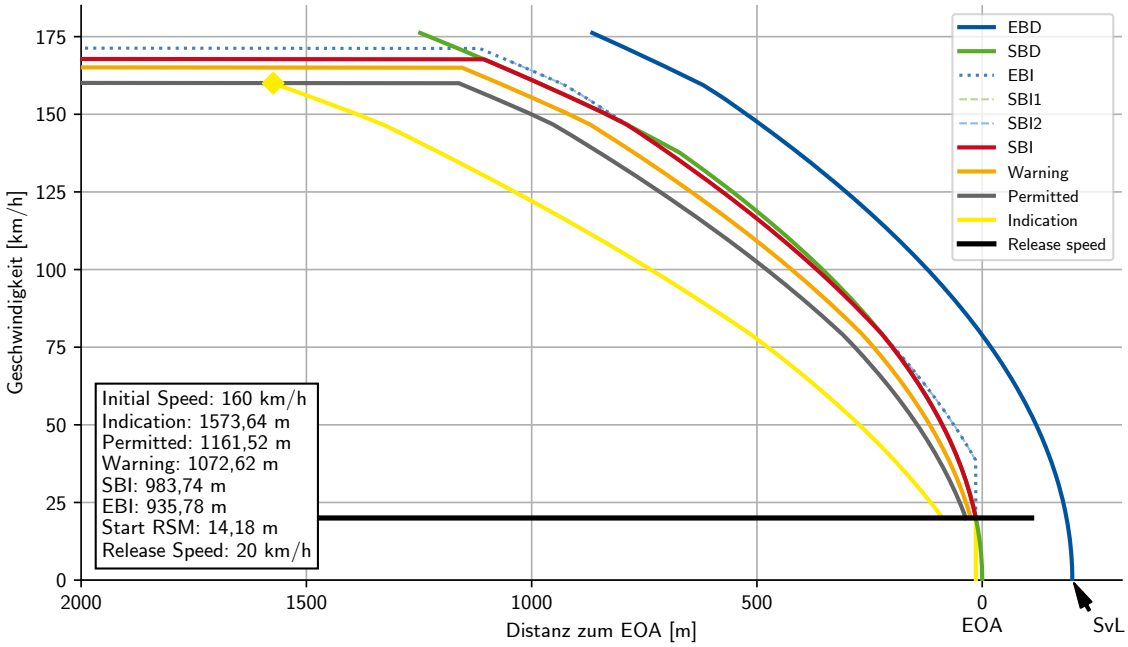


Abb. F.12: ETCS-Bremskurven des Modellzugs NV schnell aus einer Geschwindigkeit von 160 km/h und bei einem Abstand zwischen EOA und SvL von 200 m. Die Fahrtrichtung ist von links nach rechts. Eigene Darstellung auf Basis einer Berechnung mit [32].

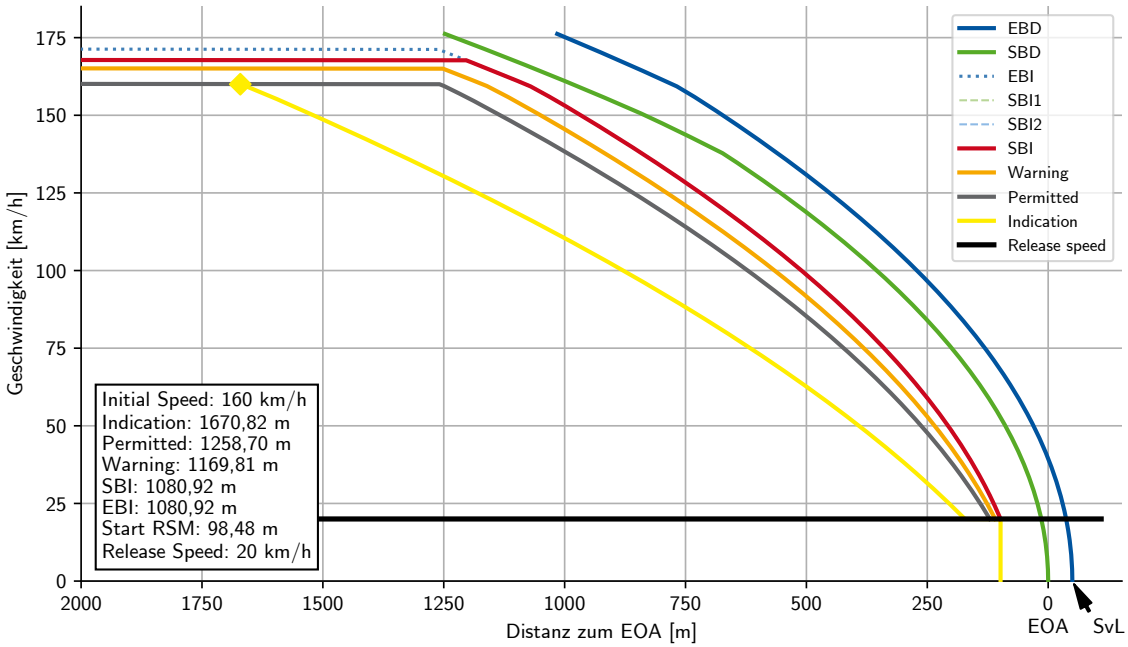


Abb. F.13: ETCS-Bremskurven des Modellzugs NV schnell aus einer Geschwindigkeit von 160 km/h und bei einem Abstand zwischen EOA und SvL von 50 m. Die Fahrtrichtung ist von links nach rechts. Eigene Darstellung auf Basis einer Berechnung mit [32].

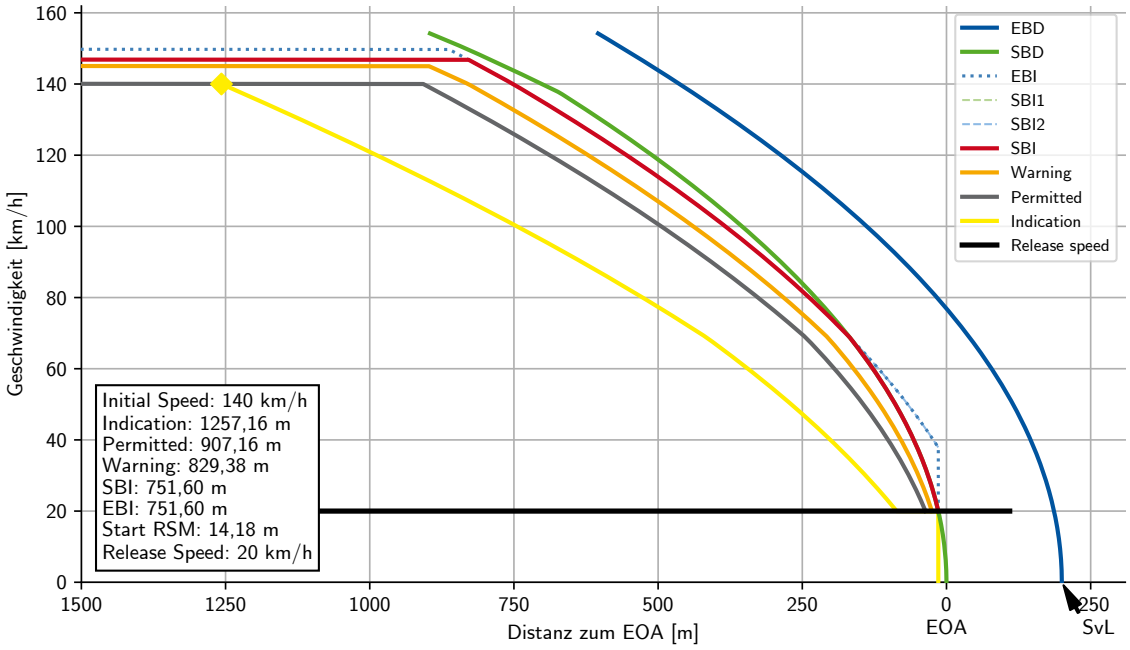


Abb. F.14: ETCS-Bremskurven des Modellzugs NV langsam aus einer Geschwindigkeit von 140 km/h und bei einem Abstand zwischen EOA und SvL von 200 m. Die Fahrtrichtung ist von links nach rechts. Eigene Darstellung auf Basis einer Berechnung mit [32].

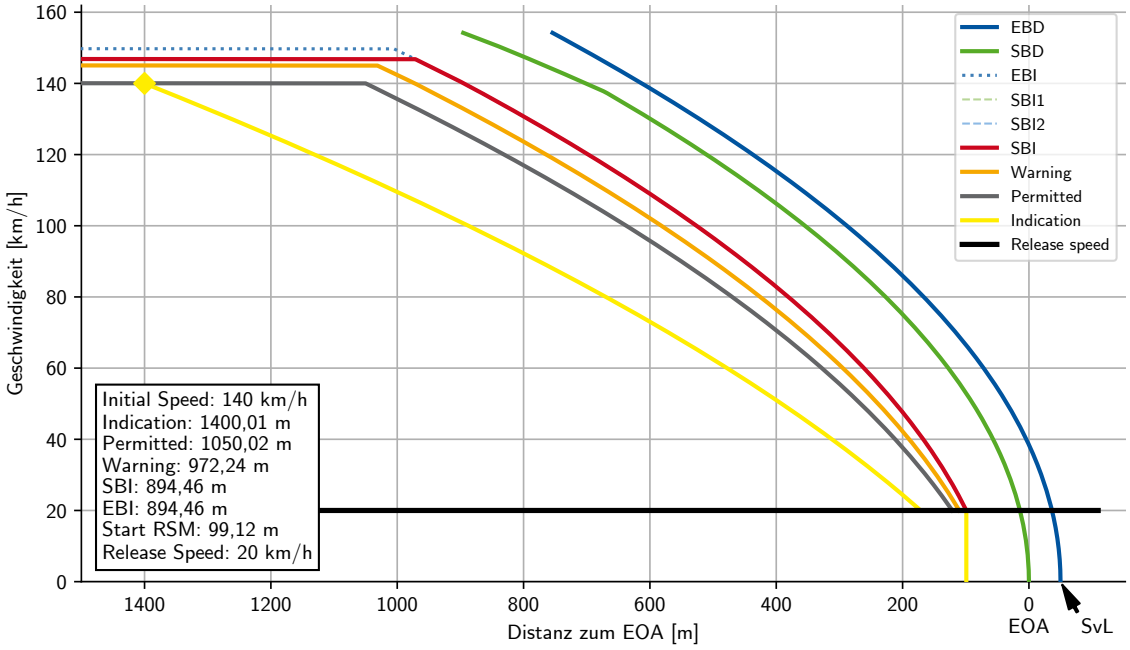


Abb. F.15: ETCS-Bremskurven des Modellzugs NV langsam aus einer Geschwindigkeit von 140 km/h und bei einem Abstand zwischen EOA und SvL von 50 m. Die Fahrtrichtung ist von links nach rechts. Eigene Darstellung auf Basis einer Berechnung mit [32].

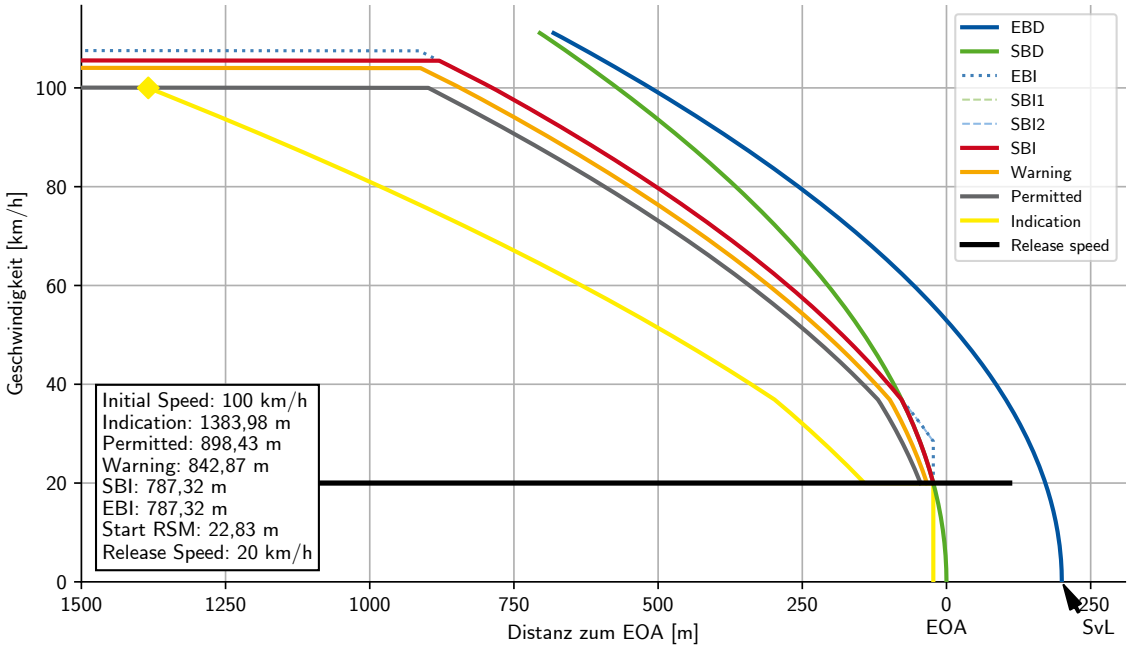


Abb. F.16: ETCS-Bremskurven des Modellzugs GV schnell aus einer Geschwindigkeit von 100 km/h und bei einem Abstand zwischen EOA und SvL von 200 m. Die Fahrtrichtung ist von links nach rechts. Eigene Darstellung auf Basis einer Berechnung mit [32].

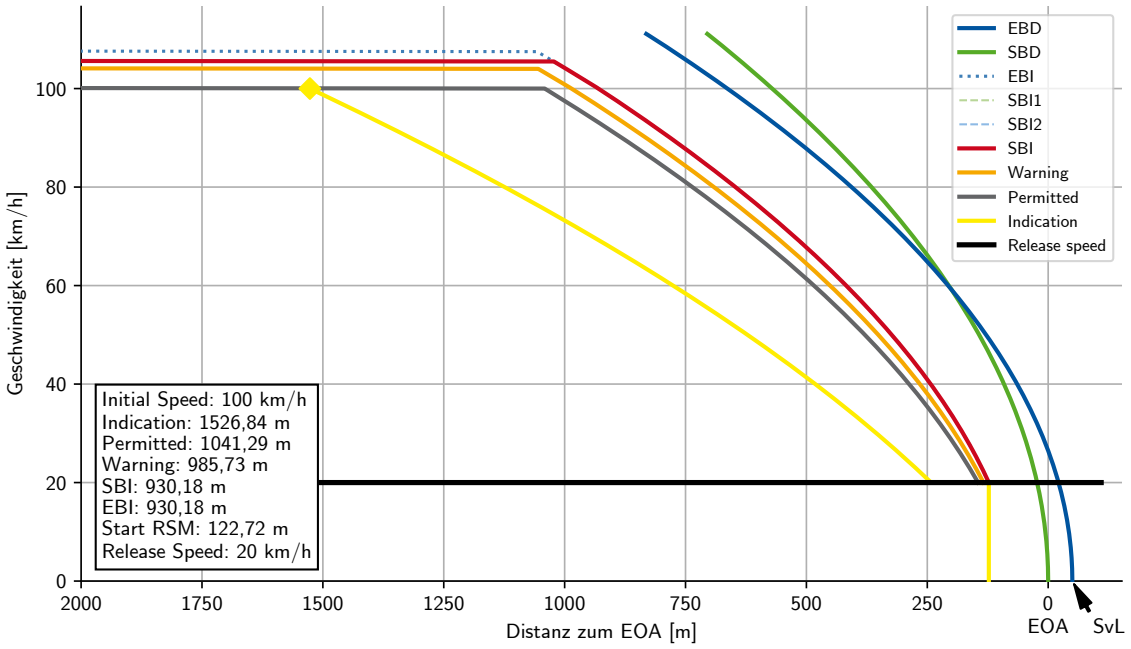


Abb. F.17: ETCS-Bremskurven des Modellzugs GV schnell aus einer Geschwindigkeit von 100 km/h und bei einem Abstand zwischen EOA und SvL von 50 m. Die Fahrtrichtung ist von links nach rechts. Eigene Darstellung auf Basis einer Berechnung mit [32].

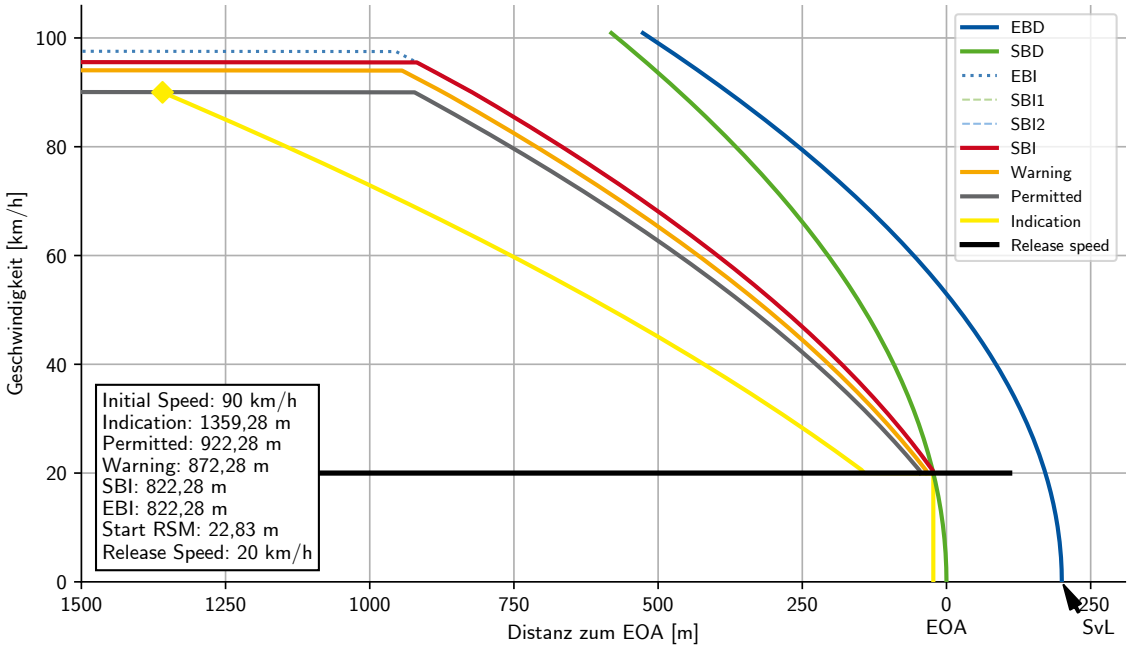


Abb. F.18: ETCS-Bremskurven des Modellzugs GV langsam aus einer Geschwindigkeit von 90 km/h und bei einem Abstand zwischen EOA und SvL von 200 m. Die Fahrtrichtung ist von links nach rechts. Eigene Darstellung auf Basis einer Berechnung mit [32].

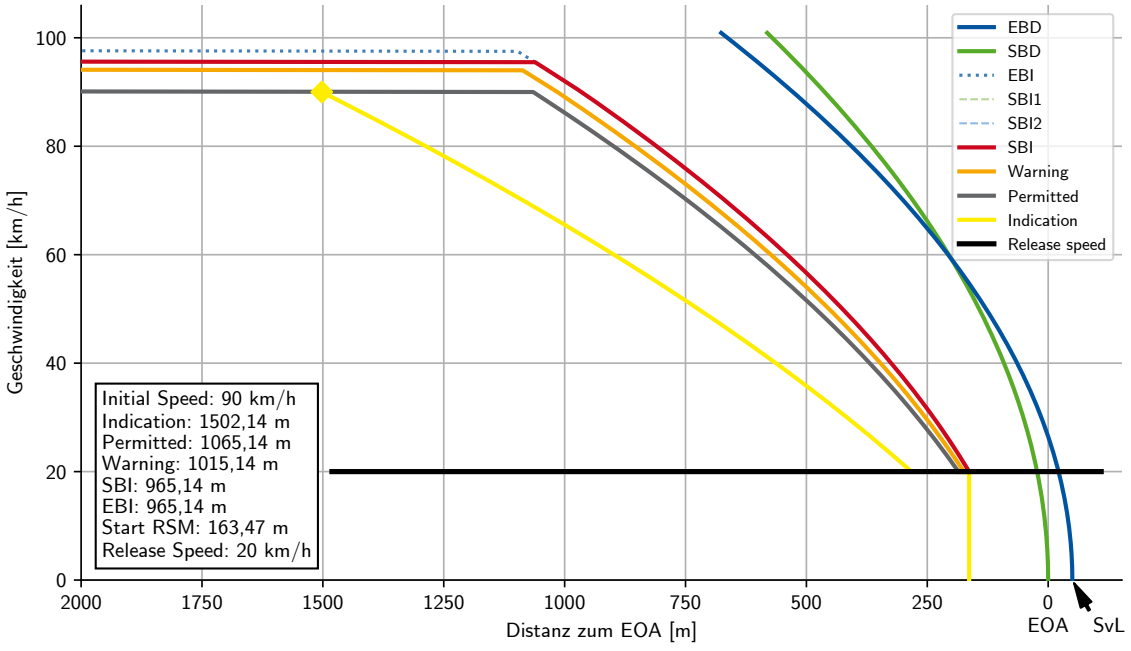


Abb. F.19: ETCS-Bremskurven des Modellzugs GV langsam aus einer Geschwindigkeit von 90 km/h und bei einem Abstand zwischen EOA und SvL von 50 m. Die Fahrtrichtung ist von links nach rechts. Eigene Darstellung auf Basis einer Berechnung mit [32].

Mindestzugfolgezeiten

Tab. F.4: Matrix der Mindestzugfolgezeiten [min] im Szenario PZB mit 3000 m Blocklänge.

1. Zug \ 2. Zug	FV	NV schnell	NV langsam	GV schnell	GV langsam
FV	04:56	02:23	02:23	02:23	02:23
NV schnell	02:34	03:57	03:41	02:32	02:32
NV langsam	05:00	07:43	03:55	02:31	02:31
GV schnell	07:32	06:59	04:33	03:29	03:20
GV langsam	09:29	08:33	05:59	10:53	03:52

Tab. F.5: Matrix der Mindestzugfolgezeiten [min] im Szenario ETCS Level 1 FS mit 3000 m Blocklänge.

1. Zug \ 2. Zug	FV	NV schnell	NV langsam	GV schnell	GV langsam
FV	04:54	02:33	02:33	02:24	02:24
NV schnell	02:21	03:54	03:37	02:13	02:13
NV langsam	05:03	07:44	03:54	02:27	02:13
GV schnell	07:40	06:55	04:36	03:28	03:09
GV langsam	09:40	08:30	05:53	11:10	03:52

Tab. F.6: Matrix der Mindestzugfolgezeiten [min] im Szenario ETCS Level 2 mit 3000 m Blocklänge.

1. Zug \ 2. Zug	FV	NV schnell	NV langsam	GV schnell	GV langsam
FV	04:59	02:33	02:31	02:31	02:31
NV schnell	02:28	03:56	03:29	02:19	02:19
NV langsam	05:08	07:47	03:47	02:26	02:19
GV schnell	07:49	06:52	04:19	03:26	03:05
GV langsam	09:49	08:25	05:43	11:08	03:48

Tab. F.7: Matrix der Mindestzugfolgezeiten [min] im Szenario PZB mit 1000 m Blocklänge.

1. Zug \ 2. Zug	FV	NV schnell	NV langsam	GV schnell	GV langsam
FV	04:57	02:06	02:06	02:02	02:02
NV schnell	02:13	04:01	03:44	01:48	01:48
NV langsam	04:23	07:46	03:58	01:45	01:45
GV schnell	06:54	06:20	04:00	02:29	02:22
GV langsam	08:56	07:54	05:15	10:22	02:44

Tab. F.8: Matrix der Mindestzugfolgezeiten [min] im Szenario ETCS Level 1 FS mit 1000 m Blocklänge.

1. Zug \ 2. Zug	FV	NV schnell	NV langsam	GV schnell	GV langsam
FV	04:54	01:54	01:54	01:43	01:43
NV schnell	01:42	03:54	03:37	01:29	01:29
NV langsam	04:22	07:44	03:54	01:51	01:26
GV schnell	06:58	06:14	03:56	02:40	02:40
GV langsam	08:59	07:49	05:07	10:34	02:58

Tab. F.9: Matrix der Mindestzugfolgezeiten [min] im Szenario ETCS Level 2 mit 1000 m Blocklänge.

1. Zug \ 2. Zug	FV	NV schnell	NV langsam	GV schnell	GV langsam
FV	04:59	01:54	01:51	01:51	01:51
NV schnell	01:48	03:56	03:29	01:35	01:35
NV langsam	04:27	07:47	03:47	01:49	01:32
GV schnell	07:07	06:11	03:42	02:32	02:29
GV langsam	09:07	07:44	04:57	10:26	02:48

Tab. F.10: Matrix der Mindestzugfolgezeiten [min] im Szenario ETCS Level 1 FS mit 500 m Blocklänge.

1. Zug \ 2. Zug	FV	NV schnell	NV langsam	GV schnell	GV langsam
FV	04:45	01:52	01:52	01:52	01:52
NV schnell	01:52	03:13	02:53	01:34	01:34
NV langsam	04:51	07:41	03:17	02:00	01:31
GV schnell	07:03	05:40	03:12	01:52	01:48
GV langsam	09:12	07:16	04:06	09:47	02:04

Tab. F.11: Matrix der Mindestzugfolgezeiten [min] im Szenario ETCS Level 2 mit 500 m Blocklänge.

1. Zug \ 2. Zug	FV	NV schnell	NV langsam	GV schnell	GV langsam
FV	04:29	01:39	01:39	01:39	01:39
NV schnell	01:41	02:48	02:29	01:25	01:25
NV langsam	04:16	06:39	03:04	01:26	01:23
GV schnell	07:00	05:58	03:27	01:54	01:51
GV langsam	09:07	07:32	04:44	09:50	02:05

Nennleistung

Tab. F.12: Nennleistung [Züge pro Richtung] der Mischverkehrsstrecke nach Szenario und Untersuchungszeitraum.

Untersuchungszeitraum	Blocklänge / System	3000 m	1000 m	500 m
0 h bis 24 h	**PZB**	139	153	—
	ETCS Level 1 FS	140	156	165
	ETCS Level 2	140	156	171
6 h bis 22 h	**PZB**	90	97	—
	ETCS Level 1 FS	90	100	104
	ETCS Level 2	90	100	108
22 h bis 6 h	**PZB**	50	57	—
	ETCS Level 1 FS	50	57	64
	ETCS Level 2	51	58	65
6 h bis 11 h	**PZB**	28	31	—
	ETCS Level 1 FS	28	32	33
	ETCS Level 2	28	31	34
18 h bis 23 h	**PZB**	28	31	—
	ETCS Level 1 FS	28	31	33
	ETCS Level 2	28	31	34

Qualitätsfaktor

Tab. F.13: Qualitätsfaktor der Mischverkehrsstrecke nach Szenario und Untersuchungszeitraum.

Untersuchungszeitraum	Blocklänge / System	3000 m	1000 m	500 m
0 h bis 24 h	**PZB**	1,41	1,08	—
	ETCS Level 1 FS	1,38	1,01	0,88
	ETCS Level 2	1,39	1,01	0,80
6 h bis 22 h	**PZB**	1,89	1,49	—
	ETCS Level 1 FS	1,85	1,37	1,25
	ETCS Level 2	1,88	1,39	1,11
22 h bis 6 h	**PZB**	0,57	0,49	—
	ETCS Level 1 FS	0,68	0,49	0,37
	ETCS Level 2	0,67	0,47	0,37
6 h bis 11 h	**PZB**	1,79	1,43	—
	ETCS Level 1 FS	1,76	1,31	1,19
	ETCS Level 2	1,78	1,33	1,05
18 h bis 23 h	**PZB**	2,07	1,57	—
	ETCS Level 1 FS	2,02	1,45	1,30
	ETCS Level 2	2,04	1,46	1,18