

Spur-/Signalplandimensionierung für einen zukunftsfähigen Fahrplan

im Rahmen der "Inversen Kapazitätsberechnung spurgeführter Systeme (C⁻¹)"

Zur Erlangung des akademischen Grades einer

DOKTOR-INGENIEURIN

von der KIT-Fakultät für

Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften

des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte DISSERTATION

von

Chenshihui Zhao, M. Eng.

aus Hami, China

Tag der mündlichen Prüfung: 11.08.2023

Referent: Universitätsprofessor Dr.-Ing. Eberhard Hohnecker (KIT)

Korreferent: Professor Dr.-Ing. Stephan Freudenstein (TUM School of Engineering and Design)

**Spur-/Signalplandimensionierung für
einen zukunftsfähigen Fahrplan
im Rahmen der "Inversen Kapazitätsberechnung spurgeführter Systeme (C^{-1})"**

Die Betriebsqualität der Eisenbahn hängt von der Dimensionierung der Infrastruktur ab. Daher ist die Dimensionierung der Infrastruktur eine der wichtigsten Aufgaben im Bahnsystem. Infrastruktur und Bahnbetrieb stehen in enger Abhängigkeit zueinander. Die übliche Betrachtung – "von der Infrastruktur zum Betrieb/Fahrplan" – ist jedoch ein einseitiger Prozess. D.h. der Betriebsplan und letztendlich der Fahrplan wird an die Größe der vorhandenen Infrastruktur angepasst. Daraus folgt: wenn die vorhandene Infrastruktur den gestiegenen Transportbedarf nicht bewältigen kann, kommt es zu Engpässen. In diesem Fall kann nur durch einen Um-/Aus-/Neubau oder eine Fahrplananpassung Abhilfe geschaffen werden. Der Betrieb wird also durch die Randbedingungen der vorhandenen Infrastruktur eingeschränkt [140].

Die Infrastruktur umfasst mit den drei Komponenten: Gleise, Weichen und Signale die maßgeblichen Aspekte. Der Entwurf der Infrastruktur hat eine hohe Komplexität und bezieht sich auf längere Zeiträume. WIECZOREK [140] hat mit der Unterstützung moderner Rechnetechnologien und dem Einsatz geeigneter Werkzeuge eine neue Methode zur Ermittlung der Infrastruktur entwickelt, die auf dem Konzept der Inversen Kapazitätsermittlung (C^{-1}) von HOHNECKER – "vom Fahrplan zur Infrastruktur" – basiert¹. Die hier vorgelegte Arbeit konzentriert sich auf die weitere Erforschung und Entwicklung der Bestimmung der Infrastruktur auf dieser Grundlage mit folgenden Schwerpunkten:

1. Planung einer Neubaustrecke (NBS) für einen zukunftsfähigen Fahrplan
2. Ableitung der erforderlichen Mindestinfrastruktur aus dem Fahrplan

Um diese Aufgaben zu realisieren, wird auf der Grundlage eines gegebenen Teil-Betriebskonzepts die Fahrzeit zwischen den Halten ermittelt. Daraus kann der benötigte zukunftsfähige Fahrplan gewonnen werden, aus dem wiederum die erforderliche Mindestinfrastruktur bestimmt wird.

¹ Siehe Kapitel 2.4.3

Abstract

**track layout/signalplan dimensioning
for a future-proof timetable**

under the framework of "Inverse capacity calculation of railway system (C⁻¹)"

The operational quality of the railway is influenced by the size of the infrastructure. Therefore, the dimensioning of infrastructure is one of the most important tasks in the railway system. Normally infrastructure and train operation are closely interconnected. However, the usual consideration "from infrastructure to train operation" is a one-way process of. I.e., the railway operation plan is adapted to the size of the existing infrastructure. It follows that if the existing infrastructure cannot cope with the increased demand for transportation, bottlenecks will occur. In this case, it could only be remedied by rebuilding/extension/new construction or schedule adjustment. Thus, train operations are constrained by the boundary conditions of the existing infrastructure [140].

The infrastructure comprises three components: Tracks, switches and signals, which are the decisive aspects. The design of infrastructure has a high complexity and refers to longer periods. WIECZOREK [140], with the support of modern computing technologies and the use of appropriate tools, developed a new method to obtain infrastructure based on HOHNECKER's inverse capacity determination(C⁻¹) concept "from train operation to infrastructure" ¹. This work focuses on further research and development of infrastructure determination based on WIECZOREK's research, which is with the following main points:

1. Planning of a new track for a future-proof timetable.
2. Derivation of the required infrastructure from the timetable.

In order to achieve these tasks, the running time between stations is determined based on a given partial operating concept. Thus, the sustainable timetable can be obtained, from which the required minimum infrastructure is determined in turn.

¹ Refer to Chapter 2.4.3

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	XII
Abkürzungsverzeichnis	XIV
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Ziele	3
1.3 Überblick	4
2 Grundlagen der Eisenbahninfrastruktur-Dimensionierung	6
2.1 Modellierung der Eisenbahninfrastruktur	6
2.1.1 Makroskopisches Modell	7
2.1.2 Mikroskopisches Modell	8
2.2 Grundlagen der Eisenbahninfrastruktur	9
2.2.1 Begriffe und Definitionen	9
2.2.2 Linienführung, Trassierungs- und Gleisparameter	12
2.2.2.1 Gleisparameter	13
2.2.2.2 Trassierungsparameter	20
2.3 Grundlagen der Fahrdynamik	42
2.3.1 Freiheitsgrade	43
2.3.2 Zugbewegungsprozess	46
2.3.2.1 Zugkraft	46
2.3.2.2 Bremskraft	48
2.3.2.3 Widerstände	51
2.3.3 Ruck	59
2.3.4 Energetische Betrachtung der Fahrt	62
2.4 Grundlagen des Eisenbahnbetriebs	65
2.4.1 Begriffe und Definitionen	65
2.4.2 Konventionelle Verfahren zur Infrastrukturermittlung	75
2.4.3 Inverse Kapazitätsermittlung/-bemessung (C^{-1})	80
2.5 Zusammenfassung	89
3 Linienführung und Trassierung einer NBS	92
3.1 Methoden zur Bestimmung von Elementen der Linienführung und Trassierung einer Eisenbahnstrecke	93
3.1.1 Enumeration	93
3.1.2 Variationsrechnung	94
3.1.3 Network Optimization	95
3.1.4 Linear Programming (LP)	95
3.1.5 Genetische Algorithmen (GA)	95
3.1.6 Hybrider Algorithmus	96
3.1.7 Heuristischer Algorithmus	97

3.1.8	Distance Transform (DT).....	97
3.1.9	Methode der Trassierung nach HOHNECKER.....	98
3.1.10	Zusammenfassung der Methoden zur Linienführung und Trassierung	99
3.2	Aktuelle Verfahren der Fahrzeitermittlung.....	101
3.2.1	Bewegungsablauf eines Zuges	101
3.2.2	Mikroschrittverfahren.....	101
3.2.3	Methoden zur Fahrzeitermittlung.....	103
3.2.3.1	Numerische Algorithmen	103
3.2.3.2	Genetische Algorithmen (GA).....	104
3.2.3.3	Mixed Integer Linear Programming (MIP).....	105
3.3	Entwicklung eines Modells für die Linienführung und Trassierung einer NBS	106
3.3.1	Entwurf möglicher Linienführungen mittels DT	106
3.3.1.1	Distance Transform (DT).....	107
3.3.1.2	Modellierung der Linienführung und Trassierung.....	110
3.3.1.3	Arbeitsschritte zur Ermittlung der möglichen Linienführungen	118
3.3.2	Fahrzeitermittlung mit MIP	119
3.3.2.1	Modellierung	120
3.3.2.2	Fahrzeitermittlung	124
3.4	Zusammenfassung	127
4	Spur-/Signalplandimensionierung für eine NBS.....	130
4.1	Aufgabenstellung zur Spur-/Signalplandimensionierung	130
4.1.1	Abgrenzung des Untersuchungsgebietes.....	131
4.1.2	Eingabedaten.....	131
4.2	Wahl der Zugfolge	132
4.2.1	Fahren im festen Raumabstand	132
4.2.1.1	Fahren im Blockabstand.....	132
4.2.1.2	Fahren auf „elektronische Sicht“.....	134
4.2.2	Fahren im Bremswegabstand (engl. Moving Block).....	139
4.2.2.1	Fahren im relativen Bremswegabstand	139
4.2.2.2	Fahren im absoluten Bremswegabstand	140
4.3	Dimensionierung der Infrastruktur – Spurplan.....	141
4.3.1	Ermittlung der Belegungszeit	141
4.3.2	Spurplandimensionierung für die Freie Strecke.....	142
4.3.3	Ermittlung der Gleisanzahl in der Bahnhof-Gleisgruppe (GG)	145
4.3.4	Bestimmung der Gleisverbindungen im Bahnhofskopf	147
4.4	Ermittlung der Signalstandorte.....	150
4.4.1	Leit- und Sicherungstechnik (LST)	150
4.4.2	Aktuelle Methoden der Signalstandortermittlung	151
4.4.2.1	Ermittlung ortsfester Lichtsignalstandorte.....	151

4.4.2.2	Signalstandortermittlung für ETCS-Level 2.....	153
4.4.3	Problemstellung zur Ermittlung der ETCS-Level 2-Signalstandorte.....	154
4.4.3.1	Wahl des Blockmodus für ETCS-Level 2.....	154
4.4.3.2	Verdichtung der Blöcke für hohe Streckenkapazität	155
4.4.4	Verfahren zur Ermittlung der ETCS-Level 2-Signalstandorte.....	162
4.5	Zusammenfassung	167
5	Anwendungsbeispiel: NBS Karlsruhe – Stuttgart	168
5.1	Ermittlung einer optimalen Linienführung.....	168
5.1.1	Importierte Daten für die Linienführung	168
5.1.2	„Optimale Lösung“ der Linienführung	171
5.2	Spur-/Signalplandimensionierung	176
5.2.1	Importierte Daten für die Spur-/Signalplandimensionierung.....	176
5.2.2	Ermittlung des Spurplans	179
5.2.3	Ermittlung der Signalstandorte	186
5.2.3.1	Blockeinteilung im Bahnhof	186
5.2.3.2	Signalstandorte auf der Freien Strecke	187
6	Zusammenfassung	190
7	Ausblick.....	192
	Literaturverzeichnis	193
	Anhang.....	205

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Vom Gleisplan zur Modellierung der Eisenbahninfrastruktur.....	7
Abbildung 2:	Einsatzfelder der Infrastrukturmodelle	7
Abbildung 3:	Makroskopisches Modell	8
Abbildung 4:	Beziehung zwischen makro- und mikroskopischen Modellen	9
Abbildung 5:	Fahrstraßenknoten (FK) und Gleisgruppe (GG) eines Durchgangsbahnhofs	10
Abbildung 6:	Kopfbahnhof.....	11
Abbildung 7:	Beschleunigungen bei der Fahrt durch einen Bogen	13
Abbildung 8:	Ausgleichende Überhöhung u_0	15
Abbildung 9:	Beziehungen zwischen ausgleichender Überhöhung u_0 , geplanter Überhöhung u und dem Überhöhungsfehlbetrag u_f	18
Abbildung 10:	Beziehungen zwischen ausgleichender Überhöhung u_0 , geplanter Überhöhung u und dem Überhöhungsüberschuss u_u	19
Abbildung 11:	Sinuslauf aus der Kegelform der Räder in der Geraden	21
Abbildung 12:	Krümmungswechsel im Lageplan mit Radius r , ohne Übergangsbogen	22
Abbildung 13:	Bogeneinfahrt eines Fahrzeugs.....	23
Abbildung 14:	Krümmungsbild: Gerade – Kreisbogen.....	24
Abbildung 15:	Seitenbeschleunigungsverlauf in Gleisebene a_q : Gerade mündet unmittelbar in den anschließenden Gleisbogen.....	25
Abbildung 16:	Gleis nicht überhöht	25
Abbildung 17:	Krümmungsbild eines Gegenbogens ohne Übergangsbogen	26
Abbildung 18:	Gerade Überhöhungsrampe	27
Abbildung 19:	s-förmig geschwungene Überhöhungsrampe	29
Abbildung 20:	Darstellung der Bogenfolge beim Bogenwechsel: Bogen-Zwischengerade-Gegenbogen	31
Abbildung 21:	Übergangsbogen mit gerader Krümmungslinie.....	32
Abbildung 22:	Klothoide	33
Abbildung 23:	Vergleich Klothoide mit einer Parabel 3. Ordnung	35
Abbildung 24:	Übergangsbogen mit geschwungener Krümmungslinie	36
Abbildung 25:	Krümmungsverlauf des Übergangsbogens nach BLOSS	37
Abbildung 26:	Die sechs Freiheitsgrade eines Körpers im freien Raum	43
Abbildung 27:	Bewegung eines starren Körpers auf einer 3-dimensionalen Bahnkurve	44
Abbildung 28:	Bewegungsformen	45
Abbildung 29:	Darstellung der am Fahrzeug in Längsrichtung wirkenden Kräfte	46
Abbildung 30:	Zugkraft-Geschwindigkeit-Diagramm.....	47
Abbildung 31:	Übersicht über die Aufgaben des Bremsensystems.....	48
Abbildung 32:	Haftreibungsabhängige und -unabhängige Bremsarten.....	49
Abbildung 33:	Unterteilung der Widerstände	51
Abbildung 34:	Darstellung des Neigungswiderstands F_N	52
Abbildung 35:	Darstellung des Bogenwiderstands F_{B0}	53

Abbildung 36:	Berechnung der FSL beim Anfahren.....	58
Abbildung 37:	Vergleich der Verläufe des unvermittelten Krümmungswechsels (ohne Übergangsbogen) ohne (links) und mit (rechts) Überhöhung u.....	60
Abbildung 38:	Verlauf des Krümmungswechsels mit Übergangsbogen	61
Abbildung 39:	Sperrzeit eines Blocks im H/V-System	66
Abbildung 40:	Mindestzugfolgezeiten auf einer 1-gleisigen Strecke bzw. in gleicher Richtung benutztem gemeinsamen Fahrweg.....	68
Abbildung 41:	Darstellung der Zugankunft/-abfahrt/-anschlußsystematik im ITF	71
Abbildung 42:	ITF-Grundlagen	71
Abbildung 43:	Arten der Leistungsfähigkeit	73
Abbildung 44:	Darstellung des Zusammenhangs Infrastrukturauslastung und Betriebsqualität	74
Abbildung 45:	Lösungsweg für Untersuchungen zur Fahrwegkapazität nach DB AG-Richtlinie 405.....	76
Abbildung 46:	Arbeitsschritte der analytischen Verfahren.....	78
Abbildung 47:	Arbeitsschritte der konstruktiven Verfahren	79
Abbildung 48:	Arbeitsschritte der Simulationsverfahren	80
Abbildung 49:	Vergleich der Grundprinzipien zwischen der konventionellen Planung und der fahrplanbasierten Infrastrukturplanung	81
Abbildung 50:	Vorgehensweise der Inversen Kapazitätsermittlung C^{-1}	83
Abbildung 51:	Belegungsanforderungen der Infrastrukturabschnitte	84
Abbildung 52:	Überführung der Fahrschaulinien (FSL) in diskrete Belegungen.....	84
Abbildung 53:	Dimension von Schnittbereichen	85
Abbildung 54:	Erweiterung des Scan-Linie-Verfahrens aus [140] um die 3. Dimension „Fahrplanlage“	86
Abbildung 55:	Übersicht über den Ablauf des Verfahrens von TZSCHASCHEL	87
Abbildung 56:	Übersicht über das Verfahren von BLAUTH	88
Abbildung 57:	Dreidimensionale Beschleunigung	98
Abbildung 58:	Geschwindigkeitskurve eines Zuges.....	101
Abbildung 59:	Geschwindigkeitsprofil nach dem Mikrowegschrittverfahren zum Modell von [8].....	103
Abbildung 60:	5×5 Adjazenzmatrix der DT	108
Abbildung 61:	Generierte Routen durch DT	108
Abbildung 62:	Beispiel für die Aktualisierung des Abstands mittels DT	109
Abbildung 63:	Darstellung von Geländeinformationen zwischen den Änderungspunkt im Polygonzug	110
Abbildung 64:	Tangentiale Einfügung eines Kreisbogens ohne Übergangsbogen in die Trassierung	114
Abbildung 65:	Einfügung eines Ausrundungsbogens im Höhenplan.....	118
Abbildung 66:	Arbeitsschritte zur Ermittlung der möglichen Linienführungen durch DT ...	119
Abbildung 67:	Schema des MIP-Modells für die FSL	120
Abbildung 68:	Aufteilung der FSL.....	124
Abbildung 69:	Berechnung des Bremsanfangspunkt s_b	125

Abbildung 70:	Geschwindigkeitsberechnungsprozess.....	126
Abbildung 71:	Ablauf der Fahrzeitermittlung.....	127
Abbildung 72:	Ablauf der Ermittlung einer Linienführung zwischen zwei ITF-Knoten.....	128
Abbildung 73:	Unterteilung der Gleisinfrastruktur im abgegrenzten Untersuchungsgebiet	131
Abbildung 74:	Fahren im festen Raumabstand	132
Abbildung 75:	Beziehung zwischen V_r und H_p	133
Abbildung 76:	LZB-Streckeneinrichtung	135
Abbildung 77:	Multifunktionales Display für LZB-Führung	135
Abbildung 78:	Bremswegabstand bei „elektronischer Sicht“ mit LZB-Führung	136
Abbildung 79:	Übertragung und Überwachung beim ETCS-Level 2	138
Abbildung 80:	Auf dem DMI angezeigte Informationen	138
Abbildung 81:	Zugfolgeabstand im relativen Bremswegabstand $l_{B,rel}$	139
Abbildung 82:	Zugfolgeabstand im absoluten Bremswegabstand $l_{B,absol}$	140
Abbildung 83:	Belegungszeit eines Zuges je Block auf der Freien Strecke $t_{Beleg,FS}$ für ETCS-Level 2.....	143
Abbildung 84:	FSL-Belegungsbander mit Überlappung (gelb) von zwei Zügen	144
Abbildung 85:	Bahnhofsgleissperrzeit.....	146
Abbildung 86:	Belegungszeiten in der Bahnhofs-Gleisgruppe.....	147
Abbildung 87:	Erforderliche Fahrstraßen im Bahnhofskopf für einen zukunftsfähigen ITF	148
Abbildung 88:	Ermittlung der optimalen Weichenverbindungen im Bahnhofskopf	149
Abbildung 89:	Zugfolge basierend auf einem Block zwischen Bhf A und B.....	150
Abbildung 90:	Sperrzeitentreppen auf einer ETCS-Level 2-Strecke mit reduziertem ortsfestem Signalsystem im Vergleich zur HV-Systemführung mit PZB	155
Abbildung 91:	ETCS-Bremskurven aus Geschwindigkeit V mit Verzögerung a	156
Abbildung 92:	Mindestzugfolgezeiten $\min t_{Zugfolge}$ in Abhängigkeit unterschiedlicher Zugbeeinflussungssysteme	160
Abbildung 93:	Mindestzugfolgezeit verschiedener Ausrüstungsvarianten am Beispiel der S-Bahn im DKS	161
Abbildung 94:	Blockabstand l_{Block} im DKS mit 55 m am Bahnsteig.....	162
Abbildung 95:	Zugfolgeabstand $l_{Zugfolge}$ bei virtuellen Blöcken	163
Abbildung 96:	Minimale Zugfolgezeit $\min t_{Zugfolge}$ bei ETCS-Level 2	163
Abbildung 97:	Darstellung der Pufferzeiten	165
Abbildung 98:	Suchablauf für die Ermittlung der optimalen Blocklängen und Signalstandorte	166
Abbildung 99:	Ablauf der Ermittlung der Infrastruktur	167
Abbildung 100:	Topographische Karte des Untersuchungsgebiets auf USGS-Basis	169
Abbildung 101:	Koordinaten für den ausgewählten Punkt (gelb) in der DHM-Karte.....	169
Abbildung 102:	mögliche Linienführungen zwischen Karlsruhe und Stuttgart unter Berücksichtigung der Zwischenhalte (Zwangspunkte) von IC und RE	174
Abbildung 103:	Vergleich des Energieverbrauchs E je Richtung sowie des Gesamtenergieverbrauchs E_{ges} für die 10 Linienführungen	175

Abbildung 104: Geschwindigkeit-Weg-Diagramm der ausgewählten „optimale Linienführung“ der Linie 5	176
Abbildung 105: ITF-Uhr für Karlsruhe Hbf und Stuttgart Hbf, Fahrtrichtung Karlsruhe - Stuttgart	178
Abbildung 106: ITF-Uhr für Stuttgart Hbf und Karlsruhe Hbf, Fahrtrichtung Stuttgart - Karlsruhe.....	179
Abbildung 107: Belegungsdiagramm-Auszug der Bahnhofs-GG Karlsruhe.....	179
Abbildung 108: Belegungsdiagramm-Auszug der Bahnhofs-GG Stuttgart.....	180
Abbildung 109: Belegungsdiagramm auf der Freien Strecke zwischen Karlsruhe und Stuttgart	181
Abbildung 110: Belegungsbänder im Bahnhofskopf Karlsruhe Hbf	183
Abbildung 111: Belegungsbänder im Bahnhofskopf Stuttgart Hbf	183
Abbildung 112: Spurplan für die Einführung der zweigleisigen Freien Strecke in die Hauptbahnhöfe Karlsruhe und Stuttgart	184
Abbildung 113: virtuelle Blockeinteilung am Bahnsteig	186
Abbildung 114: physische Signalstandorte in den Hauptbahnhöfen Karlsruhe und Stuttgart	187
Abbildung 115: Arbeitsschritte dieser Arbeit.....	190
Abbildung 116: Belegungsbänder von ICE2B und RE1B	206

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Ermessens- und Genehmigungsbereich für die Trassierungs- und Gleisparameter	12
Tabelle 2:	Kriterien zur Wahl der einzubauenden Überhöhung u	16
Tabelle 3:	Obere Grenzwerte der Überhöhung u	17
Tabelle 4:	Werte des Überhöhungsfehlbetrags u_f mit den daraus entsprechend hervorgehenden Seitenbeschleunigungen in Gleisebene a_q	18
Tabelle 5:	Planungswerte für den Überhöhungsfehlbetrag u_f	19
Tabelle 6:	Mindestplanungswerte für die Längen von Zwischengeraden und Gleisbogen	21
Tabelle 7:	Grenzwerte des Bogenradius r im Lageplan.....	22
Tabelle 8:	zul. V_{\max} im Bogenwechsel ohne Übergangsbogen bzw. ohne Zwischengerade	26
Tabelle 9:	Planungswerte für Länge l_R und Neigung $1:m$ der geraden Überhöhungsrampe.....	28
Tabelle 10:	Planungswerte für Länge l_{RS} und Neigung $1:m_{MS}$ der s-förmig geschwungenen Überhöhungsrampe	30
Tabelle 11:	Planungswerte für Länge l_{RB} und Neigung $1:m_{MB}$ der Überhöhungsrampe nach BLOSS	30
Tabelle 12:	Vergleich verschiedener Übergangsbogen	38
Tabelle 13:	Abrückmaß f verschiedener Übergangsbogenformen.....	39
Tabelle 14:	Zulässige Längsneigungen l nach TSI INF.....	41
Tabelle 15:	Planungswerte für den Ausrundungsradius r_a	42
Tabelle 16:	Vergleich der Sperrzeit bei verschiedenen Signalsystemen.....	67
Tabelle 17:	Beispiele betrachteter Verfahren.....	91
Tabelle 18:	Zusammenfassung der Forschungsarbeiten zur Streckenermittlung.....	99
Tabelle 19:	Vor-/Nachteile der Methoden	100
Tabelle 20:	Zusammenhang zwischen Trassierungsparametern, Zugeigenschaften und Auswirkungen auf die Fahrzeit.....	106
Tabelle 21:	Streckenstandard und zulässige Höchstgeschwindigkeit nach [100].....	113
Tabelle 22:	Regelzuschlag für Reisezüge	121
Tabelle 23:	Zeitanteile für einen ICE beim 30/60 min Takt.....	122
Tabelle 24:	Bezeichnung und Bedeutung der V_r und den zugehörigen H_p	133
Tabelle 25:	Mindestblocklänge $\min l_{\text{Block}}$ in Abhängigkeit der Geschwindigkeit V	134
Tabelle 26:	Darstellung der Leuchtmelder und deren Bedeutung auf der MFA und dem MFD	136
Tabelle 27:	ETCS Funktionsstufen.....	137
Tabelle 28:	Belegungszeit je Block auf der Freien Strecke $t_{\text{Beleg,FS}}$ für ETCS-Level 2	143
Tabelle 29:	Arten und Bedeutung von ETCS-Bremskurven.....	157
Tabelle 30:	Funktion der ETCS-Bremskurven	158
Tabelle 31:	Bremswege der betrachteten LST-Systeme in Abhängigkeit verschiedener Geschwindigkeiten V und Bremsverzögerungen a	158

Tabelle 32:	Vergleich der Mindestzugfolgezeiten $\min t_{\text{Zugfolge}}$ beim Einsatz der LST-Systeme PZB und ETCS-Level 2 sowie Level 3	159
Tabelle 33:	Einschränkungs- und Vorgabenwerte	170
Tabelle 34:	Technische Fahrzeugdaten einer ICE-Einheit	171
Tabelle 35:	Grenzwerte der Trassierungs- und Gleisparameter für die Linienführung einer NBS für $\max V = 270 \text{ km/h}$	171
Tabelle 36:	„Optimale Fahrzeiten“ für 10 Linienführungen zwischen Karlsruhe Hbf und Stuttgart Hbf, vice versa als Netto-Fahrzeit (ohne Regel- und Bauzuschlag).....	175
Tabelle 37:	Fahrzeugdaten	177
Tabelle 38:	Zugzusammenstellung der Personenzüge.....	177
Tabelle 39:	30 min-ITF zwischen Karlsruhe Hbf und Stuttgart Hbf	178
Tabelle 40:	30 min-ITF von Stuttgart Hbf nach Karlsruhe Hbf	178
Tabelle 41:	Erforderliche Anzahl und Lage der Gleise auf der Freien Strecke nach Abbildung 109.....	181
Tabelle 42:	Position des zusätzlichen Gleises bei 1-gleisiger NBS-Ausführung	181
Tabelle 43:	Reihenfolge der Zugeinfahrten	185
Tabelle 44:	Zusammenfassung der virtuellen Blockeinteilungen in den Hauptbahnhöfen Karlsruhe und Stuttgart.....	187
Tabelle 45:	Berechnungsergebnisse für die physischen Signalstandorte	188
Tabelle 46:	Grenzwerte für Trassierungs- und Gleisparameter für $\max V = 500 \text{ km/h}$	205
Tabelle 48:	IC-Fahrzeit (ohne Regel- und Bauzuschläge) zwischen Karlsruhe und Stuttgart.....	205
Tabelle 49:	RE-Fahrzeit (ohne Regel- und Bauzuschläge) zwischen Karlsruhe und Stuttgart.....	206

Abkürzungsverzeichnis

ABS	Ausbaustrecke
AEG	Allgemeines Eisenbahngesetz
Anm.	Anmerkung
ATO	Automatic Train Operation
Bhf	Bahnhof
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BVWP	Bundesverkehrswegeplan
bzw.	beziehungsweise
C ⁻¹	Inversen Kapazitätsermittlung/-bemessung
d.h.	das heißt
DB AG	Deutsche Bahn Aktiengesellschaft
DKS	Digitaler Knoten Stuttgart
DMI	Driver Machine Interface
DSD	Digitale Schiene Deutschland
DT	Distance Transform
EBO	Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung
EBWU	Eisenbahnbetriebswissenschaftliche Untersuchung
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
EIU	Eisenbahninfrastrukturunternehmen
EOA	End of Authority
etc.	et cetera
ETCS	European Train Control System
EU	Europäische Union
evtl.	eventuell
EVU	Eisenbahnverkehrsunternehmen
FF	Feste Fahrbahn
FK	Fahrstraßenknoten
FSL	Fahrschaulinie
FSS	Führerstandssignalisierung
GA	Genetischer Algorithmus
GG	Gleisgruppe
GI	Gleis
GSM-R	Global System for Mobile Communications – Railway

Hbf	Hauptbahnhof
HBL	Hochleistungsblock
HGV	Hochgeschwindigkeitsverkehr
Hp	Hauptsignal
HV- System	Haupt-Vorsignal-System
i.A.	im Allgemein
i.d.R.	in der Regel
i.M.	im Mittel
i.V.m.	in Verbindung mit
IC	Intercity
ICE	Intercity Express
inkl.	inklusive
ITF	Integraler/Integrierter Taktfahrplan
Ka	Karlsruhe
L	Leistung
LP	Lineare Programming
LST	Leit- und Sicherungstechnik
LZB	Linienzugbeeinflussung
MIP	Mixed-Integer Programming
NBS	Neubaustrecke/neuzubauende Strecke
NTC	National Train Control
ÖV	Öffentlicher Verkehr
PZB	Punktförmige Zugbeeinflussung
RBC	Radio Block Center
RE	Regional Express
s.o.	siehe oben
SchO	Schotteroberbau
SFS	Schnellfahrstrecke
SPNV	Schienenpersonennahverkehr
Stgt	Stuttgart
SvL	Supervise Location
Tf	Triebfahrzeugführer
TFK	Teilfahrstraßenknoten
Tfz	Triebfahrzeug

TSI	Technische Spezifikationen für die Interoperabilität
TSI INF	Technische Spezifikation, Infrastruktur-Teilsystem
UIC	Union Internationale des Chemins de fer
usw.	und so weiter
v	Geschwindigkeit in m/sec
V	Geschwindigkeit in km/h
vgl.	vergleiche
Vr	Vorsignal
z.B.	zum Beispiel
z.T.	zum Teil

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Dimensionierung der Infrastruktur ist eine der wichtigsten Aufgaben des Eisenbahnwesens. Wenn die Infrastruktur den Betriebsanforderungen nicht gerecht wird, kann es zu Engpässen² kommen. Diese lassen sich nur durch Infrastrukturmaßnahmen wie Um-/Aus-/Neubau oder betriebliche Anpassung z.B. von Fahrplänen vermeiden. Daher ist es im Eisenbahnwesen besonders wichtig, dass die durch eine Verkehrsprognose festgelegten mittel- und langfristigen Transportanforderungsziele erreicht werden. Der Zweck der Dimensionierung der Infrastruktur besteht darin, diese in ausreichender Form für die prognostizierte Transportkapazität bereitzustellen.

Die vorhandenen Verfahren zur Bestimmung des Umfangs der Infrastruktur beruhen hauptsächlich auf Prognosen zum Verkehrsaufkommen, die den möglichen zukünftigen Verkehrsbedarf abschätzen. Auf dieser Grundlage wird der Umfang der Infrastruktur ermittelt.

Aufgrund der Komplexität der Politik und des Bauprozesses besteht ein Problem bei der Dimensionierung der Infrastruktur darin, die eventuellen Anpassungen infolge der langen Zeiträume bis ein Bauvorhaben abgeschlossen ist abzuschätzen. Z.B. hat der Aus-/Neubau der Schnellfahrstrecke Nürnberg–Ingolstadt–München³ zwölf Jahre gedauert, Planungs- und Genehmigungsverfahren nicht eingerechnet [21].

Darüber hinaus ist es nicht einfach die Baukosten von Großprojekten im Voraus exakt zu bestimmen. Entscheidungen darüber, welches Projekt in welcher Form in Angriff genommen wird, werden i.d.R. auch von der Politik beeinflusst [92]. Aus politischer Sicht lassen sich Infrastrukturbauten und Fahrpläne aufgrund der langen Planungs- und Umsetzungszeit nur ineffizient miteinander vereinbaren [47].

² Engpässe sind in der Richtlinie 405 der DB AG definiert [98], siehe Kapitel 2.4.1 und [49].

³ Die Strecke ist in zwei Abschnitte unterteilt: die Neubaustrecke (NBS) Nürnberg–Ingolstadt und die Ausbaustrecke (ABS) Ingolstadt–München [21]. Die Schnellfahrstrecke (SFS) Nürnberg–München wurde 1985 in den Bundesverkehrswegeplan (BVWP) aufgenommen. Das Raumordnungsverfahren wurde 1989 eingeleitet und 1991 abgeschlossen. Mit der Haushaltsermächtigung im Jahr 1996 hatte der Deutsche Bundestag schließlich dafür die Weichen gestellt. Am 28. Mai 2006 begann auf dem NBS-Abschnitt ein Vorlaufbetrieb mit Fernzügen.

Hinsichtlich der Anpassungen besteht ein anderes Problem darin, dass das Kapazitätsziel innerhalb des vorhergesagten Zeitrahmens weit von der tatsächlichen Transportanforderung abweichen kann [35].

Aufgrund des großen Planungshorizonts⁴ ist eine langfristige Prognose des Verkehrsaufkommens erforderlich. Die Erstellung solcher Prognosen erfordert große Erfahrung. Zudem können die verkehrlichen Anforderungen schnell geändert werden, wohingegen der Neu- oder Ausbau der vorhandenen Infrastruktur langsam vonstattengeht. Das hat zur Folge, dass die Infrastrukturoptimierung eine Hysterese ist.

Zudem sollte die Infrastruktur der Bahn über einen langen Zeitraum⁵ nutzbar sein. Wenn die momentane Dimensionierung der Infrastruktur den Anforderungen nicht entspricht, kann dies dazu führen, dass bei zukünftigen Änderungen die verkehrlichen Anforderungen noch weniger erfüllt werden können.

Unter diesen komplexen Bedingungen wird ein sehr flexibles und zuverlässiges Verfahren benötigt, mit dem die Infrastruktur auf nachhaltige Weise dimensioniert werden kann.

Seit den 1980er Jahren hat Universitätsprofessor Dr.-Ing. E. HOHNECKER das Prinzip der Inversen Kapazitätsbemessung (C^{-1}) erdacht und ab Mitte der 1990er Jahre als Leiter der Abteilung Eisenbahnwesen am Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen (ISE) der Universität Karlsruhe (TH) – später Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – veranlasst dieses Verfahren zu untersuchen bzw. umzusetzen:

Um das oben erwähnte Problem der traditionellen Verfahren zu umgehen, soll die Infrastruktur ausgehend von einem konkreten Fahrplan oder dem zu erwartenden Betriebsprogramm dimensioniert werden.

Daher ist ein langfristiger, möglichst zukunftsfähiger Fahrplan ein wesentlicher Bestandteil der Spurplangestaltung und hat einen entscheidenden Einfluss auf die Dimensionierung der Infrastruktur. Dieser – gegenüber dem vorhandenen Ansatz – umgekehrte/inverse Prozess kann an das zu erwartende Betriebsgeschehen angepasst werden.

4 Nach BVWP und „Standardisierte Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen im schienengebundenen öffentlichen Personennahverkehr“ beträgt die rechnerische Nutzungszeit der Eisenbahninfrastruktur bis zu 75 Jahre. Entsprechend beträgt der Prognosehorizont ca. 50-60 Jahre [58].

5 „Ingenieurbauwerke wie Brücken, Tunnel und Erdkörper haben eine Lebensdauer von mehr als hundert Jahren.“ ([114]). Z.B. zeigt DB TSS in Bild 5 [63] die reale technische Lebensdauer von Bahnsteigen mit ca. 100 Jahren.

Der langfristige Fahrplan sollte zukunftsfähig – im Personenverkehr möglichst als Taktfahrplan – systematisiert und periodisch sein, d.h., die Züge fahren wiederholt in regelmäßigen Abständen in verschiedenen Zeiträumen [84]. Wenn dann die Infrastruktur so bestimmt wird um den Transportbedarf eines Takts zu decken, erfüllt die ermittelte Infrastruktur auch den gesamten Fahrplan.

Das BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR (BMVI) hat 2015 die „Machbarkeitsstudie zur Prüfung eines Deutschland-Takts im Schienenverkehr“ herausgegeben [3]. „Deutschland-Takt“ bezeichnet ein Konzept für einen deutschlandweit abgestimmten integrierten Taktfahrplan (ITF)⁶. 2016 hat das BMVI den Zielfahrplan 2030 zum BVWP 2030⁷ beauftragt. Auf der Basis des Zielfahrplans 2030 wird ein ITF als „Deutschland-Takt“ entwickelt [5].

Nicht nur der für die hier beschriebenen Aufgaben langfristige Fahrplan, sondern auch der Gesamtkomplex „Deutschland-Takt“ stellen künftige Anforderungen an die Eisenbahninfrastruktur, die entsprechend festgelegt werden müssen [57].

Um den spezifischen Anforderungen an die Infrastruktur gerecht zu werden, sollte statt nachfrageorientierter Fahrpläne oder streckenabhängiger Taktfahrpläne der ITF als systematisierter, periodischer Fahrplan genutzt werden. Diese ITF-Studien bestimmen die benötigte Infrastruktur für jeden Abschnitt.

1.2 Ziele

Ziel der Arbeit ist es zuerst eine NBS zu erstellen, auf welcher die Fahrzeit eines Zuges der Fahrzeit zwischen zwei Systemhalten eines zukunftsfähigen ITF entspricht, um daraus für jeden Abschnitt die mindestens benötigte Infrastruktur abzuleiten.

Die Hauptherausforderungen sind die Bestimmung von

- Trassierungs- und Gleisparametern in Abhängigkeit der Fahrzeit
- notwendige Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Fahrzeit
- Anzahl der Gleise inklusive der Gleisverbindungen
- Leit- und Sicherungstechnik (LST)

⁶ Beschreibung ITF siehe Kapitel 2.4.1

⁷ Der BVWP 2030 zeigt die Aus- und Neubauprojekte im Bereich der Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasserstraße für die kommenden 10 bis 15 Jahre

Derzeit gibt es keine ausgereiften wissenschaftlichen Ansätze, um die Infrastruktur der Eisenbahn für einen bestimmten oder zukünftigen Fahrplan reproduzierbar zu optimieren.

In den Arbeiten von WIECZOREK [140] und HARTMANN [42] wird ein solcher Prozess aus der theoretischen Perspektive beschrieben. Hierbei besteht ein erster Versuch darin, diesen Prozess in mathematischen und logischen Schritten zu analysieren. Diese sind auf einen „Bahnhof“⁸ bzw. auf die „Freie Strecke“⁹ beschränkt.

WIECZOREK nimmt drei Teile im Knoten an (Gleisgruppen und die Bahnhofsköpfe links und rechts davon), von denen jeder voll belegt ist, jedoch wird die ortsbezogene Fahrzeit im Bahnhof ignoriert.

Da HARTMANN Beschleunigungs- und Bremsvorgänge sowie Widerstände während der gesamten Fahrt ignoriert, ist die gesamte Fahrzeit reibungslos.

DÜPMEIER [29] kombiniert beide Methoden von WIECZOREK und HARTMANN.

TZSCHASCHEL [122] löst das Problem der Trennung von Bahnhöfen und Freie Strecke und betrachtet die gesamte Infrastruktur unter Bedingungen, bei denen weder der Fahrplan noch die Infrastruktur unvollständig vorbestimmt ist.

Ziel dieser Arbeit ist ein umfassendes Optimierungsmodell zu erarbeiten, das auf den vorhandenen relevanten Forschungsergebnissen in Kombination mit Topographie, Fahrdynamik und Fahrplan/Betriebsprogramm¹⁰ basiert. Um die optimale Anordnung von Bahnhöfen und Freier Strecke für die langfristige Infrastrukturgestaltung zu bestimmen, werden die Aufgaben folgendermaßen zusammengefasst:

- Fahrzeitermittlung für einen zukunftsfähigen Fahrplan → Strecken- und Fahrzeugparameter
- Ermittlung einer notwendigen Gleisinfrastruktur → Spurplan
- Optimale Platzierung der Fahrweg-/ Fahrzeugüberwachung → LST

1.3 Überblick

In Kapitel 2 werden zunächst die notwendigen Grundlagen für das Verständnis dieser Arbeit geschaffen. Diese umfassen die Beschreibung der Grundlagen der Eisenbahninfrastruktur, der Fahrdynamik und des Eisenbahnbetriebs.

8 Beschreibung „Bahnhof“ siehe Kapitel 2.2.1

9 Beschreibung der „Freie Strecke“ siehe Kapitel 2.2.1

10 Beschreibung von Fahrplan und Betriebsprogramm siehe Kapitel 2.4.1

In Kapitel 3 wird ein Modell für NBS mit einer Fahrzeitberechnung unter Berücksichtigung der Trassierungs-, Gleis- und Fahrdynamikparametern vorgestellt. Auf der Grundlage der für den ITF geltenden Fahrzeit zwischen zwei Systemhalten werden die optimalen Geschwindigkeiten für jeden Punkt auf der Strecke ermittelt.

In Kapitel 4 wird unter Berücksichtigung der „*Digitalen Schiene Deutschland*“ (DSD)¹¹ ein Modell zur Infrastrukturdimensionierung in Knoten und auf Freier Strecke entwickelt. Hierfür liegt der Fokus insbesondere auf der Anzahl der Gleise und den Verbindungen der Fahrstraßen für einen vorgegebenen ITF.

In Kapitel 5 wird an einem Anwendungsbeispiel das Vorgehen untersucht.

Kapitel 6 schließt diese Arbeit mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse und einem Ausblick auf weitere Entwicklungsmöglichkeiten ab.

¹¹ Um eine hohe Leistung mit höherer Kapazität, effizienterer Produktion und intelligenter Steuerung zu erreichen, schlägt die DB das Konzept der DSD vor [20]. Die DSD wird durch die flächendeckende Realisierung des EUROPEAN TRAIN CONTROL SYSTEMS (ETCS) und digitalen Stellwerke erzielt [4].

2 Grundlagen der Eisenbahninfrastruktur-Dimensionierung

Wie in Kapitel 1 beschrieben, sind beim Verkehrsträger Eisenbahn die Dimensionierung der Infrastruktur und der auf dieser durchzuführende Betrieb auf der Grundlage von Fahrplänen unmittelbar miteinander zusammenhängende Aufgaben.

Dieses Kapitel führt in die allgemeine Thematik der Ermittlung der Eisenbahninfrastruktur ein und betrachtet die Grundlagen des Eisenbahnbetriebs. Die inhaltlichen Schwerpunkte sind:

1. Erklärung von Begriffen und Zusammenhängen
2. Vorstellung des bisherigen Forschungsstands

Dazu ist dieses Kapitel in vier Abschnitte mit abschließender Zusammenfassung unterteilt:

- Kapitel 2.1: Modellierung der Eisenbahninfrastruktur
 - Makroskopisches Modell
 - Mikroskopisches Modell
- Kapitel 2.2: Grundlagen der Eisenbahninfrastruktur
 - Begriffe und Definitionen
 - Linienführung, Trassierungs- und Gleisparameter
- Kapitel 2.3: Grundlagen der Fahrdynamik
 - Freiheitsgrade
 - Zugbewegungsprozess
 - Ruck
 - Energetische Betrachtung der Fahrt
- Kapitel 2.4: Grundlagen des Eisenbahnbetriebs
 - Begriffe und Definitionen
 - Konventionelle Verfahren zur Infrastrukturermittlung
 - Inverse Kapazitätsermittlung/-bemessung (C-1)
- Kapitel 2.5: Zusammenfassung

2.1 Modellierung der Eisenbahninfrastruktur

Bei der Modellierung der Eisenbahninfrastruktur wird empfohlen, die aus der Graphentheorie¹² abgeleitete Struktur anzuwenden. In [90] erwies sich die Graphentheorie als ein Ansatz zur Umwandlung einer komplexen Eisenbahninfrastruktur in mathematische Beziehungen.

Um ein besseres Verständnis zur Modellierung der Eisenbahninfrastruktur zu erhalten, wird im Folgenden der allgemeine Aufbau beschrieben. Dabei wird ein Knoten als ein

¹² Die Graphentheorie ist eine Methode zur Untersuchung der Eigenschaften von Elementen und der Beziehungen zwischen ihnen durch einen Graphen, der aus den Elementen Knoten und Kanten besteht [90].

beliebiger Ort im Eisenbahnnetz gesehen und eine Kante kennzeichnet eine Verbindung zwischen zwei Knoten (Abbildung 1).

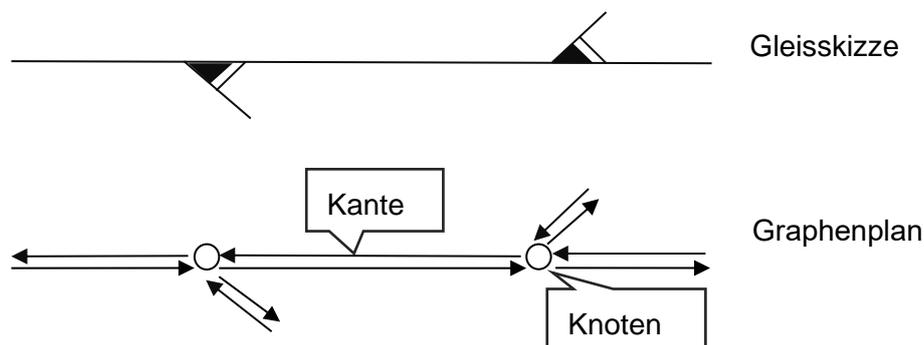


Abbildung 1: Vom Gleisplan zur Modellierung der Eisenbahninfrastruktur ([70], S. 18)

In der Leistungsfähigkeitsforschung können unterschiedliche Modelle verwendet werden, um die Eisenbahninfrastruktur sowie den Betrieb je nach Aufgabenstellung und erforderlichem Detaillierungsgrad zu beschreiben. Daher muss ein geeignetes Modell verwendet werden, welches ausgewählte Kenngrößen berechnen kann. I.d.R. wird der Grad der Infrastrukturdetaillierung in zwei Typen unterteilt [85]:

- Makroskopisches Modell
- Mikroskopisches Modell

Abbildung 2 zeigt einen Vergleich des Detaillierungsgrads dieser beiden Modelle. Daraus ist ersichtlich:

Je kleinteiliger die Infrastruktur aufgezeigt werden soll, je höher ist der Detaillierungsgrad, der wiederum eine große Datenmenge generiert.

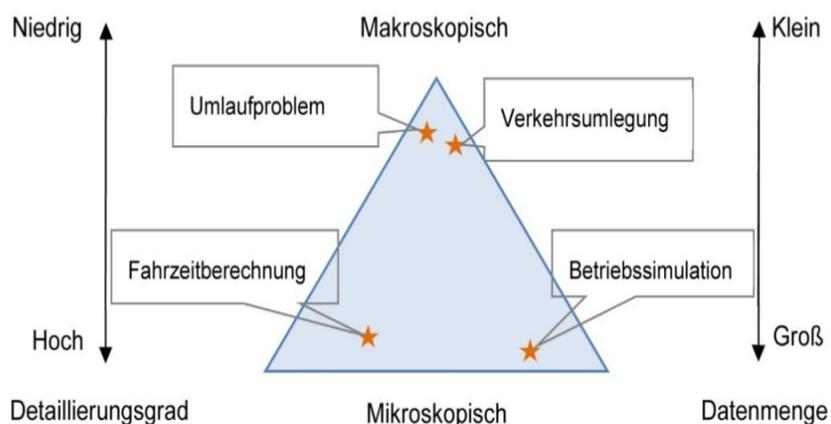


Abbildung 2: Einsatzfelder der Infrastrukturmodelle ([93], S. 12)

2.1.1 Makroskopisches Modell

Das Eisenbahnnetz oder -teilnetz wird als eine Menge von Knoten modelliert, die im makroskopischen Modell durch Kanten verbunden sind. I.A. werden Bahnhöfe als Knoten

und Strecken als Kanten modelliert. *Abbildung 3* zeigt ein Beispiel, in dem jeder Knoten als Bahnhof oder Abzweigstelle¹³ definiert ist.

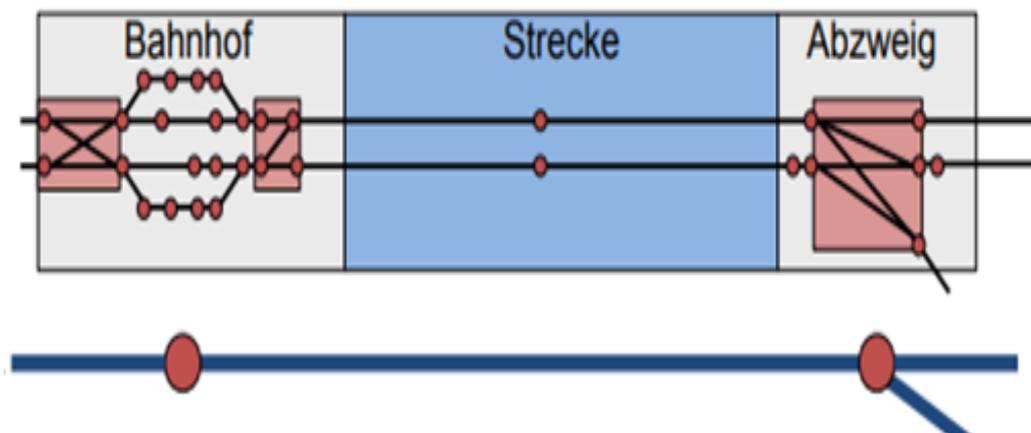


Abbildung 3: Makroskopisches Modell ([77], S. 21)

Da alle Elemente einer Betriebsstelle im Bahnhof in einem Knoten zusammengefasst werden, werden Weichenverbindungen beim makroskopischen Modell i.d.R. ignoriert. Da der Detaillierungsgrad und somit die Datenmenge des makroskopischen Modells erheblich geringer ist als beim mikroskopischen Modell, ist auch der Rechenaufwand im makroskopischen Modell wesentlich kleiner.

Makroskopische Modelle eignen sich nicht für alle detaillierten Planungsaufgaben des Eisenbahnbetriebs, wie z.B. der Berechnung von Fahrzeiten oder der Untersuchung von Konflikten [93].

2.1.2 Mikroskopisches Modell

Im mikroskopischen Modell kann die detaillierte Infrastruktur aller Gleise, Weichen und signalschutzbezogenen Punkte genau dargestellt werden. Daher sind alle relevanten Informationen, wie z.B. Steigung/Gefälle, Bogen, Langsamfahrstelle¹⁴ und Geschwindigkeitsbegrenzung darin enthalten, die für eine genaue Berechnung der Fahrzeit erforderlich sind. Das Ergebnis kann zur Bewertung der Qualität des Eisenbahnbetriebs herangezogen werden.

¹³ „Abzweigstellen sind Blockstellen der Freien Strecke, wo Züge von einer Strecke auf eine andere Strecke übergehen können.“ [31]. Wenn eine „Abzweigstelle“ mit einem „Haltepunkt“ verbunden ist, wird sie auch als „Haltestelle“ bezeichnet.

¹⁴ Eine „Langsamfahrstelle“ ist ein Abschnitt einer Eisenbahnstrecke, auf der nicht die davor und dahinter liegende max. Geschwindigkeit gefahren werden kann. „Die Langsamfahrsignale dienen zur Kennzeichnung von Langsamfahrstellen.“ [96]

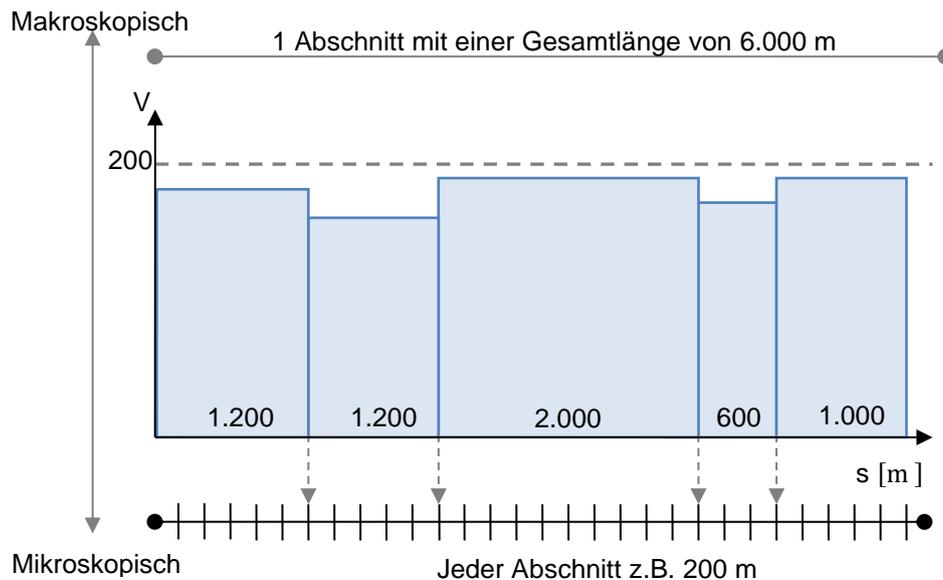


Abbildung 4: Beziehung zwischen makro- und mikroskopischen Modellen ([85], S. 57)

Abbildung 4 zeigt den Unterschied zwischen den makro- und mikroskopischen Modellen z.B. bei der Untersuchung der Fahrgeschwindigkeit:

- Beim makroskopischen Modell wird die Kante zwischen zwei Konten als ein einzelnes Untersuchungsgebiet betrachtet, daher gibt es nur die grobe, durchgehende Geschwindigkeitsbegrenzung.
- Im mikroskopischen Modell müssen alle infrastrukturbezogenen Komponenten des Bahnhofs detailliert modelliert werden (in *Abbildung 4* z.B. in 200 m-Abschnitten), da sie einen erheblichen Einfluss auf die Berechnung der Fahrzeit haben.

Um die Fahrzeit genau zu berechnen, ist es notwendig alle fahrdynamischen Parameter eines Zuges und der Infrastruktur im Detail zu betrachten. Daher wird in dieser Arbeit das mikroskopische Modell zur Modellierung der Infrastruktur verwendet.

2.2 Grundlagen der Eisenbahninfrastruktur

In diesem Kapitel werden Begriffe definiert, welche einen Bezug zur Eisenbahninfrastruktur haben.

2.2.1 Begriffe und Definitionen

Infrastruktur

Die Definition des Begriffs „Infrastruktur“ hängt von dem jeweiligen Tätigkeitsbereich und der Institution ab:

- die EISENBAHNBAU- UND BETRIEBSORDNUNG (EBO) [31] spricht von „*Bahnanlagen*“: das „... sind alle Grundstücke, Bauwerke und sonstigen Einrichtungen einer Eisenbahn, die unter Berücksichtigung der örtlichen Verhältnisse zur Abwicklung oder Sicherung des Reise- oder Güterverkehrs auf der Schiene erforderlich sind. Dazu gehören auch

Nebenbetriebsanlagen sowie sonstige Anlagen einer Eisenbahn, die das Be- und Entladen sowie den Zu- und Abgang ermöglichen oder fördern. Es gibt Bahnanlagen der Bahnhöfe, der Freien Strecke und sonstige Bahnanlagen.“

- das ALLGEMEINE EISENBAHNGESETZ (AEG) [1] bezeichnet sie als „Eisenbahninfrastruktur“
- WIEZOREK [140] hat die betriebliche Infrastruktur in einer eigenen Definition zusammengefasst:
„Die betriebliche Infrastruktur (auch Betriebsanlagen oder kurz Infrastruktur) umfasst alle ortsfesten Anlagen, die unmittelbar dem Eisenbahnbetrieb dienen. Neben den Anlagen des Fahrwegs, die der eigentlichen Fahrzeugbewegung dienen, sind dies auch Anlagen, die für die Verkehrssicherheit notwendig sind.“

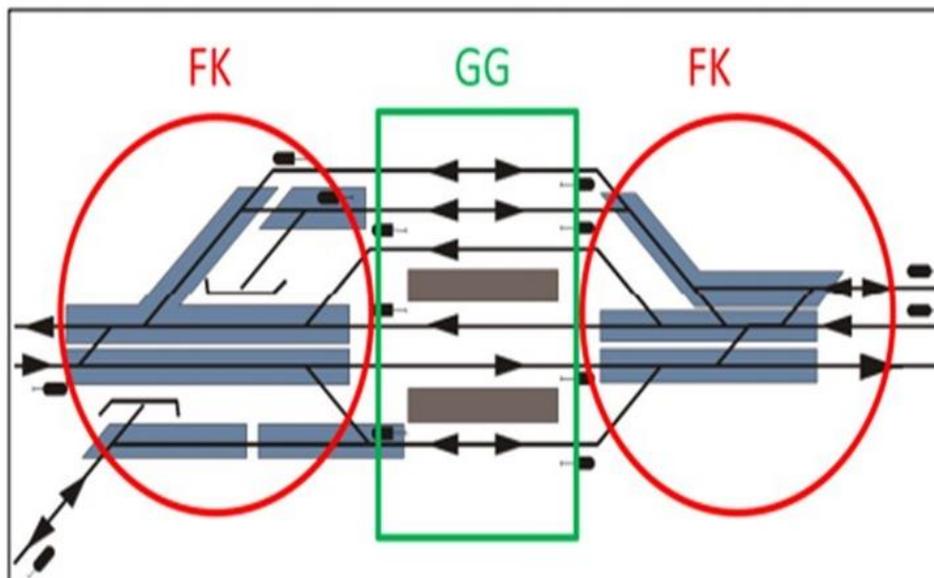


Abbildung 5: Fahrstraßenknoten (FK) und Gleisgruppe (GG) eines Durchgangsbahnhofs ([77], S. 19)

Die Gleisinfrastruktur beinhaltet in dieser Arbeit: Bahnhöfe, Gleisgruppen, Fahrstraßenknoten, Bahnhofsköpfe (Abbildung 5) und die Freie Strecke.

Bahnhöfe

Bahnhöfe sind nach EBO § 4 [31]

„... Bahnanlagen mit mindestens einer Weiche, wo Züge beginnen, enden, ausweichen oder wenden dürfen. Als Grenze zwischen den Bahnhöfen und der Freien Strecke gelten im Allgemeinen die Einfahrtsignale oder Trapeztafeln, sonst die Einfahrweichen.“

Bahnhöfe werden z.B. unterschieden in

- Durchgangsbahnhöfe
- Kopfbahnhöfe

Grundsätzlich wird ein Durchgangsbahnhof in drei Teile aufgegliedert (Abbildung 5):

- Bahnhofskopf links
- Gleisgruppe
- Bahnhofskopf rechts

Beim Kopfbahnhof erfolgt die Unterteilung in den Bahnhofskopf und die Gleisgruppen. I.d.R. enden bei diesem Bahnhofstyp alle Gleise an einem Gleisabschluss (Prellbock¹⁵) [78]. *Abbildung 6* zeigt einen Kopfbahnhof mit Gleisanschlüssen zur Streckenkreuzung.

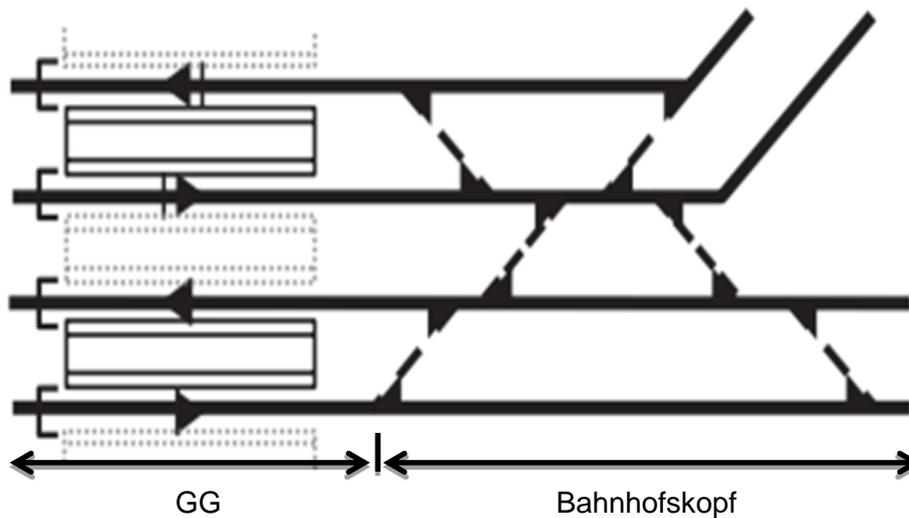


Abbildung 6: Kopfbahnhof ([34], S. 476)

Gleisgruppe

Nach Richtlinie 405 [98]:

„Als Gleisgruppe wird der Anlagenteil eines Bahnhofs zwischen den Bahnhofsköpfen verstanden, der die Bahnsteig-, Durchfahr- und Überholungsgleise sowie die Behandlungsgleise umfasst, in denen Halte sowie (...) Wartevorgänge stattfinden.“

Fahrstraßenknoten

Nach PACHL [40] ist ein Fahrstraßenknoten ein

„... durch entgegengesetzt gerichtete Hauptsignale begrenzter Gleisbereich, in dem mehrere Fahrwege von Zügen durch Weichen und/oder Kreuzungen miteinander verbunden sind.“

Bahnhofskopf

Nach MENIUS/MATTHEWS [78]:

„Häufig verwendet wird auch der Begriff Bahnhofskopf für den Bereich zwischen den Ausfahrtsignalen und den Einfahrtsignalen, in dem sich in aller Regel die Weichen, Kreuzungen und Kreuzungsweichen befinden.“

Gemäß den beiden vorherigen Definitionen ist nach [40] und [78] ersichtlich, dass von dem gleichen Bereich die Rede ist. Deshalb werden in dieser Arbeit diese Bereiche der Fahrstraßenknoten als Bahnhofskopf bezeichnet.

¹⁵ Ein Prellbock ist eine Form eines Gleisabschlusses. Er verhindert, dass ein Fahrzeug auf einem Stichgleis einer Eisenbahnstrecke über das Gleisende hinausrollt.

Haltepunkte

Nach EBO § 4 [31]:

„... sind Haltepunkte Bahnanlagen ohne Weichen, wo Züge planmäßig halten, beginnen oder enden dürfen.“

Freie Strecke

Nach der EBO-Definition [31] für die Grenzen von Bahnhöfen (s.o. Definition Bahnhöfe und Haltepunkte, EBO § 4) kann der Schluss gezogen werden, dass die „Freie Strecke“ zu den Eisenbahngleisanlagen gehört, die außerhalb des Bahnhofs und der Haltepunkte liegen. D.h.:

Der Bereich zwischen den Einfahr-/Ausfahrtsignalen von zwei sich folgenden Bahnhöfen/Haltepunkten wird als „Freie Strecke“ bezeichnet.

2.2.2 Linienführung, Trassierungs- und Gleisparameter

Die Linienführung einer Eisenbahnstrecke wird durch Trassierungs- und Gleisparameter im Lage- und Höhenplan bestimmt. Diese werden in der DB-Richtlinie 800.0110 [103] durch die nachstehenden Begriffe in ihren Grenzen festgelegt (*Tabelle 1*).

Tabelle 1: Ermessens- und Genehmigungsbereich für die Trassierungs- und Gleisparameter [103]

Ermessensbereich	Höchst- bzw. Mindestwert
	Regelwert
	Ermessensgrenze
Genehmigungsbereich	Zustimmungswert
	EBO-Grenze

Ermessensbereich

Der Ermessensbereich legt neben den Höchst- bzw. Mindestwerten des untersuchten Parameters den Regelwert fest.

I.d.R. sollen die *„... Höchst- bzw. Mindestwerte nicht über- bzw. unterschritten werden.“* [103].

Für eine wirtschaftliche Trassierung werden *„... Regelwerte [...] angewendet.“* [103]. Die Regelwerte basieren auf wissenschaftlichen Erkenntnissen und praktischen Erfahrungen.

Die Ermessensgrenzen umfassen i.d.R. die Grenzen einer wirtschaftlichen Instandhaltung.

Genehmigungsbereich

Es sollte vermieden werden, mit den Werten des Genehmigungsbereichs zu trassieren.

Im Einzelfall darf der Zustimmungswert durch die Zustimmung der Zentrale der DEUTSCHE BAHN NETZ AKTIENGESELLSCHAFT (DB Netz AG) [103] verwendet werden.

Die EBO gibt die Grenzwerte für den Genehmigungsbereichen vor.

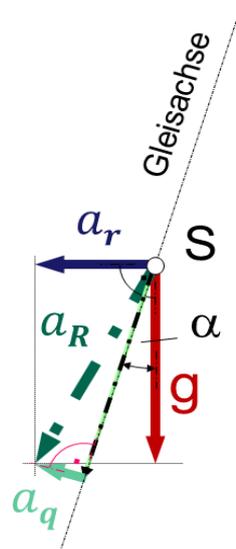
2.2.2.1 Gleisparameter

2.2.2.1.1 Überhöhung u

In Gleisbogen wird zur Reduzierung der auf das Fahrzeug und das zu transportierende Gut wirkenden Zentrifugalbeschleunigung eine Überhöhung u der Gleisbogenaußenschiene eingebaut. Die Überhöhung u wird durch den Höhenunterschied der außen- gegenüber der innenliegenden Schiene im Gleisbogen angegeben.

Wenn ein Zug durch einen Bogen fährt, entwickelt sich eine Beschleunigung aus der Zentrifugalkraft zur Gleisbogenaußenseite, die auf das Fahrzeug wirkt (Abbildung 7) und sich wie folgt aufteilt:

- die Resultierende der Beschleunigungen a_R setzt sich zusammen aus der Radialbeschleunigung a_r und der Erdbeschleunigung g
- die Radialbeschleunigung a_r ist horizontal und radial zur Bogenaußenseite ausgerichtet
- die Erdbeschleunigung g verläuft senkrecht zur Zentrifugalbeschleunigung
- die für die Bemessung des Fahrwegs und die auf das Fahrzeug maßgebende Seitenbeschleunigung a_q verläuft in der Gleisebene radial zur Bogenaußenseite



S = Fahrzeugschwerpunkt

g [m/sec²] = Erdbeschleunigung

α [°] = Gleisüberhöhungswinkel

Zentrifugalbeschleunigung

- a_R [m/sec²] = Resultierende der Beschleunigungen
- a_r [m/sec²] = Radialbeschleunigung
- a_q [m/sec²] = Seitenbeschleunigung in Gleisebene

Abbildung 7: Beschleunigungen bei der Fahrt durch einen Bogen [50]

Mit der Überhöhung u der Gleisbogausschiene wird angestrebt in Abhängigkeit der zulässigen Geschwindigkeit v zumindest einen Anteil der Zentrifugalbeschleunigung zur Gleisbogausschiene auf ein angemessenes Maß des Komforts zu reduzieren.

Aus *Abbildung 7* ergibt sich die Seitenbeschleunigung in Gleisebene a_q im Gleisbogen mit:

$$a_q = a_r \cdot \cos \alpha - g \cdot \sin \alpha \quad (2-1)$$

Dabei sind:

$$\sin \alpha = \frac{u}{s_k} \quad (2-2)$$

$$a_r = \frac{v^2}{r} \quad (2-3)$$

u [mm] = Überhöhung
 s_k [mm] = Abstand der Radaufstandspunkte¹⁶
 r [m] = Kreisbogenradius
 v [m/sec] = Geschwindigkeit

Nach Einsetzen der Gleichungen (2-2) und (2-3) in (2-1) ergibt sich die Seitenbeschleunigung in Gleisebene a_q zu:

$$a_q = \frac{v^2 \cdot \cos \alpha}{r} - g \cdot \frac{u}{s_k} \quad (2-4)$$

Die Überhöhung u der Bogausschiene berechnet sich mit:

$$u = \frac{s_k}{g} \cdot \left(\frac{v^2 \cdot \cos \alpha}{r} - a_q \right) \quad (2-5)$$

Wenn der Gleisüberhöhungswinkel α sehr klein ist, wird $\cos \alpha = 1$. Daraus ergibt sich die Überhöhung u mit:

$$u = \frac{s_k}{g} \left(\frac{v^2}{r} - a_q \right) \quad (2-6)$$

Die Überhöhung u kann auch wie folgt dargestellt werden:

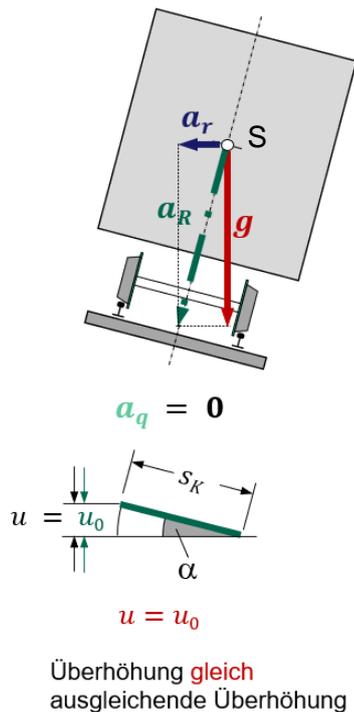
$$u = u_0 - u_f \quad (2-7)$$

u_0 [mm] = ausgleichende Überhöhung
 u_f [mm] = Überhöhungsfehlbetrag¹⁷

Wenn der Wert der Überhöhung u die koordinierte Beziehung zwischen der Geschwindigkeit v eines Zuges und dem Radius r erfüllt, so dass die Resultierende der Beschleunigungen a_R genau auf der Fahrzeughochachse liegt, wird diese Überhöhung als „ausgleichende Überhöhung u_0 “ bezeichnet (*Abbildung 8*).

¹⁶ Bei Normal-/Regelspur 1.500 mm

¹⁷ Siehe Kapitel 2.2.2.1.2



u [mm] = bauliche Gleisüberhöhung

u_0 [mm] = ausgleichende Überhöhung ($a_q = 0 \text{ m/sec}^2$)

Abbildung 8: Ausgleichende Überhöhung u_0 [50]

Wenn alle Züge die gleichen Eigenschaften haben und an jeder Stelle mit der gleichen Entwurfsgeschwindigkeit v fahren würden, kann die bauliche Überhöhung u gleich der ausgleichenden Überhöhung u_0 gesetzt werden, um $a_q = 0 \text{ m/sec}^2$ und damit keine Zentrifugalbeschleunigung für das zu transportierende Gut zu erzeugen (vgl. *Tabelle 2*). D.h.:

Wenn die geplante Überhöhung u gleich der ausgleichenden Überhöhung u_0 ist, ist die Seitenbeschleunigung in Gleiseben $a_q = 0 \text{ m/sec}^2$.

Daraus bestimmt sich die ausgleichende Überhöhung u_0 wie folgt [50]:

$$u_0 = u + u_f = \frac{s_k}{g} \left(\frac{v^2 \cdot \cos \alpha}{r} \right) \approx \frac{s_k \cdot v^2}{g \cdot r} \quad (2-8)$$

Der häufig verwendete Näherungswert der ausgleichenden Überhöhung u_0 berechnet sich durch eine nicht dimensionsreine Gleichung mit:

$$u_0 \approx \frac{s_k \cdot v^2}{g \cdot r} = \frac{1.500 \cdot V^2}{9,81 \cdot 3,6^2 \cdot r} \cong 11,8 \frac{V^2}{r} \quad (2-9)$$

V [km/h] = Geschwindigkeit

Der Bogenradius r berechnet sich mit dem Gleisüberhöhungswinkel α nach [48]:

$$r = \frac{v^2 \cdot s_k}{g \cdot u_0} \cdot \cos \alpha \quad (2-10)$$

Nach [103] kann die Mindestüberhöhung $\min u$ mit Gleichung (2-11) aus (2-7) und (2-9) berechnet werden:

$$\min u = \frac{11,8 \cdot V^2}{r} - \text{zul } u_f \quad (2-11)$$

Die Ermessensgrenze der Mindestüberhöhung darf nach [103] $\min u = 30 \text{ mm}$ nicht unterschreiten¹⁸.

Tabelle 2 zeigt, wie i.A. die Wahl des Überhöhungswertes u beim Bau von Eisenbahnstrecken getroffen wird.

Tabelle 2: Kriterien zur Wahl der einzubauenden Überhöhung u [103]

Überhöhung	Verhältnisse im überhöhten Gleisbogen
$\min u < u < \text{reg } u$	<ul style="list-style-type: none"> • häufige Zughalte im Gleisbogen • planmäßige Anfahr-/Abbremsbereiche im Gleisbogen • $V \ll V_{\text{zul}}$
$\text{reg } u < u < u_0$	<ul style="list-style-type: none"> • nahezu gleiche Geschwindigkeit aller Züge im Gleisbogen (z.B. S-Bahn)

Nach [103], zweites Kriterium in *Tabelle 2*, soll bei der Planung die Überhöhung u kleiner als die ausgleichende Überhöhung u_0 sein. Dies führt i.d.R. zu einer unausgeglichene Seitenbeschleunigung in Gleisebene a_q .

Die geplante Überhöhung u ist immer geringer als die „ausgleichende Überhöhung u_0 “.

Die Größe der Radialkomponente a_r und der Seitenbeschleunigung in Gleisebene a_q hängt von der jeweiligen eingebauten Überhöhung u ab.

Aus *Tabelle 3* ist ersichtlich, dass für den Schotteroberbau (SchO) und die Feste Fahrbahn (FF) die Ermessensgrenzwerte der geplanten Höchstwerte nach DB-Richtlinie gelten [103]:

SchO $u = 160 \text{ mm}$
 FF $u = 170 \text{ mm}$

Unter Berücksichtigung der Abweichung im Betrieb darf dieser Grenzwert nach EBO [31] $u = 180 \text{ mm}$ nicht überschreiten.

Bei zukünftig evtl. $V \geq 400 \text{ km/h}$ könnte die maximale Überhöhung u_{max} einer Hochgeschwindigkeitsverkehrs-/Neubaustrecke/neuzubauenden Strecke (HGV-NBS) mit bis zu $\max u = 240 \text{ mm}$ ausgeführt werden [48].

¹⁸ Die Ermessungsgrenzen für die Mindestüberhöhung $\min u$ wurde am 14.01.2021 von $\min u = 20 \text{ mm}$ auf $\min u = 30 \text{ mm}$ geändert [103].

Tabelle 3: Obere Grenzwerte der Überhöhung u ([83], Ergänzung ZHAO)

	Grenzwerte der Überhöhung	
EBO [31]	$u_{\max} = 180 \text{ mm}$ (siehe § 6 (3) EBO)	
DB 800.0110¹⁹	Ermessengrenzwerte: SchO: $u_{\max} = 160 \text{ mm}$ FF: $u_{\max} = 170 \text{ mm}$	Zustimmungswerte: SchO: $160 \text{ mm} \leq u_{\max} \leq 180 \text{ mm}$ FF: $170 \text{ mm} \leq u_{\max} \leq 180 \text{ mm}$
TSI INF HGV²⁰	Neubau $u_{\max} = 180 \text{ mm}$	Bestand $u_{\max} = 190/200 \text{ mm (MV/PV)}^{21}$
TSI INF²²	Personenverkehr $u_{\max} = 180 \text{ mm}$	Güter-/Mischverkehr $u_{\max} = 160 \text{ mm (Scho)}$ $u_{\max} = 170 \text{ mm (FF)}$
DIN EN 13803²³	Grenzwert $D_{\max}^{24} = 160 \text{ mm}$	Außergewöhnlicher Grenzwert $D_{\max}^{24} = 160 \text{ mm}$
HOHNECKER [48]	Neubau $u_{\max} = 240 \text{ mm (FF)}$	

2.2.2.1.2 Überhöhungsfehlbetrag u_f

Der Überhöhungsfehlbetrag u_f stellt, wie in *Abbildung 9* dargestellt, die unausgeglichene Seitenbeschleunigung in Gleisebene a_q dar.

Ebenfalls aus *Abbildung 9* ist ersichtlich, dass die ausgleichende Überhöhung u_o die Summe der geplanten Überhöhung u plus dem Überhöhungsfehlbetrag u_f ist:

$$u_o = u + u_f \quad (2-12)$$

Aus den Gleichungen (2-6) und (2-7) lässt sich die Beziehung zwischen dem Überhöhungsfehlbetrag u_f und der Seitenbeschleunigung in Gleisebene a_q ableiten:

$$u_f = a_q \cdot \frac{s_k}{g} \quad (2-13)$$

19 DB Richtlinie 800.0110–Linienführung [103] ist aus der EBO abgeleitet. Sie entspricht dem europäischen und deutschen Recht

20 Die TSI INF HGV (Technische Spezifikation, Infrastruktur-Teilsystem, transeuropäisches Hochgeschwindigkeitsbahnsystem) [120] ist gültig für die Linienführung des HVG-Systems

21 MV = Mischverkehr, PV = Personenverkehr

22 TSI INF [121] (Technische Spezifikation, Infrastruktur-Teilsystem) sind vereinbarte einheitliche Anforderungen, um für das Eisenbahnsystem einen interoperablen und sicheren Verkehr innerhalb der EU zu gewährleisten. Entsprechend den Eigenschaften wurde die TSI in mehrere Teilsysteme unterteilt.

23 DIN EN 13803:2017 DE [26] legt „die Regeln und Grenzwerte für die Linienführung in Gleisen, einschließlich der Trassierung in Weichen und Kreuzungen fest“.

24 D = Überhöhung u nach DIN EN 13803 [26]

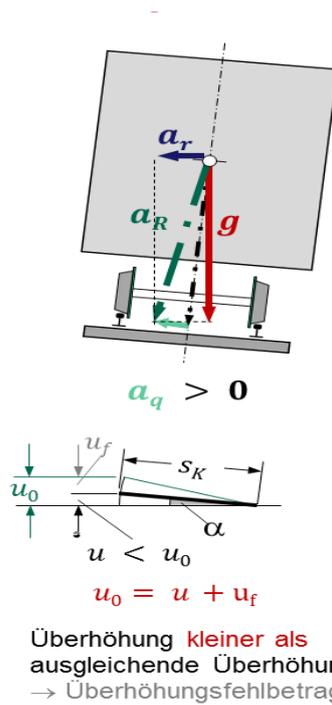


Abbildung 9: Beziehungen zwischen ausgleichender Überhöhung u_0 , geplanter Überhöhung u und dem Überhöhungsfehlbetrag u_f [50]

Tabelle 4 zeigt die Werte des Überhöhungsfehlbetrags u_f mit den entsprechenden Werten der Seitenbeschleunigung in Gleisebene a_q .

Tabelle 4: Werte des Überhöhungsfehlbetrags u_f mit den daraus entsprechend hervorgehenden Seitenbeschleunigungen in Gleisebene a_q ([83], S. 36)

Überhöhungsfehlbetrag u_f [mm]	Seitenbeschleunigung a_q [m/sec ²]
70	0,45
100	0,65
130	0,85
150	1,0
180	1,2

Nach [48] bestimmt sich der Gleisbogenradius r durch die Entwurfsgeschwindigkeit v , der geplanten Überhöhung u sowie dem Überhöhungsfehlbetrag u_f wie folgt:

$$r = \frac{v^2 \cdot s_K \cdot \cos\alpha}{g \cdot (u + u_f)} \quad (2-14)$$

Nach [103] müssen die Planungswerte für den Überhöhungsfehlbetrag u_f gemäß Tabelle 5 begrenzt werden.

Tabelle 5: Planungswerte für den Überhöhungsfehlbetrag u_f [103]

Bereich	Grenzen und Werte	Gleise	Weichen, Kreuzungen, Schienenauszüge ²⁵
Ermessensbereich	Höchst-/ Mindestwert	Nicht vorhanden	
	Regelwert	Nicht vorhanden	
	Ermessensgrenze	zul $u_f = 130$ mm Bei $r \geq 650$ m: zul $u_f = 150$ mm	u_f nach Tabelle 6 ²⁶ bei Rangiergeschwindigkeit ²⁷ : zul $u_f \leq 130$ mm
Genehmigungsbereich	Zustimmungswert	Bei Radien $250 \text{ m} \leq r \leq 650 \text{ m}$: $130 \text{ mm} \leq u_f \leq 150 \text{ mm}$	u_f (nach Tabelle 6 ²⁶) + 20%

2.2.2.1.3 Überhöhungsüberschuss u_u

Der Überhöhungsfehlbetrag kann je nach Geschwindigkeit v des betrachteten Zuges positive und negative Werte haben:

Wenn ein Zug durch einen Gleisbogen mit einer Geschwindigkeit v fährt, die so gering ist, dass eine Beschleunigung in Gleisebene entsteht, bei der die Zentrifugalkraft zum Radiusmittelpunkt wirkt, entsteht ein Überhöhungsüberschuss u_u (Abbildung 10).

D.h.: die geplante Überhöhung u ist größer als die ausgleichende Überhöhung u_0 .

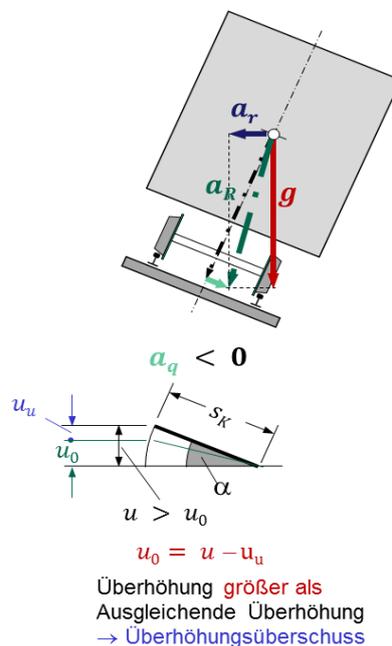


Abbildung 10: Beziehungen zwischen ausgleichender Überhöhung u_0 , geplanter Überhöhung u und dem Überhöhungsüberschuss u_u [50]

25 Der Schienenauszug ist ein Bauteil des Oberbaus, der aus Backenschiene und Zunge besteht. Er ermöglicht größere Schienenlängsbewegungen [79].

26 Tabelle in [103], Seite 12

27 Nach DB RiL 438 [101] beträgt die Rangiergeschwindigkeit ≤ 20 km/h

Die Beziehung der ausgleichenden Überhöhung u_o zu der geplanten Überhöhung u sowie dem negativen Überhöhungsfehlbetrag (= Überhöhungsüberschuss u_u) ist wie folgt:

$$u_o = u - u_u \quad (2-15)$$

2.2.2.2 Trassierungsparameter

2.2.2.2.1 Gerade und Gleisbogen

Die Gerade ist das vorherrschende Element bei der Eisenbahnlinienführung und -trassierung.

Eine Gerade repräsentiert bei den spurgeführten Systemen eine 2-dimensionale Strecke ohne Krümmung im Lageplan (x, y -Koordinaten).

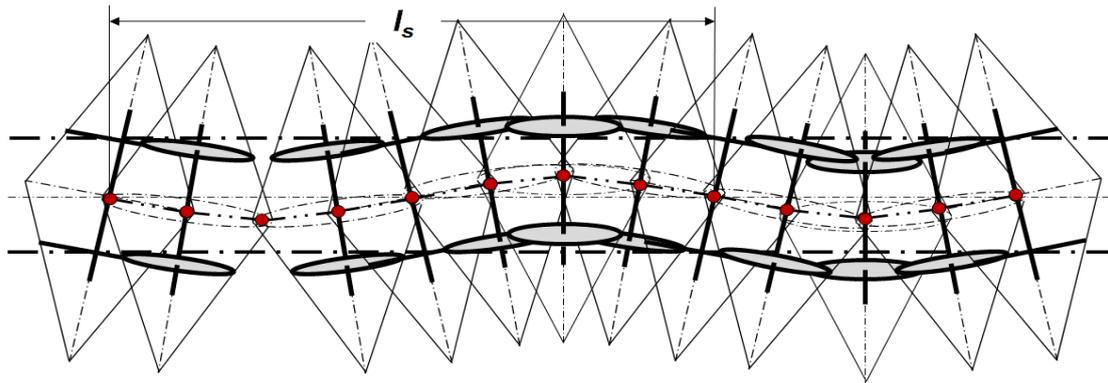
In Abhängigkeit der Geschwindigkeit v besteht beim Durchfahren eines Gleisbogens – je nach Radius r – die Gefahr des Kippens. Das bedeutet, dass ein Zug im gekrümmten Gleis mit radiusangepasster Geschwindigkeit v fahren muss.

Es ist daher vorteilhaft beim Entwurf der Linienführung einer Eisenbahnstrecke Geraden als vorrangiges Trassierungselement zu verwenden. Diese können von den Zügen, wenn triebfahrzeugtechnisch möglich, mit maximaler Streckengeschwindigkeit v_{\max} befahren werden.

2.2.2.2.1.1 Mindestlängen der Geraden und Gleisbogen

Um den Fahrgastkomfort zu gewährleisten, soll sowohl die Mindestlänge der Zwischengeraden l_g zwischen zwei aufeinanderfolgenden Gleisbogen als auch die Mindestlänge der Gleisbogen l_b begrenzt werden. So kann sich das Fahrzeug auf die jeweilige Gleichgewichtslage des Gleisabschnittes – hervorgehenden aus dem Sinuslauf²⁸ in den Geraden (*Abbildung 11*) bzw. durch die auftretenden Zentrifugalkräfte in den Gleisbogen (*Abbildung 7 bis Abbildung 10*) – einpendeln und ein komfortbeeinträchtigendes, unerwünschtes Aufschaukeln vermeiden. Die Ein- und Ausfahrvorgänge bei Kurvenfahrten, die zur Komfoteinbüßung führen können, werden dadurch nicht überlagert [136].

28 Der sog. Sinuslauf ist eine sinusförmige Kurve, die beim Durchfahren einer geraden Strecke durch den Radsatz entsteht. Dies bedingen die konischen Rädern, die theoretisch einen Doppelkegel darstellen (*Abbildung 11*) sowie die geneigten Schienen und die durch die momentenstarr verbundenen Räder erzwungenen Drehzahlgleichheit, so dass die Räder unterschiedlich lange Strecken zurücklegen, was zum permanenten Selbstzentrieren des Radsatzes führt [84].



l_s : Länge der Sinuskurve

Abbildung 11: Sinuslauf aus der Kegelform der Räder in der Geraden [50]

Nach [103] müssen die Regel- und Mindestlängen von Zwischengerade und Gleisbogen in Abhängigkeit der Geschwindigkeit V [km/h] gemäß *Tabelle 6* bestimmt werden.

Tabelle 6: Mindestplanungswerte für die Längen von Zwischengeraden und Gleisbogen [103]

Mindestwert	
bei $V \leq 70$ km/h	$\min l_b^{29}$ bzw. $l_g^{30} \geq 0,10 \cdot V$
bei $70 \leq V \leq 100$ km/h	$\min l_b$ bzw. $l_g \geq 0,15 \cdot V$
bei $V > 100$ km/h	$\min l_b$ bzw. $l_g \geq 0,20 \cdot V$
Regelwert	
reg l_b bzw. $l_g \geq 0,40 \cdot V$	

2.2.2.2.1.2 Bogen

Bei Richtungsänderungen zwischen den Geraden müssen sowohl im Höhen- als auch im Lageplan Bogen als Verbindungen verwendet werden.

Höhenplan

Im Höhenplan wird die Ausrundung für die Neigungswechsel mit Kreisbogen beschreiben.

Lageplan

Im Lageplan werden die Gleisbogen in Kreis- und Übergangsbogen unterteilt. I.d.R. werden die Gleisbogen mit Übergangsbogen³¹ auf durchgehenden Hauptgleisen³² und ohne Übergangsbogen auf Nebengleisen³³ ausgeführt [103].

29 Mindestlänge der Gleisbogen

30 Mindestlänge der Zwischengeraden

31 Beschreibung der Übergangsbogen siehe Kapitel 2.2.2.2.2

32 „Hauptgleise sind die von Zügen planmäßig befahrenen Gleise. Durchgehende Hauptgleise sind die Hauptgleise der Freien Strecke und ihre Fortsetzung in den Bahnhöfen.“ [31]

33 „Alle übrigen Gleise sind Nebengleise.“ [31]

Für eine Trassierung ohne Übergangsbogen (Abbildung 12) muss der Nachweis der Komfortkriterien, wie in *Tabelle 8* etc., geführt werden.

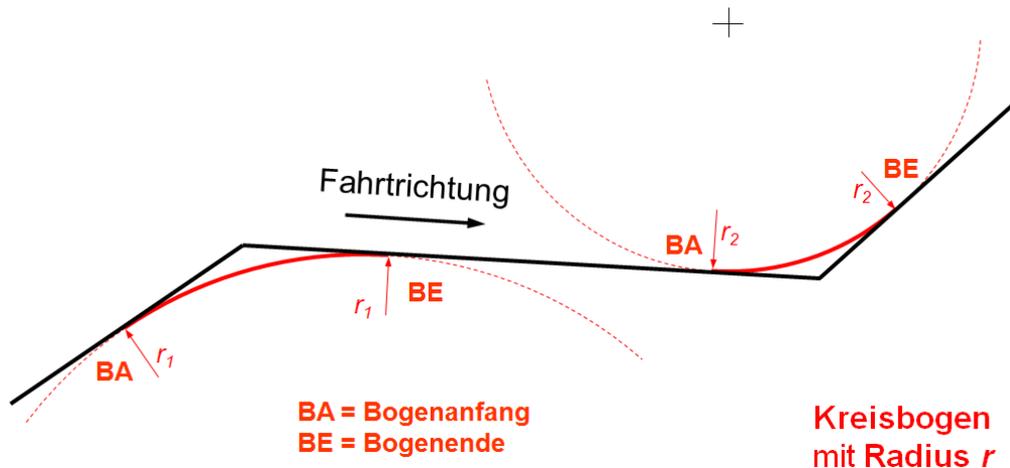


Abbildung 12: Krümmungswechsel im Lageplan mit Radius r , ohne Übergangsbogen [50]

Der Gleisbogen wird durch den Radius r definiert (Abbildung 12). Nach [31] soll der Bogenradius r in durchgehenden Hauptgleisen bei Neubauten auf Hauptbahnen³⁴ $r \geq 300$ m und auf Nebenbahnen³⁴ $r \geq 180$ m betragen. Bogen von Radien $r < 180$ m gehören im bestehenden Eisenbahnnetz in Deutschland nach [78] zu den Ausnahmen. Aus vermessungstechnischen Gründen sollten Radien mit $r > 25.000$ m vermieden werden.

Die zulässige maximale Geschwindigkeit $\max v$ auf den Strecken wird durch den Bogenradius r begrenzt. Die Grenzwerte des Bogenradius r sind in *Tabelle 7* zusammengefasst.

Tabelle 7: Grenzwerte des Bogenradius r im Lageplan ([83], S. 30)

	Min. Bogenradius r_{\min}	Max. Bogenradius r_{\max}
TSI INF ²²	150 m	---
DIN EN 13803 ²³	150 m	---
EBO [31]	180 m	---
DB 800.0110 ¹⁹	150 m	25.000 m

Krümmungswechsel

Die Krümmung k einer Kurve bezeichnet die Abweichung der Kurve von einer Geraden. Je größer die Krümmung k ist, desto stärker ist die Kurve gekrümmt. I.A. wird die Krümmung k durch den Radius r wie folgt ausgedrückt:

34 „Die Entscheidung darüber, welche Strecken Hauptbahnen und welche Nebenbahnen sind, treffen

1.für die Eisenbahnen des Bundes das jeweilige Unternehmen,

2.für Eisenbahnen, die nicht zum Netz der Eisenbahnen des Bundes gehören (nichtbundeseigene Eisenbahnen), die zuständige Landesbehörde.“ [31]

$$k = \frac{1}{r} \quad (2-16)$$

Betrachtung eines Schienenfahrzeugs bei der Bogenein-/ausfahrt

Wenn ein 2-achsiges Fahrzeug von einer Geraden in einen Gleisbogen mit Radius r einfährt, dreht sich der Schwerpunkt S des Fahrzeugs nicht sofort um den Mittelpunkt des Kreises, sondern bis zur kompletten Einfahrt mit allen Fahrwerken um die Momentanpole mit den Radien $r_S(\alpha)$ (Abbildung 13) [50].

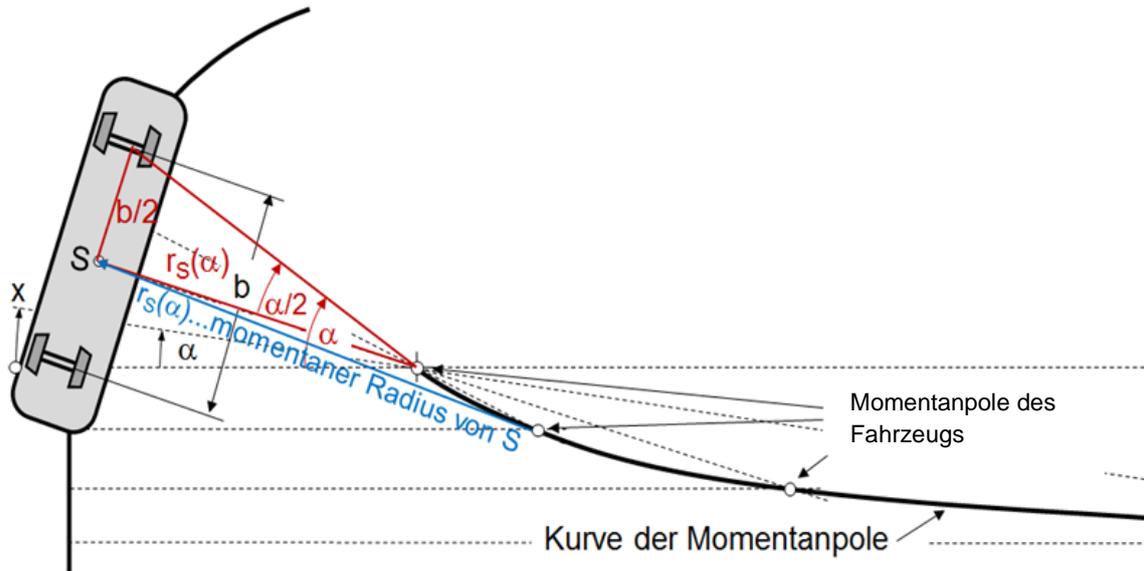


Abbildung 13: Bogeneinfahrt eines Fahrzeugs [50]

Aus Abbildung 13 ist ersichtlich, dass der momentane Radius $r_S(\alpha)$ mit dem Drehwinkel des Fahrzeugkopfes α und dem Abstand der Achsen b (bei Drehgestellen: b = Abstand der Drehzapfen) zusammenhängt.

Dies ergibt

$$\frac{\frac{b}{2}}{r_S(\alpha)} \approx \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (2-17)$$

Daraus folgt:

$$r_S(\alpha) \approx \frac{b}{2 \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (2-18)$$

- r_S [m] = momentaner Radius
- α [°] = Drehwinkel des Fahrzeugkopfes
- b [m] = Abstand der Achsen/Drehzapfen

Wenn, wie in der Realität, $b \ll r$ ist, wird $\alpha \ll 1$. Dann kann mit $\tan(\alpha) \approx \alpha$ folgende Gleichung beschrieben und der Radius r_S wie folgt berechnet werden:

$$r_S(\alpha) \approx \frac{b}{\alpha} \quad (2-19)$$

Mit $\alpha = \frac{x}{r}$ ergibt sich der Radius r_S dann an der Einfahrtbogenlänge x zu

$$r_s(x) = \frac{b}{x} \cdot r \quad (2-20)$$

und die Krümmung k an der Stelle x der Einfahrbogenlänge mit

$$k(x) = \frac{1}{r_s(x)} = \frac{x}{b \cdot r} \quad (2-21)$$

x [m] = Einfahrbogenlänge

Zusammenfassend lässt sich feststellen:

die Krümmung k eines Gleisbogens nimmt annähernd linear von $r = 0$ auf $\frac{1}{r}$ zu, wenn die Einfahrbogenlänge zwischen $0 \leq x \leq b$ liegt.

Gleisbogen ohne Übergangsbogen

Die Ein- und Ausfahrt aus einer Geraden in einen Gleisbogen mit Radius r ohne Übergangsbogen führt zu einer plötzlichen Änderung der Seitenbeschleunigung in Gleisebene a_q (= Querruck³⁵) durch die plötzliche Krümmungsänderung. Diese Krümmungsänderungen werden wie folge unterteilt:

- Krümmungsänderung: Abweichung von der Geraden (z.B. Gerade – Bogen mit Radius r , *Abbildung 14* und *Abbildung 15*)
- Krümmungswechsel: jede Bogenänderung innerhalb eines Bogens (z.B. Korbbogen: Bogen (r_1) – Bogen (r_2))
- Bogenwechsel: Krümmung eines Bogens in Gegenrichtung als Gegenbogen (*Abbildung 17*)

Wie *Abbildung 14* zeigt, tritt eine Krümmungsänderung als Krümmungssprung Δk auf, wenn im Lageplan der Radius r ohne Übergangsbogen unmittelbar auf eine Gerade folgt bzw. tangential in eine Gerade mündet.

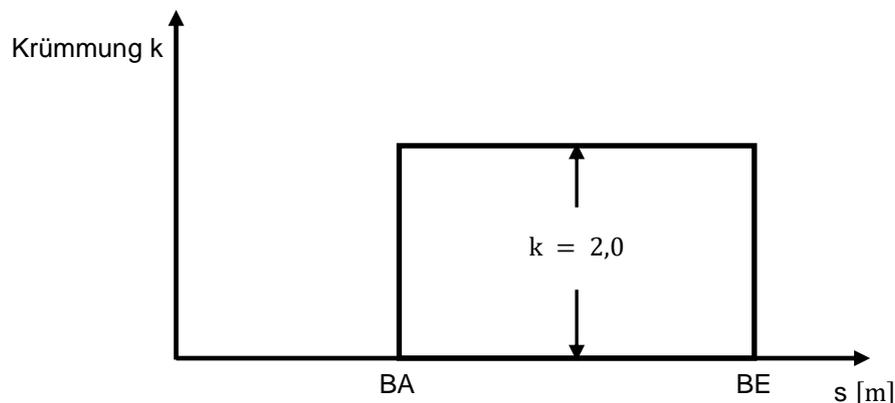


Abbildung 14: Krümmungsbild: Gerade – Kreisbogen ([78], S. 108)

³⁵ Siehe Kapitel 2.3.3

Abbildung 15 zeigt die plötzliche Änderung der Seitenbeschleunigung in Gleisebene a_q , wenn ein Zug ohne Übergangsbogen in einen bzw. aus einem Kreisbogen r fährt.

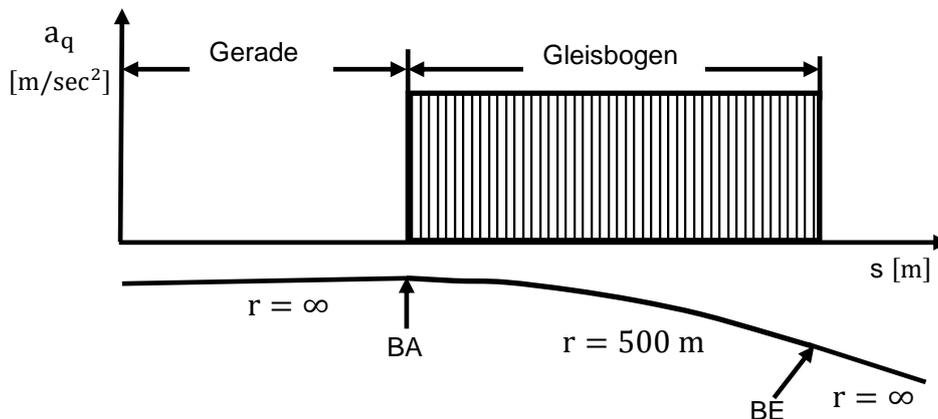


Abbildung 15: Seitenbeschleunigungsverlauf in Gleisebene a_q : Gerade mündet unmittelbar in den anschließenden Gleisbogen ([78], S. 108)

Bei konstanter Geschwindigkeit v ist die Krümmung k proportional zur Seitenbeschleunigung in Gleisebene a_q :

$$a_q = v^2 \cdot k \quad (2-22)$$

$$k = \frac{1000}{r} \quad (2-23)$$

1000 = Dimensionsausgleich von [m] in [mm]

Wenn die Bogenaußenschiene zur Reduktion der Seitenbeschleunigung in Gleisebene a_q nicht überhöht ist ($u = 0$, Abbildung 16), dann ist die Seitenbeschleunigung in Gleisebene a_q gleich der Radialbeschleunigung a_r :

$$a_q = a_r \quad (2-24)$$

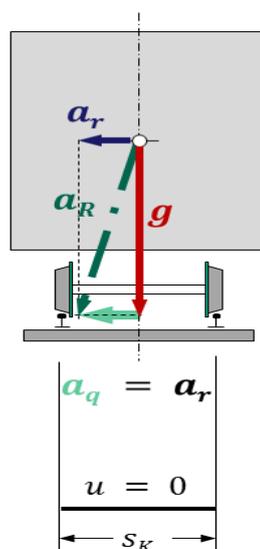


Abbildung 16: Gleis nicht überhöht [50]

Abbildung 17 zeigt die Krümmungsänderung von Gegenbogen ohne Übergangsbogen mit dem Krümmungssprung:

$$\Delta k = k_1 + k_2 \quad (2-25)$$

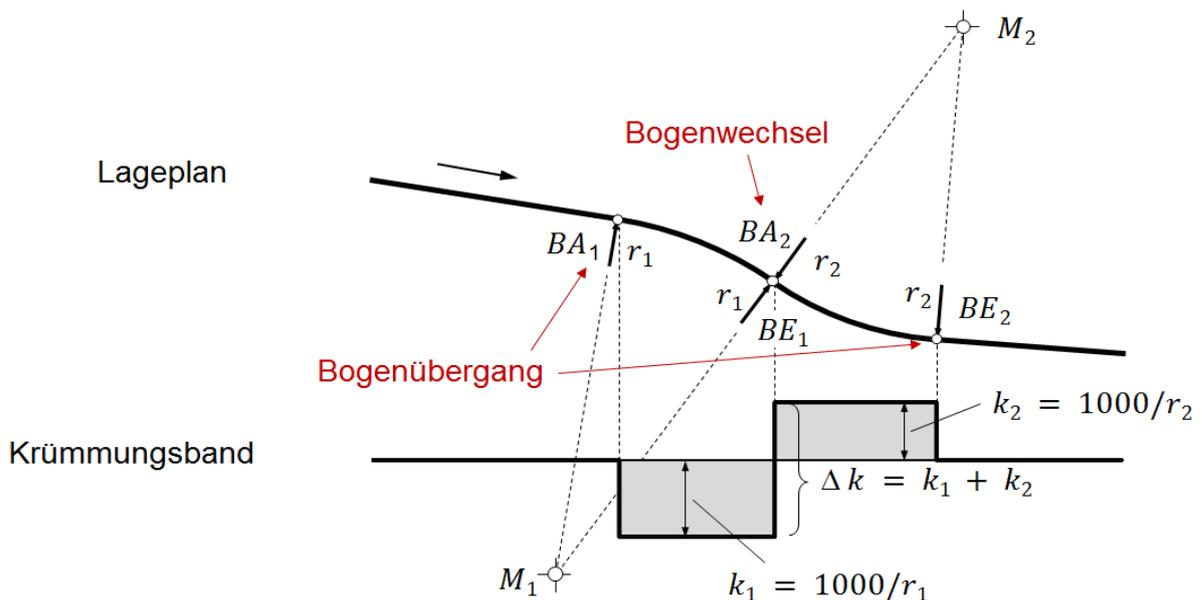


Abbildung 17: Krümmungsbild eines Gegenbogens ohne Übergangsbogen [50]

Die Berechnungen der zulässigen Höchstgeschwindigkeiten $zul. V_{max}$ [km/h] im Bogenwechsel ohne Übergangsbogen und Zwischengerade (Kapitel 2.2.2.2.1.1) sind in Tabelle 8 zusammengefasst.

Tabelle 8: $zul. V_{max}$ im Bogenwechsel ohne Übergangsbogen bzw. ohne Zwischengerade [50]

Elementabfolge	zul. V_{max} [km/h]
Gerade – Bogen mit Radius r (Abbildung 14 und Abbildung 15)	$V_{max} = 3 \cdot \sqrt{r}$ r in m
Korbbogen: Bogen (r_1) – Bogen (r_2)	$V_{max} = 3 \cdot \sqrt{\frac{r_1 \cdot r_2}{ r_1 - r_2 }} = \sqrt{\frac{9000}{ k_2 - k_1 }}$
Gegenbogen: Bogen (r_1) – Gegenbogen (r_2) (Abbildung 17)	$V_{max} = 3 \cdot \sqrt{\frac{ r_1 \cdot r_2 }{ r_1 + r_2 }} = \sqrt{\frac{9000}{ k_2 + k_1 }}$

2.2.2.2.2 Überhöhungsrampen und Übergangsbogen

Nach Gleichung (2-22) ist die Seitenbeschleunigung in Gleisebene a_q umso größer, je größer die Krümmung k ist.

Um einen Querruck³⁵ zu vermeiden oder zu reduzieren wird z.B. bei der Kombination Gerade – Kreisbogen ein Übergangsbogen mit einer Überhöhungsrampe zwischen der Geraden und dem Radius r eingefügt [50].

Nach [103] müssen Übergangsbogen und die dazugehörigen Überhöhungsrampen zusammenfallen. D.h.:

Überhöhungsrampen und Übergangsbogen müssen immer gleichzeitig betrachtet und berücksichtigt werden [78].

2.2.2.2.1 Überhöhungsrampen

Der Zweck der Überhöhungsrampe besteht darin, die bauliche Überhöhung u der Bogenaußenschiene von der jeweiligen Ausgangsposition in den angehobenen bzw. abgesenkten Zustand zu überführen [50].

Die Überhöhung u im Gleisbogen wird durch Anheben der bogenäußeren Schiene hergestellt [78]. Die Überhöhungsrampe beginnt in der Ausgangslage mit der Überhöhung $u = 0 \text{ mm} =$ Überhöhungsrampen- und Übergangsbogenanfang ($RA = UA^{36}$). Der Punkt mit der größten Überhöhung u ist am Überhöhungsrampen - bzw. Übergangsbogenende ($RE = UE^{36}$). Dabei ist $\frac{l_R}{2} = \frac{u}{2}$ jeweils in die Gerade, beginnend mit RA , und dem Kreisbogen, endend bei RE einzufügen (*Abbildung 18 und Abbildung 19*)

Nach [103] werden Überhöhungsrampen i.d.R. in folgenden Formen erstellt:

- gerade Überhöhungsrampe
- geschwungene Überhöhungsrampen
 - s-förmig (Parabel 2. Ordnung)
 - BLOSS-Rampe
 - weitere Formen

2.2.2.2.1.1 Gerade Überhöhungsrampe

Die gerade Überhöhungsrampe ist die einfachste Überhöhungsrampenform (*Abbildung 18*).

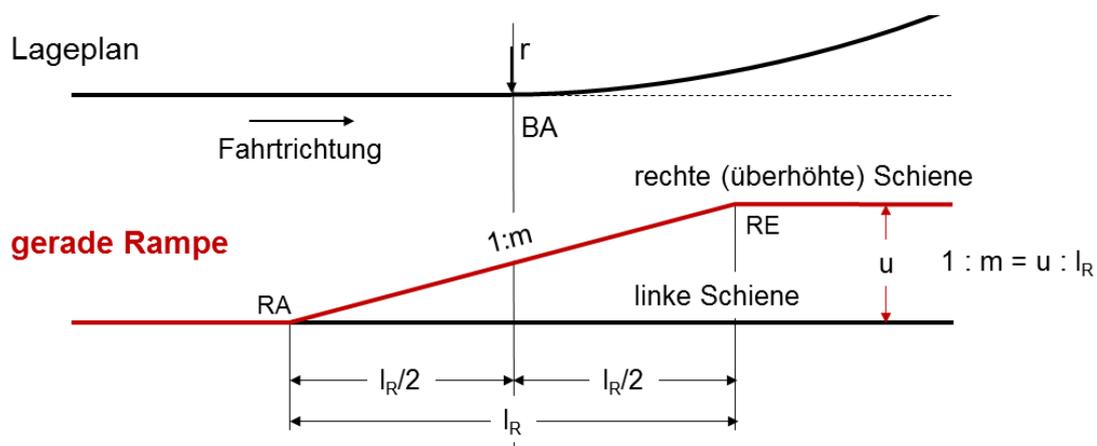


Abbildung 18: Gerade Überhöhungsrampe [50]

36 RA: Überhöhungsrampenanfang; RE: Überhöhungsrampenende;
 UA: Übergangsbogenanfang; UE: Übergangsbogenende

Die gerade Überhöhungsrampe stellt den Übergang von der Überhöhung $u = 0$ mm bis zur ermittelten Überhöhung u bzw. umgekehrt, durch eine linear ansteigende/fallende Gerade dar.

Die Überhöhung u wächst proportional zur Überhöhungsrampenlänge l_R an. Die Überhöhung u an der Stelle x ergibt sich aus

$$u_x = \frac{u \cdot x}{l_R} \quad (2-26)$$

u_x [mm] = Überhöhung im Punkt x
 x [m] = Distanz ab RA
 l_R [m] = gerade Rampenlänge

Die Überhöhungsrampenneigung 1: m berechnet sich wie folgt:

$$1: m = \frac{u}{1000 \cdot l_R} \quad (2-27)$$

Mit den geraden Überhöhungsrampen müssen die Übergangsbogen als Klothoide bzw. Parabel 3. Ordnung³⁷ ausgeführt werden.

Tabelle 9 zeigt die Planungswerte für die Länge l_R und Neigung 1: m der geraden Überhöhungsrampe.

Tabelle 9: Planungswerte für Länge l_R und Neigung 1: m der geraden Überhöhungsrampe [103]

Bereich	Grenzen und Werte	Gerade Überhöhungsrampe
Ermessensbereich	Mindestwert	1: $m = 1: 3000$
	Regelwert	$l_R = 10 \cdot V_e \cdot \frac{\Delta u}{1000}$ 1: $m \leq 1: 600$ und $m = 10 \cdot V_e$
	Ermessensgrenze	$l_R = 8 \cdot V_e \cdot \frac{\Delta u}{1000}$ 1: $m = 1: 400$ und $m \geq 8 \cdot V_e$
Genehmigungsbereich	Zustimmungswert	$l_R = 6 \cdot V_e \cdot \frac{\Delta u}{1000}$ 1: $m = 1: 400$ und $m \geq 6 \cdot V_e$
	EBO-Grenze	Für die Neigung bei Hauptbahnen: 1:400

Die gerade Überhöhungsrampe als einfachste Überhöhungsrampenform führt zu „spitzen“ Übergängen, die in einigen Fällen wegen des Rucks³⁵ als inakzeptabel angesehen werden [83]. Dies führte zur Entwicklung anderer Überhöhungsrampenformen.

³⁷ Siehe Kapitel 2.2.2.2.2.1

2.2.2.2.1.2 Geschwungene Überhöhungsrampen

s-förmig geschwungene Überhöhungsrampe (Parabel 2. Ordnung)

HELMERT [45] hat 1872 Übergangsbögen mit geschwungenen Überhöhungsrampen beschrieben. SCHRAMM machte 1962 in [109] einen Lösungsvorschlag, um die damaligen, bei diesen Überhöhungsrampenformen vermessungstechnischen Probleme zu lösen:

Die Überhöhungswerte u der Überhöhungsrampe können quadratisch interpoliert werden und sind damit bei der praktischen Gleisstandhaltung relativ einfach zu ermitteln.

Diese Elementform wird als Übergangsbogen mit s-förmiger geschwungener Überhöhungsrampe bezeichnet (Abbildung 19).

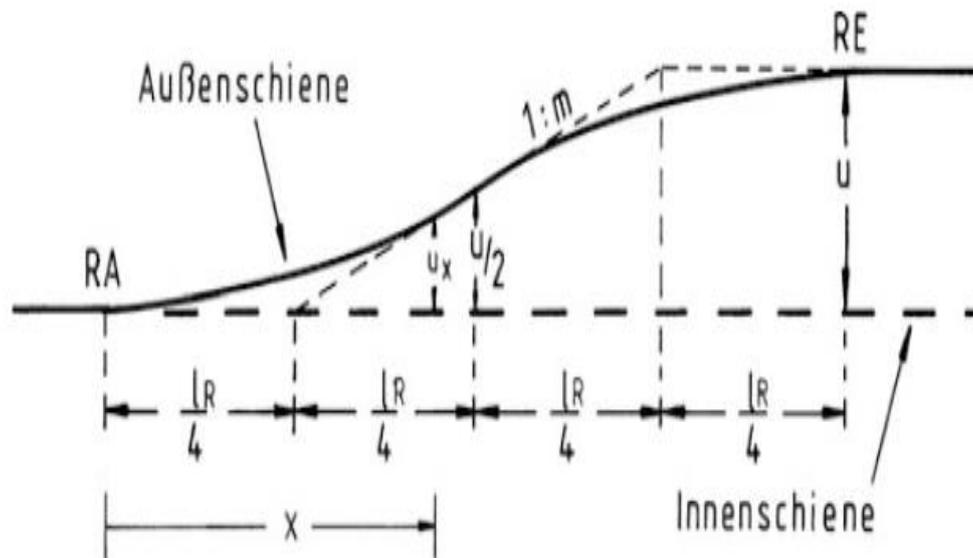


Abbildung 19: s-förmig geschwungene Überhöhungsrampe ([78], S. 104)

Die Überhöhung einer s-förmigen Überhöhungsrampe wird aus zwei spiegelgleichen Parabeln 2. Ordnung um $\frac{l_{RS}}{2} = \frac{u}{2}$ gebildet [78]. Sie errechnet sich für die Stelle x wie folgt:

$$u_x = 2u \cdot \frac{x^2}{l_{RS}^2} \quad \text{für } 0 < x \leq \frac{l_{RS}}{2} \quad (2-28)$$

$$u_x = u - \frac{2u}{l_{RS}^2} \cdot (l_{RS} - x)^2 \quad \text{für } \frac{l_{RS}}{2} < x \leq l_{RS} \quad (2-29)$$

l_{RS} [m] = Länge der s-förmig geschwungenen Überhöhungsrampe

Die Überhöhungsrampenneigung $1:m_{MS}$ berechnet sich wie folgt:

$$1:m_{MS} = \frac{2u}{1000 \cdot l_{RS}} \quad (2-30)$$

Tabelle 10 zeigt die Planungswerte für die Länge l_{RS} und Neigung $1:m_{MS}$ der s-förmig geschwungenen Überhöhungsrampe. I.d.R. müssen s-förmig geschwungene Überhöhungsrampen und s-förmig geschwungene Übergangsbögen zusammen eingesetzt werden.

Tabelle 10: Planungswerte für Länge l_{RS} und Neigung 1: m_{MS} der s-förmig geschwungenen Überhöhungsrampe [103]

Bereich	Grenzen und Werte	s-förmig geschwungene Überhöhungsrampe
Ermessensbereich	Mindestwert	1: $m_{MS} = 1: 1500$
	Regelwert	$l_{RS} = 10 \cdot V_e \cdot \frac{\Delta u}{1000}$ 1: $m_{MS} \leq 1: 600$ und $m_{MS} \geq 5 \cdot V_e$
	Ermessensgrenze	$l_{RS} = 8 \cdot V_e \cdot \frac{\Delta u}{1000}$ 1: $m_{MS} = 1: 400$ und $m_{MS} \geq 4 \cdot V_e$

Geschwungene Überhöhungsrampe nach BLOSS

Die Überhöhungsrampe nach BLOSS besteht aus einer Parabel 3. Ordnung [78].

Die Überhöhungsrampe nach BLOSS ist bei gleichem Überhöhungsrampenneigungsverhältnis 1: $m_{MB} = 1: m_{MS}$ kürzer als die s-förmige Überhöhungsrampe.

Die Gleichung für die Überhöhung u an der Stelle x für die Überhöhungsrampe nach BLOSS lautet:

$$u_x = \left(\frac{3}{l_{RB}^2} \cdot x^2 - \frac{2}{l_{RB}^3} \cdot x^3 \right) \cdot u \quad (2-31)$$

l_{RB} [m] = Länge der Überhöhungsrampe nach BLOSS

Die Überhöhungsrampenneigung 1: m_{MB} berechnet sich wie folgt:

$$1: m_{MB} = \frac{3u}{2 \cdot 1000 \cdot l_{RB}} \quad (2-32)$$

Tabelle 11 zeigt die Planungswerte für die Länge l_{RB} und die Neigung 1: m_{MB} der geschwungenen Überhöhungsrampe nach BLOSS.

Tabelle 11: Planungswerte für Länge l_{RB} und Neigung 1: m_{MB} der Überhöhungsrampe nach BLOSS [103]

Bereich	Grenzen und Werte	Geschwungenen Überhöhungsrampe nach BLOSS
Ermessensbereich	Mindestwert	1: $m_{MB} = 1: 1500$
	Regelwert	$l_{RB} = 7,5 \cdot V_e \cdot \frac{\Delta u}{1000}$ 1: $m_{MB} \leq 1: 600$ und $m_{MB} \geq 5 \cdot V_e$
	Ermessensgrenze	$l_{RB} = 6 \cdot V_e \cdot \frac{\Delta u}{1000}$ 1: $m_{MB} = 1: 400$ und $m_{MB} \geq 4 \cdot V_e$
Genehmigungsbereich	Zustimmungswert	$l_{RB} = 5,5 \cdot V_e \cdot \frac{\Delta u}{1000}$ 1: $m_{MB} = 1: 400$ und $m_{MB} \geq \frac{11}{3} \cdot V_e$

2.2.2.2.1.3 Weitere Formen von Überhöhungsrampen

Cosinus-Überhöhungsrampe

Bei der japanischen Eisenbahn wird eine Überhöhungsrampe mit Cosinus-Form verwendet. Der Überhöhungsrampenverlauf für die Überhöhung u an der Stelle x kann mit folgender Cosinus-Funktion berechnet werden ([2] und [136]):

$$u_x = \frac{u}{2} \cdot \left(1 - \cos \frac{\pi \cdot x}{l_{RCos}} \right) \quad (2-33)$$

Die Abweichung der Ordinaten zwischen der Cosinus-Überhöhungsrampe und der Überhöhungsrampe nach BLOSS ist unwesentlich. Im Gleis dürften die beiden Formen weder im Grundriss noch im Überhöhungsverlauf zu unterscheiden sein [136].

Sinus-Überhöhungsrampe

1937 hat KLEIN [64] die Sinus-Überhöhungsrampe vorgeschlagen.

Die Überhöhung u an der Stelle x für die Sinus-Überhöhungsrampe lautet nach [110]:

$$u_x = u \cdot \left(\frac{x}{l_{RSin}} - \frac{1}{2\pi} \cdot \sin \frac{2\pi \cdot x}{l_{RSin}} \right) \quad (2-34)$$

Obwohl das Abrückmaß f^{38} klein ist, ist die Überhöhungsrampenlänge l_{RSin} größer als l_{RB} bei der Rampe nach BLOSS bei gleicher Überhöhungsrampenneigung $1: m_{MSin} = 1: m_{MB}$ [136].

2.2.2.2.2 Übergangsbogen

Nach [103] sollen in x/y - Ebene „... in durchgehenden Hauptgleisen [...] Krümmungswechsel durch Übergangsbogen vermittelt werden.“, um einen fließenden Übergang zwischen einer Geraden und einem Bogen, unter Beachtung der Bogenein- und -ausfahrt eines Eisenbahnwagens (Kapitel 2.2.2.2.1.2, Momentanpolbogen), zu gewährleisten (Abbildung 20).

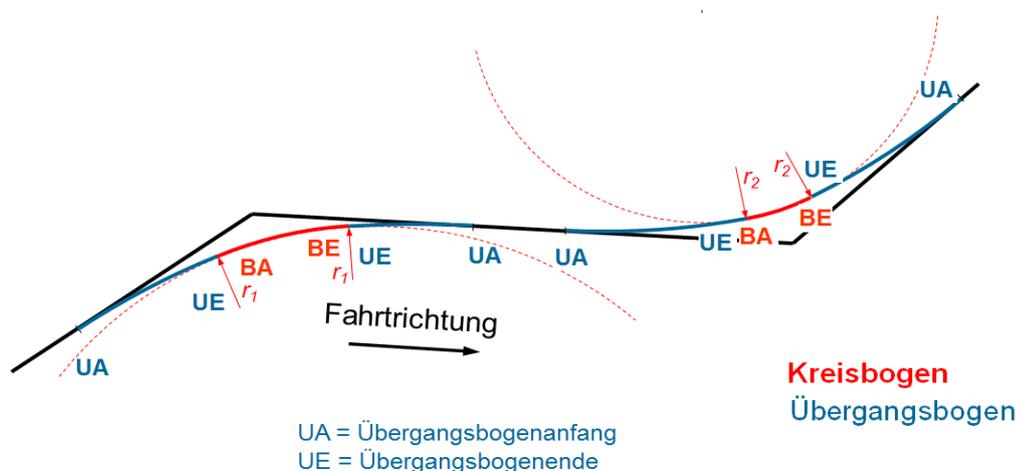


Abbildung 20: Darstellung der Bogenfolge beim Bogenwechsel: Bogen-Zwischengerade-Gegenbogen [50]

³⁸ Siehe Kapitel 2.2.2.2.2.2

Dabei ist $\frac{l_U}{2} = \frac{u}{2}$ jeweils in die Gerade, beginnend bei UA und dem Kreisbogen endend bei UE, beidseitig vom Abrückmaß f ³⁸ einzufügen (Abbildung 21 und Abbildung 24).

I.d.R. soll der Übergangsbogen mit der Überhöhungsrampe zusammenfallen, d.h.

$$l_U = l_R \quad (2-35)$$

Der Übergangsbogen kann nach [103] in verschiedenen Formen ausgeführt werden:

- Übergangsbogen mit gerader Krümmungslinie
 - Klothoide
 - Parabel 3. Ordnung
- Übergangsbogen mit geschwungener Krümmungslinie
 - s-förmig (Parabel 4. Ordnung)
 - nach BLOSS (Parabel 5. Ordnung)
 - weitere Formen

2.2.2.2.2.1 Übergangsbogen mit gerader Krümmungslinie

Abbildung 21 zeigt einen Übergangsbogen mit gerader Krümmungslinie, bei dem „...die Krümmung linear von null [$k = 0$] bis zur Krümmung des anschließenden Kreisbogens [$k = \frac{1}{r}$] zunimmt.“ [78]

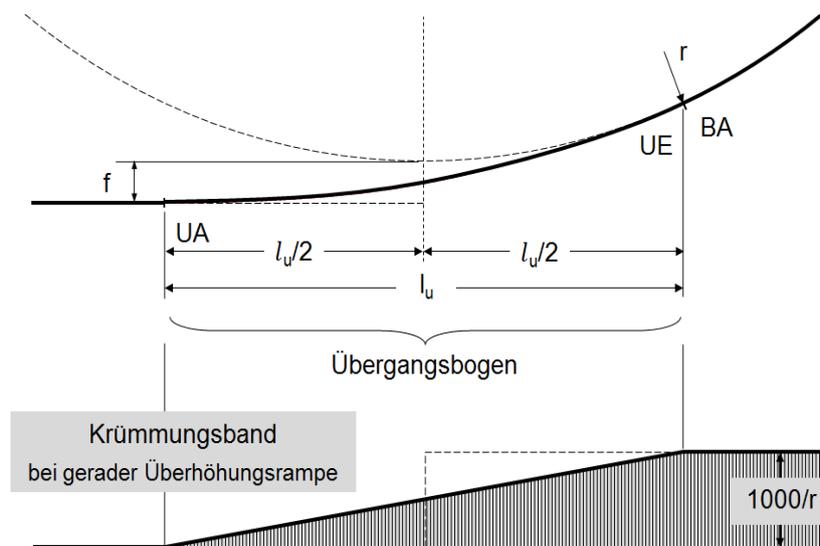


Abbildung 21: Übergangsbogen mit gerader Krümmungslinie [50]

Der Übergangsbogen mit gerader Krümmungslinie wird durch zwei Formen angenähert:

- Klothoide
- Parabel 3. Ordnung

Klothoide

Die Klothoide ist eine Spirale. Sie erfüllt die Anforderung eines linearen, konstanten Krümmungsverlaufes und kann im Bereich um den Nullpunkt der x-Achse für den Übergangsbogen verwendet werden (Abbildung 22).

Für den Entwurf eines Übergangsbogens ohne Zwangspunkte wird grundsätzlich eine Klothoide verwendet [78]. Die allgemeine Formel für eine Klothoide lautet:

$$R \cdot L_K = A^2 = l_i \cdot r_i \quad (2-36)$$

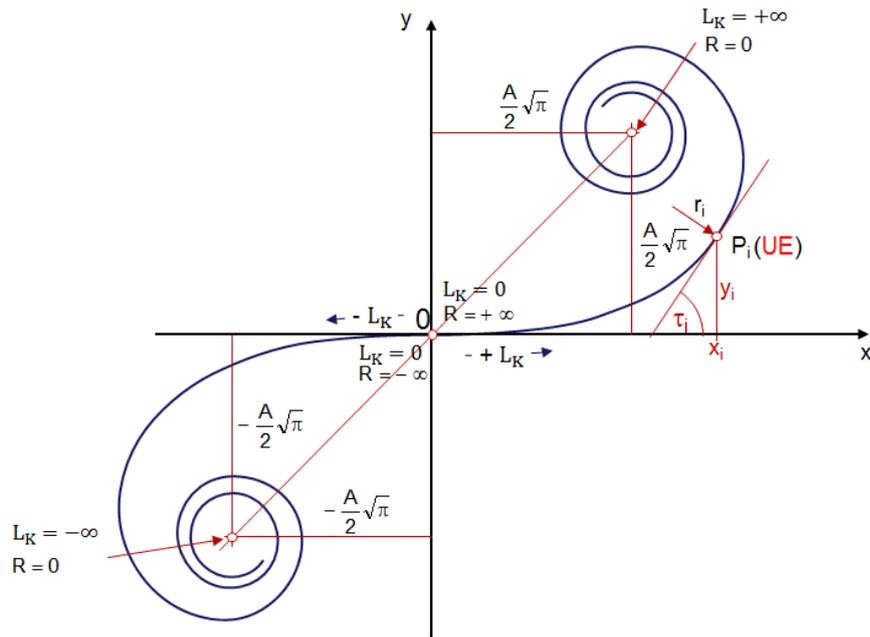
R = Radius des Kreisbogens am UE

L_K = Länge der Klothoide

A = Parameter der Klothoide³⁹

l_i = Länge vom Klothoidenanfang bis zum Punkt i

r_i = Radius eines Punktes i im Klothoidenabschnitt



Wenn r_i = Radius des Kreisbogens R ist,
dann ist $P_i = UE$ = gemeinsamer Tangentialpunkt von Kreis und Klothoide

Abbildung 22: Klothoide [50]

Die Wahl des Parameters A hängt vom Krümmungsradius r_i ab (Abbildung 22):

$$A^2 = \frac{2 \cdot \tau_i \cdot r_i^2}{63,662} \quad (2-37)$$

τ_i [gon] = Winkel, unter dem sich die Tangenten von UA und P_i schneiden

Für die kartesischen Koordinaten berechnen sich die Punkte x und y der Klothoide nach [89] wie folgt:

$$x = \frac{A}{\sqrt{2}} \int_0^{\tau} \frac{1}{\tau^2} \cdot \cos \tau \, d\tau \quad (2-38)$$

$$y = \frac{A}{\sqrt{2}} \int_0^{\tau} \frac{1}{\tau^2} \cdot \sin \tau \, d\tau \quad (2-39)$$

³⁹ Der Parameter A ist konstant. Diese Klothoidenform wird im Straßenbau verwendet, da bei einer Fahrt durch einen Bogen mit konstantem Parameter der Lenkradeinschlag auch konstant bleibt.

Damit berechnet sich die Krümmung k einer Klothoide mit

$$k = \frac{1}{r} = \frac{L}{A^2} \quad (2-40)$$

Die Krümmung k verläuft linear über die Länge L_K .

Die Klothoide lässt sich in der Parameterdarstellung durch FRESNEL-Integrale mathematisch exakt darstellen. Sie kann IT-gestützt berechnet werden. PIETZSCH [89] hat die exakte mathematische Lösung der Klothoide durch eine Reihenentwicklung erhalten (Gleichungen (2-41) und (2-42)).

$$x = \sqrt{l_R \cdot r} \cdot \sqrt{2 \cdot \tau} \cdot \left(1 - \frac{\tau^2}{5 \cdot 2!} + \frac{\tau^4}{9 \cdot 4!} - \frac{\tau^6}{13 \cdot 6!} \pm \dots\right) \quad (2-41)$$

$$y = \sqrt{l_R \cdot r} \cdot \sqrt{2 \cdot \tau} \cdot \left(\frac{\tau}{3} - \frac{\tau^3}{7 \cdot 3!} + \frac{\tau^5}{11 \cdot 5!} - \frac{\tau^7}{15 \cdot 7!} \pm \dots\right) \quad (2-42)$$

Parabel 3. Ordnung

Der Nachteil der Klothoide besteht darin, dass die rechtwinkligen Koordinaten nicht nach einer einfachen Formel berechnet werden können. Deshalb wurden die Übergangsbogen bei der Eisenbahntrassierung lange Zeit mit Parabeln 3. Ordnung bestimmt [34].

Im Jahr 1867 stellte NÖRDLING [82] erstmals mathematisch die Beziehung zwischen dem linearen Krümmungsverlauf wie folgt her:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{x}{r \cdot l_R} \quad (2-43)$$

Die Formel der Parabel 3. Ordnung für Übergangsbogen erhält man durch zweimalige Integration:

$$y = \frac{x^3}{6 \cdot r \cdot l_R} \quad (2-44)$$

r = Krümmungsradius eines Punkt
 l_R = Überhöhungsrampenlänge

Die Krümmung k berechnet sich mit

$$k = \frac{x}{r \cdot l_R} \quad (2-45)$$

Beim manuellen Entwurf ist es im geforderten Genauigkeitsbereich eines Planers einfacher mit einer Parabel 3. Ordnung als Übergangskurve zu arbeiten [78].

Vergleich Klothoide mit einer Parabel 3. Ordnung

Aus *Abbildung 23* ist ersichtlich,

- dass der Krümmungsverlauf einer Parabel 3. Ordnung im Anfangsbereich annähernd gerade verläuft.
- wenn der Übergangsbogen zu lang ist, stimmt die Krümmung k der Parabel 3. Ordnung nicht mit der Krümmung k des nachfolgenden Kreisbogens r überein.
- wenn die Übergangsbogenlänge $l < \frac{r}{3,5}$ beträgt, kann eine Parabel 3. Ordnung als Übergangsbogen verwendet werden.
- dass eine Parabel 3. Ordnung anstelle einer Klothoide verwendet wird, wenn der Radius r des nachfolgenden Kreisbogens nicht zu klein ist ([34] und [50]).

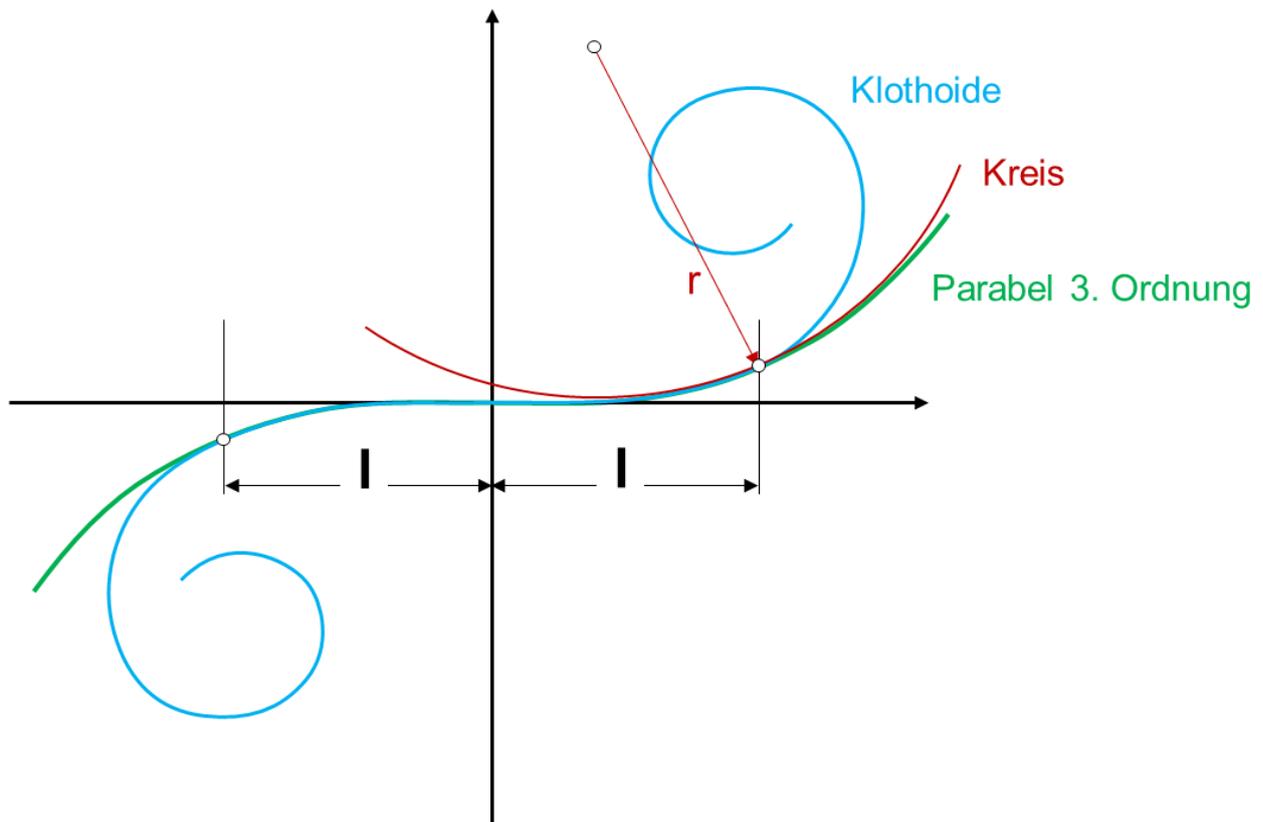


Abbildung 23: Vergleich Klothoide mit einer Parabel 3. Ordnung [50]

2.2.2.2.2.2 Übergangsbogen mit geschwungener Krümmungslinie

„Um die zulässige Geschwindigkeit v zu erhöhen, kann eine Vergrößerung der Überhöhung u bei gleicher Rampenlänge l_R durch eine veränderte Rampenform hergestellt werden.“ [78].

Diese Form der Übergangsbogen wird als Übergangsbogen mit geschwungener Krümmungslinie bezeichnet (*Abbildung 24*).

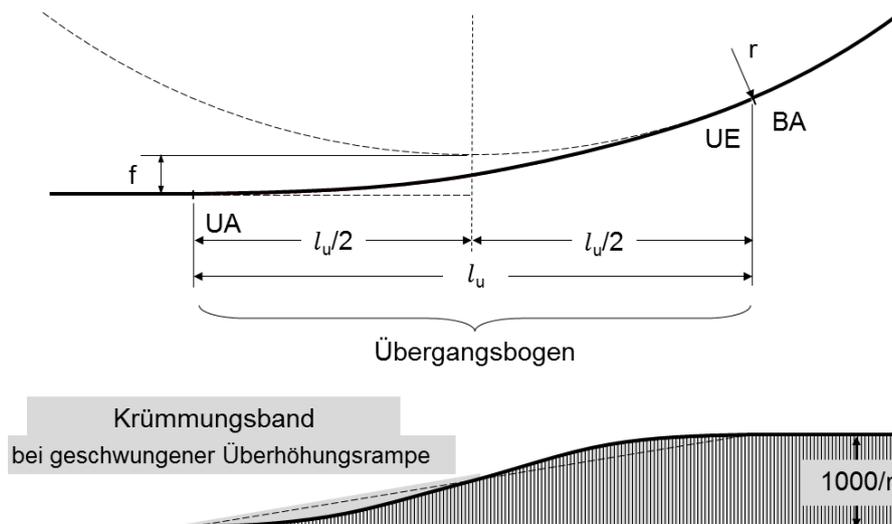


Abbildung 24: Übergangsbogen mit geschwungener Krümmungslinie [50]

Aus *Abbildung 21* und *Abbildung 24* ist ersichtlich, dass der Krümmungswechsel durch die Übergangsbogen langsam und kontinuierlich verläuft.

Bei der DB werden die Parabeln 4. Ordnung (s-förmig) und Parabeln 5. Ordnung (nach BLOSS) als Übergangsbogen – wie folgt dargestellt – verwendet [78].

s-förmiger Übergangsbogen (Parabel 4. Ordnung)

Wie die s-förmige Überhöhungsrampe in Kapitel 2.2.2.2.1.2 wird der s-förmig geschwungene Übergangsbogen auch aus zwei quadratischen Parabeln gebildet:

$$y = \frac{x^4}{6 \cdot r \cdot l_{RS}^2} \quad \text{für } 0 < x \leq \frac{l_{RS}}{2} \quad (2-46)$$

$$y = \frac{\bar{x}^4}{6 \cdot r \cdot l_{RS}^2} \quad \text{für } \frac{l_{RS}}{2} < \bar{x} \leq l_{RS} \quad (2-47)$$

Gleichung (2-46) stellt die Bewegung vom Anfangspunkt des Übergangsbogens bis zum Mittelpunkt des Übergangsbogens dar. Im Gegensatz dazu berechnet Gleichung (2-47) die Bewegung vom Endpunkt des Übergangsbogens bis zum Mittelpunkt. Daher wird die Variable mit \bar{x} bezeichnet.

Die Krümmung k des s-förmigen Übergangsbogens berechnet sich mit

$$k = \frac{2 \cdot x^2}{r \cdot l_{RS}^2} \quad \text{für } 0 < x \leq \frac{l_{RS}}{2} \quad (2-48)$$

$$k = \frac{1}{r} \left(1 - \frac{2 \cdot (l_{RS} - \bar{x})^2}{l_{RS}^2} \right) \quad \text{für } \frac{l_{RS}}{2} < \bar{x} \leq l_{RS} \quad (2-49)$$

Übergangsbogen nach BLOSS (Parabel 5. Ordnung)

Auf Basis der Überhöhungsrampe nach BLOSS berechnet sich der Übergangsbogen nach BLOSS mit

$$y = \frac{x^4}{4 \cdot r \cdot l_{RB}^2} - \frac{x^5}{10 \cdot r \cdot l_{RB}^3} \quad (2-50)$$

l_{RB} [m] = Länge der Überhöhungsrampe nach BLOSS

Der Krümmungsverlauf der Parabel 5. Ordnung berechnet sich mit Gleichung (2-51)

$$k(x) = \frac{1}{r \cdot l_{RB}^2} \left(3x^2 - 2 \frac{x^3}{l_{RB}} \right) \left[1 + \frac{1}{r^2 \cdot l_{RB}^4} \left(x^3 - \frac{x^4}{2 \cdot l_{RB}} \right)^2 \right]^{-3/2} \quad (2-51)$$

Der Krümmungsverlauf kann mit Gleichung (2-52) angenähert werden [50].

$$k(x) \approx y'' = \frac{1}{r} \left(3 \frac{x^2}{l_{RB}^2} - 2 \frac{x^3}{l_{RB}^3} \right) \quad (2-52)$$

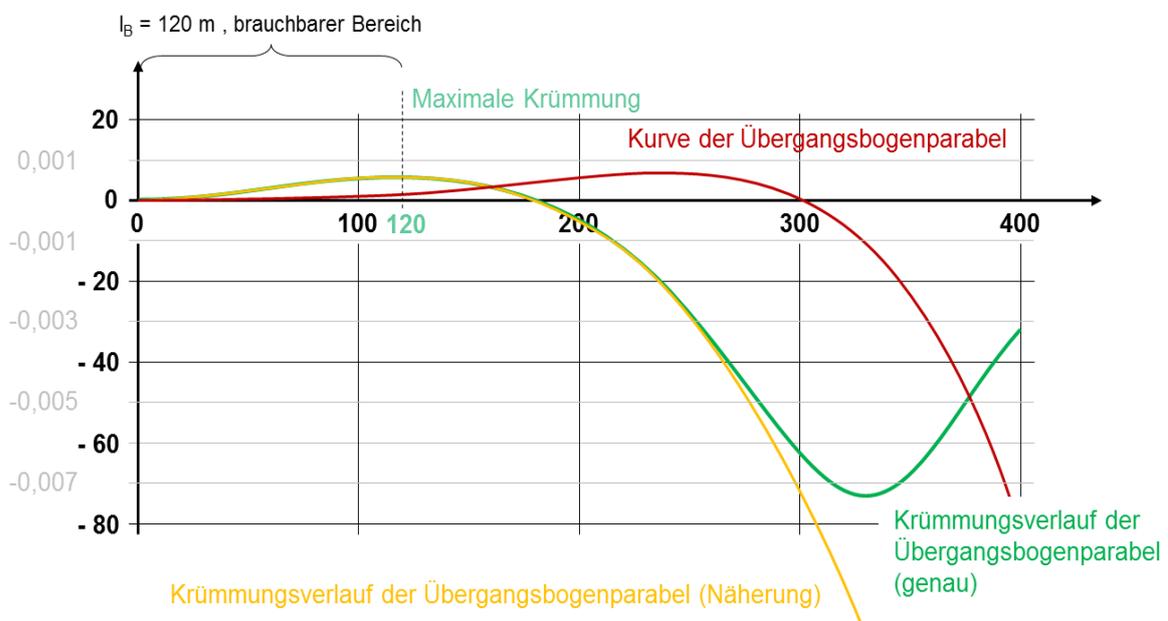


Abbildung 25: Krümmungsverlauf des Übergangsbogens nach BLOSS [50]

Im brauchbaren Bereich (Abbildung 25) ist der annäherungsweise Krümmungsverlauf (orange) und der genaue Krümmungsverlauf (grün) des Übergangsbogens komplett überlagert. Das bedeutet:

Die Annäherungswerte der Parabel 5. Ordnung entsprechen den praktischen Entwurfsanforderungen.

Da der Übergangsbogen nach BLOSS kürzer und die Überhöhungsrampe flacher als der Übergangsbogen mit s-förmiger Krümmungslinie ist, „...sollen Übergangsbogen mit s-förmiger Krümmungslinie und s-förmig geschwungener Überhöhungsrampe im Zuge einer Instandhaltungsmaßnahme durch Übergangsbogen und geschwungene Überhöhungsrampen nach BLOSS ersetzt werden.“ [103]

Mindestlänge der Übergangsbogen

Tabelle 12 vergleicht die Formeln und die Mindestlänge der verschiedenen Übergangsbogen.

Tabelle 12: Vergleich verschiedener Übergangsbogen ([50] und [103])

Übergangsbogen	mit gerader Krümmungslinie	mit geschwungener Krümmungslinie	
	Parabel 3. Ordnung	s-förmig	nach BLOSS
Formel	$y = \frac{x^3}{6 \cdot r \cdot l_U}$	$y = \frac{x^4}{6 \cdot r \cdot l_{US}^2}$	$y = \frac{x^4}{4 \cdot r \cdot l_{UB}^2} - \frac{x^5}{10 \cdot r \cdot l_{UB}^3}$
Mindestlänge	$l_U = \frac{4 \cdot V \cdot \Delta u_f}{1000}$	$l_{US} = \frac{6 \cdot V \cdot \Delta u_f}{1000}$	$l_{UB} = \frac{4,5 \cdot V \cdot \Delta u_f}{1000}$

Die Mindestlänge des Übergangsbogens berechnet sich nach [48] und [136] aus der zeitlichen Änderung des Überhöhungsfehlbetrages u_f ⁴⁰ mit

$$\Delta u_f / \Delta t \quad (2-53)$$

Für den Übergangsbogen mit gerader Krümmungslinie ist die zeitliche Änderung des Überhöhungsfehlbetrages u_f nach DIN EN 13803²³ begrenzt auf

$$\Delta u_f / \Delta t = 70 \text{ mm/sec} \quad (2-54)$$

Die zeitliche Änderung des Überhöhungsfehlbetrages u_f vom s-förmigen Übergangsbogen in Übergangsbogenmitte beträgt

$$\Delta u_f / \Delta t \approx 90 \text{ mm/sec} \quad (2-55)$$

Für den Übergangsbogen nach BLOSS ist die größte zeitliche Änderung des Überhöhungsfehlbetrages u_f

$$\Delta u_f / \Delta t = 90 \text{ mm/sec} \quad (2-56)$$

Abrückmaß f

Um einen Übergangsbogen zwischen Gerade und Kreis einzufügen, wird mit dem Maß f von der Geraden abgerückt (*Abbildung 21* und *Abbildung 24*). Dieser Abstand wird als Abrückmaß f bezeichnet.

40 Die Mindestlänge eines Übergangsbogen oder einer Überhöhungsrampe wird nur dann durch die Änderung des Überhöhungsfehlbetrages u_f bestimmt, wenn der Überhöhungsfehlbetrag u_f doppelt so hoch oder höher ist als die Überhöhung u [34].

f ist von der Form und Länge des Übergangsbogens sowie dem Radius r des Kreisbogens abhängig. *Tabelle 13* zeigt die Gleichungen für das Abrückmaß f für verschiedene Übergangsbogenformen.

Tabelle 13: Abrückmaß f verschiedener Übergangsbogenformen ([78] und [83])

Übergangsbogen	Abrückung
mit gerader Krümmungslinie	$f = \frac{l_U^2}{24 \cdot r}$
s-förmig	$f = \frac{l_{US}^2}{48 \cdot r}$
nach BLOSS	$f = \frac{l_{UB}^2}{40 \cdot r}$

2.2.2.2.2.3 Weitere Übergangsbogenformen

Übergangsbogen mit Cosinus-förmiger Krümmungslinie

VOJACEK [130] hat ein Übergangsbogen mit Cosinus-förmiger Krümmungslinie vorgeschlagen:

$$y = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \cos \frac{\pi \cdot x}{l_R}\right) \quad (2-57)$$

Der Krümmungsverlauf berechnet sich nach [130] mit:

$$k = \frac{\pi^2}{2 \cdot l_R^2} \cdot \cos \frac{\pi \cdot x}{l_R} \quad (2-58)$$

Übergangsbogen mit Sinus-förmiger Krümmungslinie

Neben den oben beschriebenen Übergangsbogen wurden Übergangsbogen auch mit Sinus-förmiger Krümmungslinie nach [64] bei der Trassierung der deutschen NBS verwendet [110].

Die Übergangsbogengleichung nach [110] lautet:

$$y = \frac{x}{l_{Rsin}} - \frac{1}{2\pi} \cdot \sin \frac{2\pi \cdot x}{l_{Rsin}} \quad (2-59)$$

$$l_{Rsin} [m] = \text{Länge der Sinusrampe}$$

Der Krümmungsverlauf der Sinuslinie berechnet sich nach [110]:

$$k = \frac{2\pi}{l_{Rsin}^2} \cdot \sin \frac{2\pi \cdot x}{l_{Rsin}} \quad (2-60)$$

Wiener Bogen (Splinekurve)

Der Wiener Bogen – auf Basis einer Splinekurve – ist eine neuartige Form eines Übergangsbogens.

Seit 2002 ist der „Wiener Bogen“ für die Wiener Linien und die Österreichischen Bundesbahnen patentrechtlich geschützt. Er wurde erstmals beim Ausbau der Pannoniabahn eingesetzt [144].

Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Formen der Übergangsbogen wird beim Wiener Bogen der Übergangsbogen auf den Schwerpunkt eines Schienenfahrzeugs bezogen, der eine Splinekurve aufweist. Auf diese Weise wird die Belastung auf die Fahrzeuge und den Fahrweg minimiert und der Fahrkomfort gesteigert [144].

Obwohl mehrere weitere Formen von Übergangsbogen entwickelt wurden, werden sie in der Praxis nicht häufig verwendet.

2.2.2.2.3 Längsneigung I

Die Längsneigung I beschreibt die Höhenänderung Δh in Bezug auf den Streckenverlauf.

Neigungen sind ein grundsätzliches Rad-Schiene-Systemproblem. Aufgrund der großen Masse eines Zuges und der geringen Reibung zwischen Rad und Schiene ist das Rad-Schiene-System nur für geringe Neigung geeignet [50].

Gefällestrecken sind abhängig von den vorhandenen Bremssystemen des Schienenfahrzeuges und der innerhalb des Gefälles bzw. nachfolgenden Trassierung.

Nach § 7 EBO [31] soll die Längsneigung I auf Freier Strecke bei Neubauten auf Hauptbahnen maximal $I = 12,5\text{‰}$ betragen, auf Nebenbahnen dürfen $I = 40,0\text{‰}$ nicht überschritten werden. Soweit heute eine für Personen- und/oder Güterverkehr geeignete Strecke gebaut werden soll (NBS), sind diese Werte nach wie vor als zweckmäßige Grenzen anzusehen.

Andere Regelungen von Längsneigungen werden in der für die EUROPÄISCHE UNION (EU) geltenden TSI ([120] und [121]) genannt. Nach [34] „... darf für eigens für den Hochgeschwindigkeitsverkehr (HGV) gebauten oder zu bauenden Strecken beim Entwurf ein Höchstwert von 35 ‰ für Steigungen und Gefälle angesetzt werden.“

In einigen Fällen darf der maximale Wert auf kurzen Streckenabschnitten dennoch überschritten werden. Z.B. wurden bei den HGV-Strecke Köln-Rhein/Main Neigungen bis 40 ‰ verwendet.

Tabelle 14 zeigt die Rahmenbedingungen der Längsneigung I auf NBS und ABS.

Tabelle 14: Zulässige Längsneigungen I nach TSI INF ([83], S.54)

	Neubaustrecken	Ausbaustrecken
Personenverkehr	$I_{\max} = 35 \text{ ‰}$ (max.6 km) $\emptyset I = 25 \text{ ‰}$ (Durchschnitt 6 km)	keine Vorgabe
Güterverkehr	$I_{\max} = 12,5 \text{ ‰}$ $I_{\max} = 20 \text{ ‰}$ (max.3 km)	keine Vorgabe
Mischverkehr	$I_{\max} = 35 \text{ ‰}$ (max.0,5 km) Kein planmäßiges Halten und Anfahren bei diesen Grenzwerten	

Beim Entwurf einer neuen Strecke für den HGV sollen nicht nur die allgemein vorgeschriebenen Grenzwerte eingehalten werden. Mehr noch soll der Längsneigungswert I entsprechend der Zugkraft F_T in Abhängigkeit der angetriebenen Achsen (in Zukunft evtl. einzelne Räder) im Anwendungsbereich des Triebfahrzeugs (Tfz) angepasst werden [48].

2.2.2.2.4 Vertikale Ausrundung

In vertikalen Ausrundungen r_a von Wannen und Kuppen finden die Neigungswechsel statt. Ähnlich wie bei einem Gleisbogen im Lagenplan (x/y-Achse), berechnet sich die vertikale Beschleunigung a_z in den Wannen- und Kuppenausrundungen (z-Achse) mit:

$$a_z = \frac{v^2}{r_a} \quad (2-61)$$

$$a_z \text{ [m/sec}^2\text{]} = \text{vertikale Beschleunigung}$$

$$r_a \text{ [m]} = \text{Ausrundungsradius}$$

Wenn die Änderung der Längsneigung $I > 1 \text{ ‰}$ ⁴¹ beträgt, sollte mit einem Kreisbogen r_a ausgerundet werden, um vertikale Beschleunigung a_z und Schwingungen zu begrenzen [78] sowie hinsichtlich des Rucks c^{35} den Komfort nicht zu beeinträchtigen.

Für Neigungswechsel soll der Ausrundungsradius r_a , wie in *Tabelle 15* aufgeführt, begrenzt werden.

41 Bei Neigungsdifferenz $I < 1 \text{ ‰}$ wird kein Ausrundung eingefügt [103]

Tabelle 15: Planungswerte für den Ausrundungsradius r_a [103]

$V \leq 230 \text{ km/h}$	$V > 230 \text{ km/h}$
Höchstwert $\max r_a = 25.000 \text{ m}$	
Regelwert	
$\text{reg } r_a = 0,4 \cdot V^2 \text{ [m]}$	$r_a = 22.500 \text{ m}$
Ermessensgrenze	
$r_a = 0,25 \cdot V^2 \text{ [m]}$ $r_a \geq 2.000 \text{ m}$	$r_a = 16.000 \text{ m}$ bei Kuppen ⁴² $r_a = 14.000 \text{ m}$ bei Wannern
Zustimmungswert $r_a = 0,16 \cdot V^2 \text{ [m]}$ bei Kuppen ⁴² $r_a = 0,13 \cdot V^2 \text{ [m]}$ bei Wannern jedoch $r_a \geq 2.000 \text{ m}$	

Nach [103] soll „... die Länge des Ausrundungsbogens $l_a \geq 20 \text{ m}$ betragen. Ist das in Gleisverbindungen nicht möglich, darf bis $V \leq 80 \text{ km/h}$ und einer Neigungsdifferenz von $\Delta I \leq 4,5\text{‰}$, $l_a \geq 10 \text{ m}$ mit $r_a \geq 2.000 \text{ m}$ trassiert werden.“ Darüber hinaus sollte für $V \geq 160 \text{ km/h}$ bei der Verwendung des Regelwertes $\text{reg } r_a$ eine Zwischengerade von $l_g \geq 0,25 \cdot V$ bzw. bei Verwendung der Ermessensgrenze vom Ausrundungsradius r_a eine Zwischengerade von $l_g \geq 0,55 \cdot V$ zwischen Wanne und Kuppe gelegt werden [103].

2.3 Grundlagen der Fahrdynamik

In der Technischen Mechanik wird die Bewegung eines (starren) Körpers als Dynamik bezeichnet. Sie unterteilt sich nach [50] in die

- Kinematik: räumlich – zeitlicher Bewegungsablauf
- Kinetik: Einfluss der Kräfte auf die Bewegung

Die Fahrdynamik ist also die Wissenschaft der Bewegung und der dabei wirkenden Kräfte (= Kinematik + Kinetik), die durch das Fahren auf einer vorgegebenen Bahn verursacht werden.

Die Kräfte F , die ein Zug während des Fahrvorgangs vorfindet, setzen sich hauptsächlich zusammen aus der

- Zugkraft F_T
- Widerstandskraft F_W
- Bremskraft F_B

⁴² Da die physische Belastung abhebender Kräfte sich auf den Menschen stärker als die kompressiven Kräfte auswirken, ist die Kuppenausrundung größer als die Wannenausrundung [48].

Durch die Analyse der Beziehung zwischen diesen Kräften und der Zugsbewegung können Probleme im Zusammenhang mit dem Zugsbewegungsprozess (z.B. Ermittlung der Geschwindigkeit v und Fahrzeit t) gelöst werden.

Darüber hinaus müssen die Anforderungen an den Fahrgastkomfort erfüllen werden, denn die Bewegungsgrößen eines Zuges beinhalten auch Parameter, die den Komfort beeinflussen.

Diese Komfortkriterien sind z.B.:

- Beschleunigung a in
 - Längsrichtung a_x (x-Achse)
 - Querrichtung a_y (y-Achse)
 - Vertikalrichtung a_z (z-Achse)
- Ruck³⁵ c in
 - Längsrichtung c_x (x-Achse)
 - Querrichtung c_y (y-Achse)
 - Vertikalrichtung c_z (z-Achse)

Zur Ermittlung der mit der Linienführungs- und Trassierungssuche zusammenhängenden Parameter der Fahrdynamik werden die Grundlagen der Fahrdynamik in diesem Kapitel dargestellt.

2.3.1 Freiheitsgrade

In der Physik wird ein Freiheitsgrad eindeutig bestimmt als „... jede voneinander unabhängige (und in diesem Sinne „frei wählbare“) Bewegungsmöglichkeit, im weiteren Sinne jeden unabhängigen veränderlichen inneren oder äußeren Parameter eines Systems ...“ [141]⁴³.

In der Mechanik ist ein Freiheitsgrad jede Bewegungsmöglichkeit eines Körpers, die in der Kinematik dieses Systems durch eine unabhängige Koordinate beschrieben wird [141].

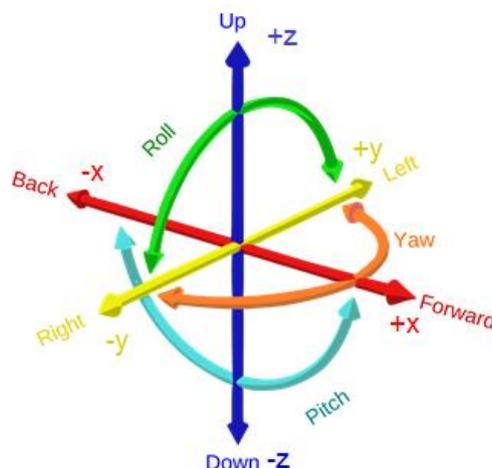


Abbildung 26: Die sechs Freiheitsgrade eines Körpers im freien Raum ([141], Ergänzung ZHAO)

⁴³ <https://de.wikipedia.org/wiki/Freiheitsgrad>

Abbildung 26 zeigt die sechs kinematischen Freiheitsgrade eines Körpers im freien Raum:

- 3 Translationsrichtungen
 - x- Achse: Longitudinalbewegung (Forward und Back)
 - y- Achse: Seitenbewegung (Right und Left)
 - z- Achse: Vertikalbewegung (Up und Down)
- 3 Rotationsachsen
 - Rollen (Roll): Drehung um x-Achse
 - Nicken (Pitch): Drehung um y-Achse
 - Gieren (Yaw): Drehung um z-Achse

Die Bewegung eines starren Körpers auf einer 3-dimensionalen Bahnkurve kann in zwei Koordinatensysteme unterteilt werden (Abbildung 27, [115]):

- ortsfeste Koordinaten X, Y, Z
- mitbewegte (zugfeste) Koordinaten x, y, z, v, V

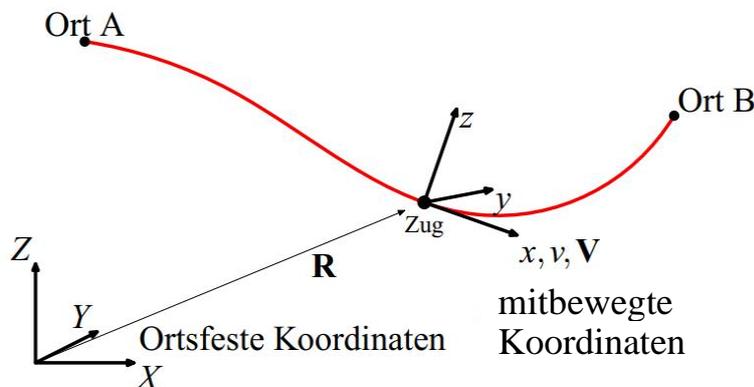


Abbildung 27: Bewegung eines starren Körpers auf einer 3-dimensionalen Bahnkurve [115]

Daraus kann die Bewegung eines Körpers auf einer 3-dimensionalen Bahnkurve wie folgende beschrieben werden ([50] und [115]):

- translatorische Bewegung seines Schwerpunkts
 - Ortsvektoren $R(t) = X(t), Y(t), Z(t)$ der Bahnkurve des Schwerpunkts im ortsfesten System sowie der Koordinatenursprung im mitbewegten System
 - Geschwindigkeit $V(t) = \dot{R}(t)$ des Schwerpunkts im mitbewegten System
 - (translatorische) Geschwindigkeit $v(t)$ des Schwerpunkts im mitbewegten System = zeitliche Änderung des Ortsvektors in x-Richtung
 - (translatorische) Beschleunigung $a(t)$ des Schwerpunkts = zeitliche Änderung der Geschwindigkeit $v(t)$ im mitbewegten System in x-Richtung
- rotatorische Bewegung (Drehung) des Körpers um eine Achse
 - Richtung dieser Achse $w(t)$ mit $|w| = 1$ und
 - Winkelgeschwindigkeit $\omega(t)$ des Körpers um diese Achse
 - zeitliche Änderung der Achsrichtung $w(t)$ mit $|w + dw| = 1$ und
 - Winkelbeschleunigung $\dot{\omega}(t)$ als zeitliche Änderung der Winkelgeschwindigkeit ω

Wird die Translation durch eine Beschleunigung $a(t)$ beschrieben, ergeben sich die folgenden vier Beschleunigungsarten in Abhängigkeit der Änderung der Beschleunigung und der Bewegungsrichtung [115]:

- geradlinig: es treten keine Beschleunigungen quer zur Bewegungsrichtung auf
- gleichförmig und geradlinig: es treten keine Beschleunigungen auf ($v = \text{konstant}$, *Abbildung 28 a*)
- gleichmäßig beschleunigt: es tritt nur eine nach Richtung und Betrag konstante Beschleunigung auf ($a = \text{konstant}$, $v = a \cdot t + v_0$, *Abbildung 28 b*)
- ungleichmäßig beschleunigt: die Beschleunigung ist nicht konstant (*Abbildung 28 c*)

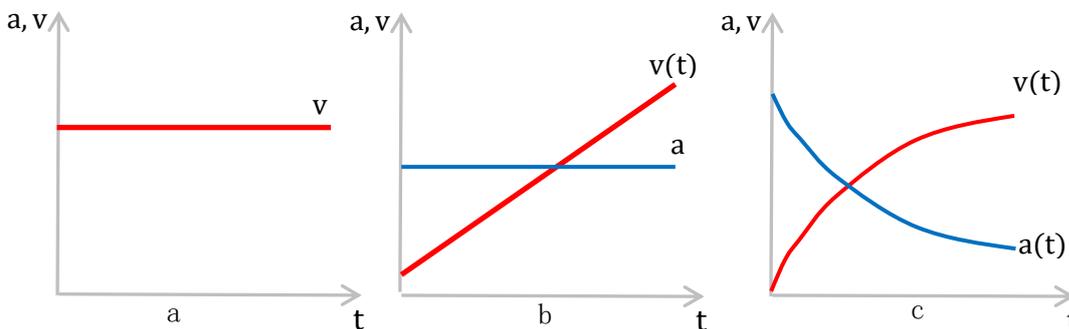


Abbildung 28: Bewegungsformen [115]

Bei 2-dimensionalen Problemen (z.B. Landverkehre) reduziert sich i.d.R. die Anzahl der Freiheitsgrade auf drei Freiheitsgrade ([46] und [50]):

- 2 Translationen
 - x- Achse: Longitudinalbewegung
 - y- Achse: Seitenbewegung, resultiert aus dem Fahren im Bogen
- 1 Rotation
 - um die z-Achse: Richtungsänderung, resultiert aus der Winkeländerung ω

Bei spurgeführten Systemen reduziert sich die Anzahl der Freiheitsgrade auf zwei Freiheitsgrade [50]:

- 1 Translation
 - x- Achse: Longitudinalbewegung
- 1 Rotation
 - um die z-Achse: Richtungsänderung, resultiert aus der Winkeländerung ω

Im Gegensatz zu den vorstehenden Ausführungen werden in dieser Arbeit vier Freiheitsgrade bei der Suche und Optimierung einer NBS in der Ebene berücksichtigt:

- 2 Translationen
 - x- Achse: Longitudinalbewegung
 - y- Achse: Seitenbewegung, maßgebend für das Fahren im Bogen
- 2 Rotationen
 - um die y-Achse: Beschleunigungsänderung aus der Höhendifferenz
 - um die z-Achse: Richtungsänderung, resultiert aus der Winkeländerung ω

Wie oben ausgeführt ist die Beschleunigung a ein bedeutender Parameter für Fahrzeug und Fahrweg und wird in dieser Arbeit als wichtige Grenzvariable bei der späteren Optimierung einer NBS verwendet.

2.3.2 Zugbewegungsprozess

Laut Analyse des Zugbewegungsprozesses umfassen die Kräfte F , welche die Geschwindigkeit v eines Zuges beeinflussen, wie schon Eingangs des Kapitels 2.3 erwähnt hauptsächlich

- die Zugkraft F_T
- die Widerstandskräfte
 - Streckenwiderstand F_{WStr}
 - Fahrzeugwiderstand F_{WZ}
- die Bremskraft F_B

Die Kräfte sind in *Abbildung 29* dargestellt.

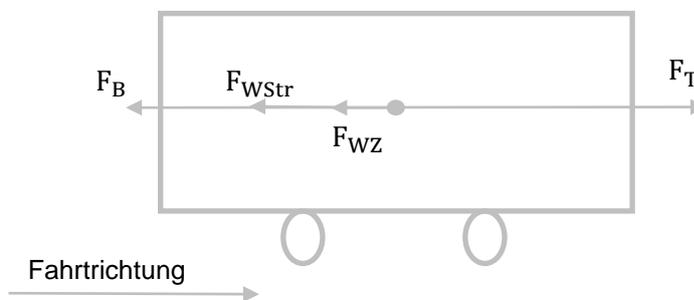


Abbildung 29: Darstellung der am Fahrzeug in Längsrichtung wirkenden Kräfte

Der Bewegungszustand wird wie folgt unterteilt [138]:

- Beschleunigung mit Zugkraft F_T

$$F_a = F_T - (F_{WZ} + F_{WStr}) \quad (2-62)$$

$F_a =$ Beschleunigungskraft

- Beschleunigung mit Bremskraft F_B

$$F_a = -(F_B + F_{WZ} + F_{WStr}) \quad (2-63)$$

- Beschleunigung ohne Zugkraft F_T und Bremskraft F_B

$$F_a = -F_{WZ} + F_{WStr} \quad (2-64)$$

Wenn der Zug mit konstanter Geschwindigkeit v_{konst} fährt oder sich in Ruhe befindet ($V = 0$ km/h), ist die Beschleunigungskraft $F_a = 0$ [kN] [138].

2.3.2.1 Zugkraft

Die Zugbewegung wird durch die auf die Gleise übertragbare Zugkraft F_T und die Bremskraft F_B reguliert. Die Übertragbarkeit regelt der Reibungskoeffizient μ .

Die Zugkraft F_T eines Tfzs ist also durch zwei Kräfte gekennzeichnet [84]:

- „... die maximal zwischen Rad und Schiene übertragbare Kraft“ $F_{T\mu}$
- „... die leistungsbedingte maximale Zugkraft des Triebfahrzeugs“ F_T

Unter der Annahme, dass die Leistung P des Tfzs konstant ist, kann die Beziehung zwischen der Zugkraft F_T und der Geschwindigkeit v eines Zuges mithilfe der folgenden Formel dargestellt werden:

$$F_T = \frac{P}{v} \quad (2-65)$$

F_T [kN] = Zugkraft des Tfzs
 P [kW] = Leistung des Tfzs

Damit ergibt sich mit der Zugkraft des Tfzs F_T und der Geschwindigkeit des Zuges v ein F-V-Diagramm wie in *Abbildung 30* prinzipiell dargestellt.

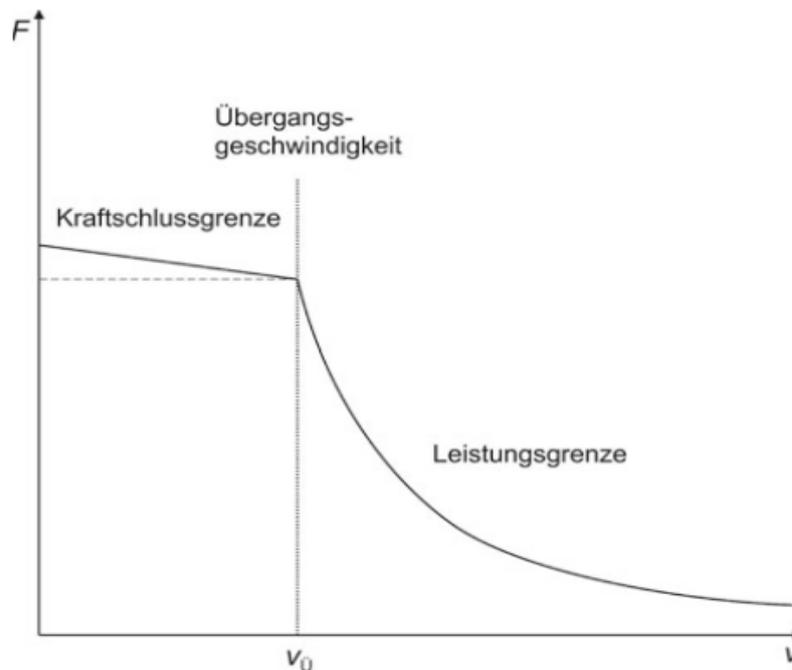


Abbildung 30: Zugkraft-Geschwindigkeit-Diagramm ([84], S. 21)

In [84] wird die Übergangsgeschwindigkeit $v_{\ddot{u}}$ als die Schnittstelle zwischen Kraftschlusszugkraft $F_{T\mu}$ und der Zugkraft des Antriebssystems F_T beschrieben:

- Für die Bereiche, die unter der Übergangsgeschwindigkeit $v_{\ddot{u}}$ liegen, befindet sich das Tfz unterhalb der Rad-Schiene-Reibungsgrenze.
- Oberhalb der Übergangsgeschwindigkeit $v_{\ddot{u}}$ nimmt die Zugkraft F_T mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit v schnell ab.

2.3.2.2 Bremskraft

Die Bremskraft F_B (Abbildung 29) wird i.d.R. eingesetzt um [56]:

- die Geschwindigkeit zu reduzieren
- die Geschwindigkeit auf Gefällstrecken konstant zu halten
- den Zug innerhalb der geforderten Grenzen anzuhalten
- den Zug im Stillstand zu sichern

Während des Bremsvorgangs wird die kinetische Energie E_{kin}^{44} des Fahrzeuges mittels Reibung in Wärme umgewandelt [48].

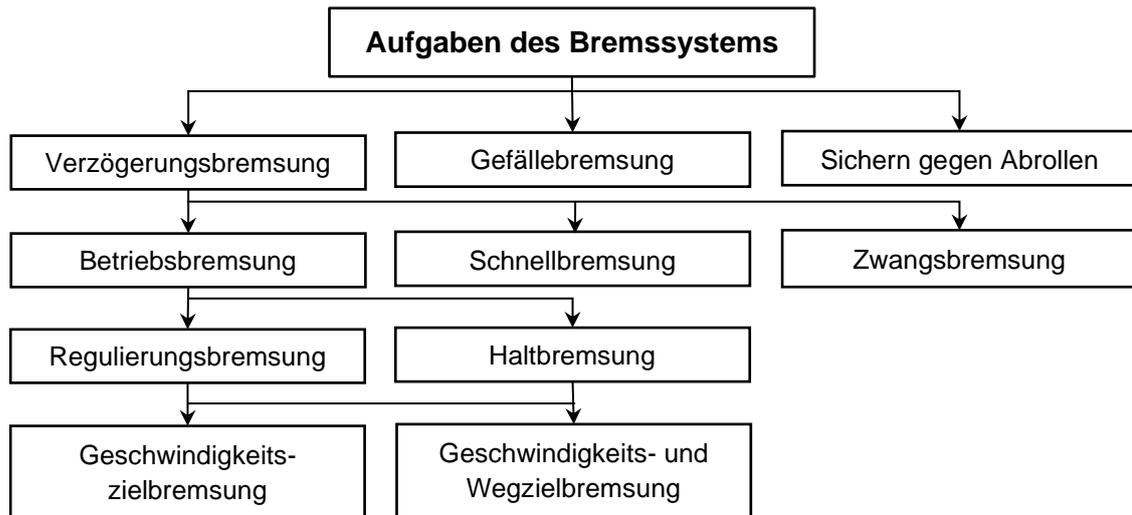


Abbildung 31: Übersicht über die Aufgaben des Bremssystems ([138], Ergänzung ZHAO)

Aus Abbildung 31 ist ersichtlich, dass die Aufgaben des Bremssystems in die folgenden drei Hauptaufgaben zusammengefasst werden:

- Änderung des Bewegungszustands: die Geschwindigkeit wird (bis zum Halt) reduziert (Verzögerungsbremung)
 - Betriebsbremsung die Bremsleistung wird anteilig genutzt
 - Schnellbremsung⁴⁵ die Bremsleistung wird vollständig ausgenutzt
 - Zwangsbremung⁴⁶ maximale Bremskraft, Notbremsung durch Fahrgast oder LST ausgelöst
- Erhaltung des Bewegungszustands: Bremskraft, welche die Gefälle- und Zugwiderstandskraft ausgleicht
- Sichern gegen Abrollen: Vermeidung einer Bewegung eines abgestellten Fahrzeuges oder haltenden Zuges

Bremsen werden zum einen unterschieden in

- berührungsbehaftet
- berührungsfrei

⁴⁴ E_{kin} siehe Kapitel 2.3.4

⁴⁵ Die Schnellbremsung wird bei der Straßenbahn als Gefahrenbremsung bezeichnet [138]

⁴⁶ I.d.R. führt die Zwangsbremung zum Stillstand und ist nicht regulierbar bzw. in bestimmten Streckenabschnitten (Tunnel, Brücken, ...) überbrückbar.

Die berührungsfreien Bremsen werden als frei wirkende und über die Antriebseinrichtung wirkende Bremsen unterteilt.

Zum andern unterscheiden sich die Bremsarten in

- haftreibungsabhängige Bremsen
- haftreibungsunabhängige Bremsen

Abbildung 32 zeigt die Bremsarten.

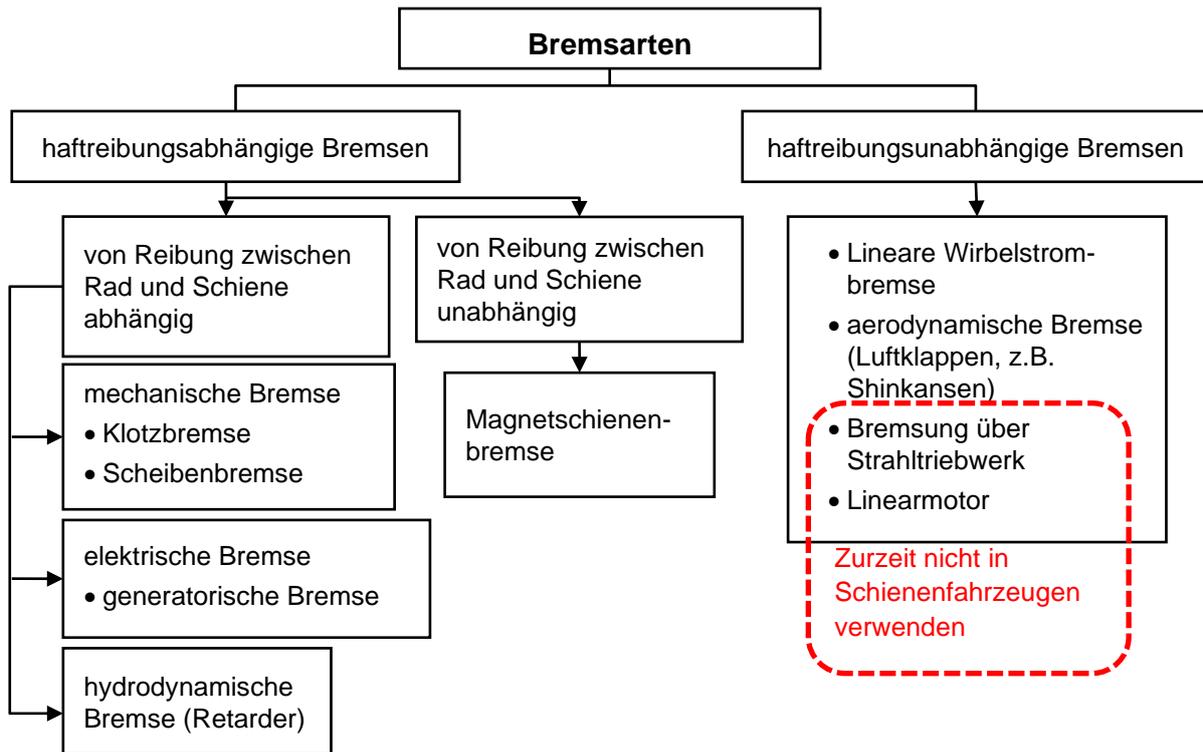


Abbildung 32: Haftreibungsabhängige und -unabhängige Bremsarten ([48], [51] und [44], Ergänzung ZHAO)

Klotzbremse

Als zwischen Rad und Schiene reibungsabhängige Bremse ist die Klotzbremse die am häufigsten verwendete Schienenfahrzeugbremse für $V_{\max} \leq 140 \text{ km/h}$ [51]. Sie wird fast ausschließlich bei Güterwagen und teilweise bei Regional- und Nahverkehrswagen verwendet [56].

Scheibenbremse

Scheibenbremsen sind eine Reibungsbremsart. Die Bremsscheiben befinden sich an den Triebachsen bzw. auf den nicht angetriebenen Achsen der Radsätze [48].

Generatorische Bremsen

Generatorische Bremsen nutzen die Antriebselektromotoren des Tfs als Generator, der –

angetrieben durch die kinetische Energie E_{kin}^{44} des Fahrzeuges – elektrische Energie zum Abbremsen erzeugt. Die beim Bremsvorgang erzeugte elektrische Energie wird in das Bahnstromnetz zurückgespeist (rekuperiert). Somit wird die kinetische Energie E_{kin}^{43} umgewandelt als elektrische Energie zurückgewonnen.

I.d.R. wird die generatorische Bremse bei elektrisch betriebenen Triebfahrzeugen aller Art (z.B. auch batterie-, wasserstoff- und dieselelektrisch betriebenen Triebfahrzeugen) eingesetzt.

Die generatorische Bremse ist verschleißfrei [48].

Hydrodynamische Bremse

Die hydrodynamische Kupplung⁴⁷ als Drehzahlwandler ist eine Kombination aus einer (Kreisel-) Pumpe und einer Turbine in einem Gehäuse.

Wenn das Turbinenrad fest im Gehäuse montiert ist, kann es als hydrodynamische Bremse (Retarder) betrachtet werden. Hydrodynamische Bremsen arbeiten bei Schienenfahrzeugen mit zwei Teilen [56]:

- hydraulischer Retarder wie eine Wasserwirbelbremse
- Pumpenrad Anschluss an den Antriebsradsatz und Arbeit gegen ein feststehendes Turbinenrad

Hydrodynamische Bremsen sind verschleißfreie Fahrzeugbremsen. Sie wandeln die kinetische Energie E_{kin}^{44} in Wärme um.

Diese Bremsart wird hauptsächlich bei dieselhydraulischen Lokomotiven und Triebwagen eingesetzt [56].

Magnetschienenbremse

Die Magnetschienenbremse wirkt direkt auf die Schiene. Die Bremskraft F_B wirkt über Dauermagneten und ist nicht regulierbar [51].

Diese verschleißbehaftete Bremse wird nur für Schnell-/Zwangsbremsungen eingesetzt [48].

Lineare Wirbelstrombremse

Die lineare Wirbelstrombremse ist unabhängig vom Rad-Schiene-Kraftschluss. Sie ist im Einsatz berührungslos und verschleißfrei. Sie kann in ihrer Bremskraft F_B präzise gesteuert werden. Die lineare Wirbelstrombremse wird z.B. in Deutschland im ICE eingesetzt [143].

⁴⁷ Die hydrodynamische Kupplung und der hydrodynamische Wandler werden auch hydraulische Kupplung und hydraulischer Wandler genannt [56].

I.A. hängt die Bremskraft F_B von der Geschwindigkeit v ab.

Um die Anforderungen höherer Fahrgeschwindigkeiten zu erreichen, wird in dieser Arbeit der optimale Bremsweg und die -zeit berechnet, wobei sowohl die hohe Geschwindigkeit v als auch der Fahrgastkomfort berücksichtigt wird.

2.3.2.3 Widerstände

Widerstände sind Kräfte, die einer Bewegung entgegenwirken. Die Widerstandskräfte (kurz: Widerstände) F_W werden zunächst unterscheiden in:

- Streckenwiderstände F_{WStr} : geschwindigkeitsunabhängige Widerstände
- Fahrzeugwiderstände F_{WZ} : geschwindigkeitsabhängige Widerstände

Diese Widerstände unterteilen sich wie folgt (Abbildung 33):

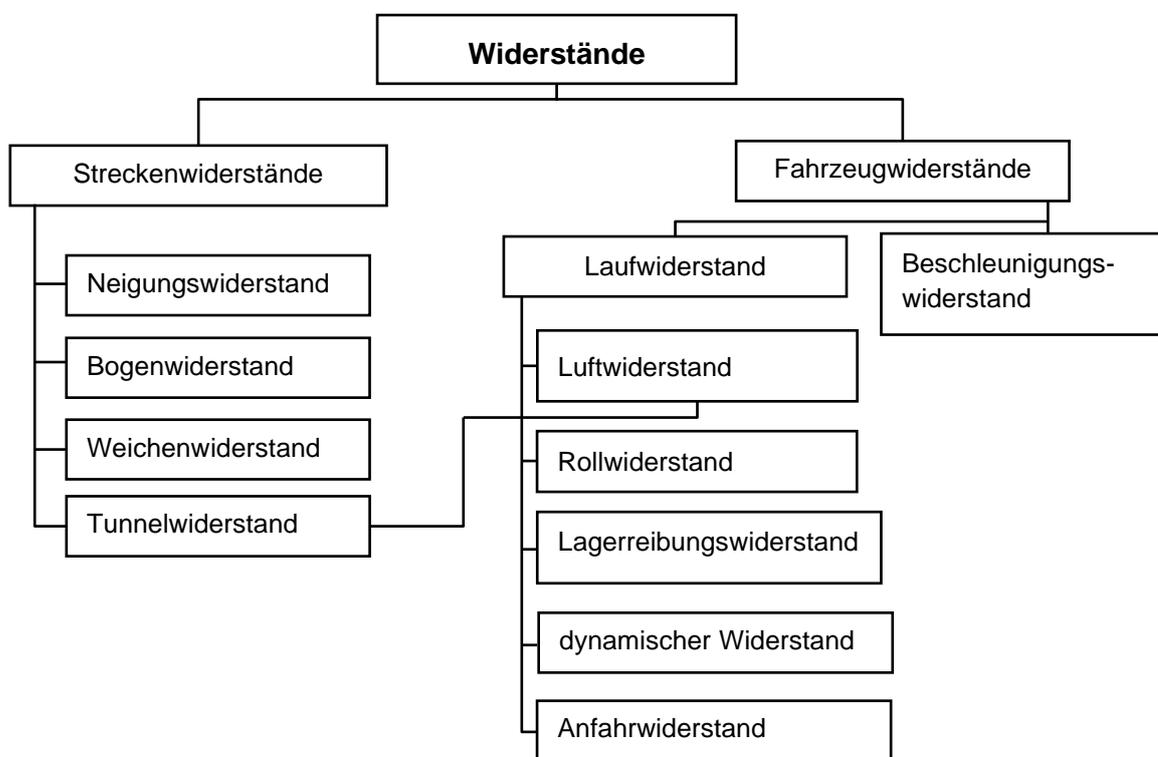


Abbildung 33: Unterteilung der Widerstände ([50], [115] und [138], Ergänzung ZHAO)

Die Widerstände, die während der Fahrt gegen einen Zug auftreten, werden auf das Gesamtgewicht des Zuges G_{Zug} bezogen.

Zur Ermittlung des Gesamtwiderstandes F_W werden sie als spezifische Einzelwiderstände f in [‰] der Strecken- und Fahrzeugwiderstände und damit als anteiliger „Neigungswiderstand“ ermittelt [50]:

$$f = \frac{F}{G} = \frac{F}{m \cdot g} \quad (2-66)$$

f [‰] = spezifischer Widerstand
 F [N] = Widerstandskraft

m [kg] = Masse (hier Zugmasse)
 G [N] = hier G_{Zug} = Zuggewicht

2.3.2.3.1 Streckenwiderstände

Der Streckenwiderstand F_{WStr} ist die Summe aller Kräfte, die der Bewegung eines Zuges aus der Infrastruktur entgegenwirken. Er setzt sich aus folgenden Widerständen zusammen (Abbildung 33):

- Neigungswiderstand F_N
- Bogenwiderstand F_{Bo}
- Weichenwiderstand F_{Ww}
- Tunnelwiderstand F_{WLuT}

Neigungswiderstand

Wenn sich ein Zug in einer Neigung I bewegt, wird durch die Schwerkraft des Zuges entlang der Neigung eine Kraft erzeugt, die als Neigungswiderstand F_N bezeichnet wird (Abbildung 34).

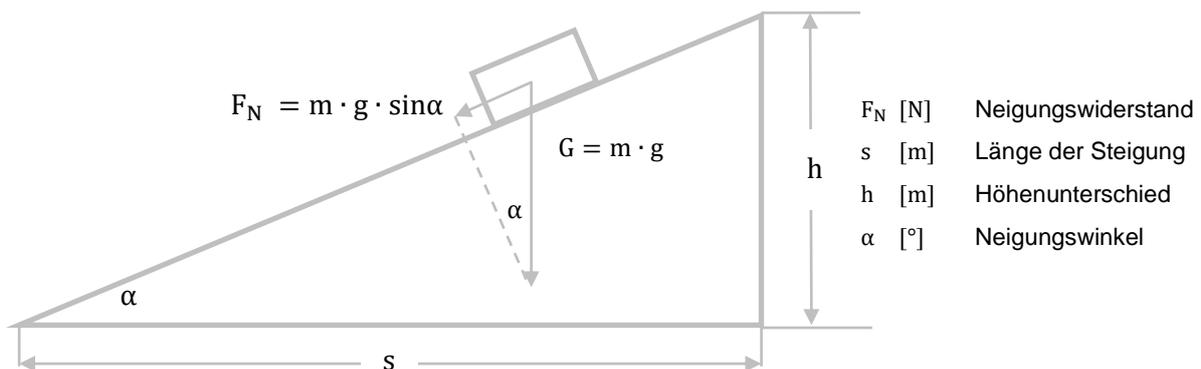


Abbildung 34: Darstellung des Neigungswiderstands F_N

Aus Abbildung 34 berechnet sich die Längsneigung I mit:

$$I [\text{‰}] = \tan \alpha = \frac{h}{s} \quad (2-67)$$

Der Neigungswiderstand F_N ist wie folgt [50]:

$$F_N [\text{N}] = G \cdot \sin \alpha = m \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (2-68)$$

und der spezifische Neigungswiderstand f_N :

$$f_N [\text{‰}] = \frac{m \cdot g \cdot \sin \alpha}{m \cdot g} \quad (2-69)$$

Wenn der Neigungswinkel α klein ist, gilt $\sin \alpha \sim \tan \alpha$. Dann wird der spezifische Neigungswiderstand f_N wie folgt ermittelt werden:

$$f_N [\text{‰}] = \frac{m \cdot g \cdot \tan \alpha}{m \cdot g} = \frac{m \cdot g \cdot I}{m \cdot g} = I \quad (2-70)$$

Der Neigungswiderstand F_N an der Stelle x kann dann mit dem Δs -Schrittverfahren⁴⁸ wie folgt berechnet werden:

$$F_N \text{ [N]} = m \cdot g \cdot I(x) \quad (2-71)$$

$$I(x) \text{ [‰]} = \text{Neigung an der Stelle } x$$

Der Neigungswiderstand F_N kann positiv (Steigung) oder negativ (Gefälle) sein.

Der negative Neigungswiderstand äußert sich als Beschleunigungskraft, d.h.:

Er kann Potentialenergie E_{pot} ⁴⁹ in kinetische Energie E_{kin} ⁴⁴ umsetzen.

Bogenwiderstand

Der Bogenwiderstand F_{B_0} entsteht durch Reibung (inkl. Schlupf und Gleiten) zwischen Rad und Schiene wegen der momentenstarken Verbindung der Räder und der daraus sich ergebenden Wegdifferenz zwischen Bogeninnen- zu der -außenschiene, wenn ein Zug einen Gleisbogen befährt (*Abbildung 35*). Er ist weitgehend abhängig von den [50]

- Infrastrukturparametern
 - Halbmesser r des Gleisbogens
 - Überhöhung u der Bogenaußenschiene
- Fahrzeugparametern
 - Achsabstand b des Fahrzeug-/Drehgestells
 - Geschwindigkeit v des Fahrzeugs

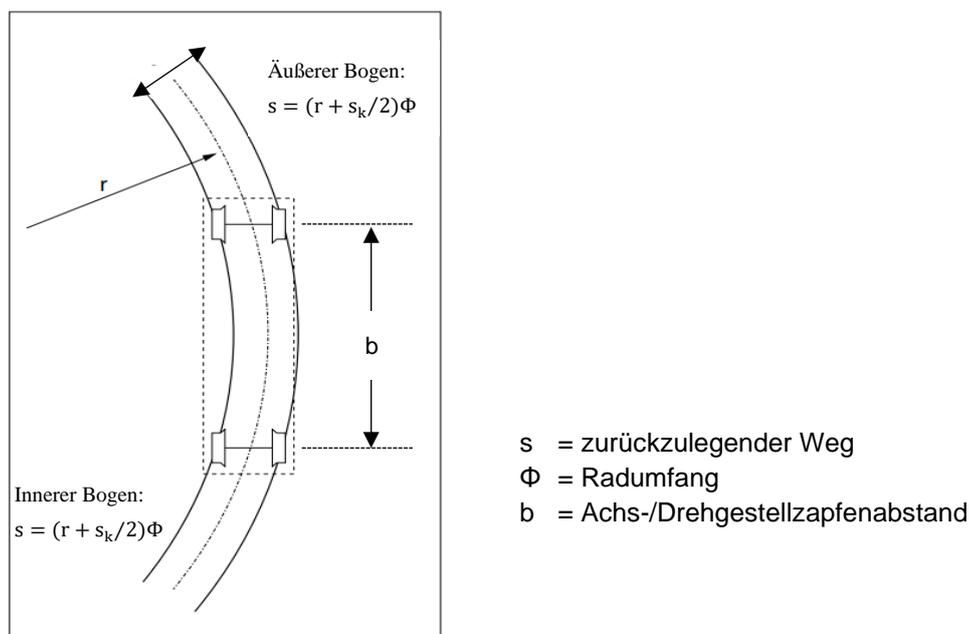


Abbildung 35: Darstellung des Bogenwiderstands F_{B_0} ([115], Ergänzung ZHAO)

48 Siehe Kapitel 3.2.2

49 Siehe Kapitel 2.3.4

Der Bogenwiderstand F_{Bo} berechnet sich z.B. mit der empirischen Formel von RÖCKL [84]:

$$F_{Bo} \text{ [N]} = m \cdot g \cdot \frac{650}{r - 55} \quad \text{für } r > 300 \text{ m} \quad (2-72)$$

$$F_{Bo} \text{ [N]} = m \cdot g \cdot \frac{650}{r - 30} \quad \text{für } r < 300 \text{ m} \quad (2-73)$$

Der spezifische Bogenwiderstand f_{Bo} berechnet sich mit:

$$f_{Bo} \text{ [‰]} = \frac{650}{r - 55} \quad \text{für } r > 300 \text{ m} \quad (2-74)$$

$$f_{Bo} \text{ [‰]} = \frac{550}{r - 30} \quad \text{für } r < 300 \text{ m} \quad (2-75)$$

Weichenwiderstand

Der Weichenwiderstand F_{Ww} hat überwiegend Bedeutung [50]

- für den Rangierbetrieb
- im Bahnhofsbereich

Er entsteht durch [50]

- das Befahren eines Weichenbogens
- die nicht-stetige Führung der Räder beim Befahren starrer Herzstücke
- die Zwangsführung an den Radlenkern

Der spezifische Bogenwiderstand f_{Ww} beträgt i.d.R. [50]:

$$f_{Ww} \text{ [‰]} = 0,5 \text{ bis } 1 \quad (2-76)$$

Tunnelwiderstand

Der Tunnelwiderstand F_{WLuT} ist sowohl ein Streckenwiderstand als auch ein Luftwiderstand des Fahrzeugs⁵⁰ (*Abbildung 33*) [79]. Er entsteht durch die Kolbenwirkung der Züge in der Tunnelröhre infolge [50]

- der Beschleunigung der verdrängten Luftmassen
- der Fahrzeugaußenflächenreibung gegen die Luftströmung
- der Wirkung von Druck- und Sogkräften

Wenn ein Zug einen Tunnel durchfährt, entsteht eine Druckwelle. Diese Druckwelle stößt auf der Ausfahrtseite des Tunnels gegen die umgebende Luft, die als Membran wirkt. Die Luft im Tunnel wird verdichtet und wirkt dem Zug entgegen ([50] und [79]).

Grundsätzlich ist der Tunnelwiderstand F_{WLuT} abhängig von [79]

- der Tunnel- und Zuglänge
- der Zuggeschwindigkeit
- dem Verhältnis zwischen dem Tunnel- und Fahrzeugquerschnitt (Verspermaß R) [50]:

$$R = \frac{A_{Tu}}{A_{Fzg}} \quad (2-77)$$

A_{Tu} = Tunnelquerschnitt

A_{Fzg} = Fahrzeugquerschnitt

50 Siehe Kapitel 2.3.2.3.2

Der Tunnelwiderstand F_{WLuT} berechnet sich nach [138] mit:

$$F_{WLuT} = c_{LuT} \cdot A_{Norm} \cdot v^2 \quad (2-78)$$

$$c_{LuT} = 0,5 \cdot \rho_{Norm} [c_{Tu0} + k_{Vsp}(c_{Tu1} + n \cdot c_{Tu2})] \quad (2-79)$$

$$k_{Vsp} = \frac{A_{Norm}}{A_{Tu}} \quad (2-80)$$

F_{WLuT} = Luftwiderstandskraft eines Zugs im Tunnel

c_{LuT} = Versperrungskoeffizient

k_{Vsp} = Luftwiderstandskraft eines Zugs im Tunnel

A_{Norm} = Spantquerfläche bezogen auf 10 m²

ρ_{Norm} = 1,225 kg/m³

A_{Tu} = Tunnelquerschnitt

c_{Tui} = Konstante (ermittelt durch Versuche)

n = Anzahl der Wagen des Zugs

R = $c_{LuT} \cdot A_{Norm}$

Der spezifische Tunnelwiderstand f_{WLuT} berechnet sich mit:

$$f_{WLuT} [\text{‰}] = \frac{F_{WLuT}}{m \cdot g} = \frac{c_{LuT} \cdot A_{Norm} \cdot v^2}{m \cdot g} \quad (2-81)$$

Aus den Gleichungen (2-78), (2-79) und (2-80) ist ersichtlich, dass der Tunnelwiderstand F_{WLuT} wesentlich vom Versperrmaß R und der Geschwindigkeit v wesentlich abhängt. Daher wird er i.d.R. als ein Teil des Luftwiderstandes F_{WL} im Fahrzeugwiderstand behandelt ([106] und [138]).

Für Fahrgeschwindigkeiten unter 160 km/h werden die aerodynamischen Einflüsse in Tunneln vernachlässigt [106].

Betrachtungen zum Streckenwiderstand

Aus dem zuvor Aufgeführten lässt sich zusammenfassend feststellen, dass

- der Neigungswiderstand F_N der maßgebende Faktor für die Anfahrgranzlast G und die erreichbare Beharrungsgeschwindigkeit eines Zuges ist [122]
- der Bogenwiderstand F_{Bo} umgekehrt proportional zu Bogenradius r ist und bei großen Radien r , die mit einer hohen Geschwindigkeit v befahren werden, i.d.R. der Bogenwiderstand F_{Bo} nur einen geringen Einfluss hat [84]
- der Weichenwiderstand F_{Ww} nur in bestimmten Situationen bedeutend wird
- der Tunnelwiderstand F_{WLuT}
 - nur ab einer Tunnellänge ≥ 500 m relevant ist [122]
 - bei der Berechnung des Gesamtfahrzeugwiderstandes F_{WZ} als ein Teil des Luftwiderstandes durch empirische Formel betrachtet werden kann ([106] und [138])

In dieser Arbeit wird daher hauptsächlich der Neigungswiderstand F_N bzw. spezifischer Neigungswiderstand f_N für die nachfolgenden Betrachtungen berücksichtigt.

2.3.2.3.2 Fahrzeugwiderstände

Der Fahrzeugwiderstand F_{WZ} ist die Summe aller Kräfte am und im Zug, die der Bewegung eines Zuges entgegenwirken. Diese Kräfte werden durch verschiedene physikalische Prozesse (insbesondere Reibung) verursacht.

In [84] wird der Fahrzeugwiderstand F_{WZ} definiert. Er setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen (*Abbildung 33*):

- Laufwiderstand F_{WLauf}
 - Luftwiderstand F_{WL}
 - Rollwiderstand $F_{W\mu}$
 - Lagerreibungswiderstand F_{WLa}
 - dynamischer Widerstand F_{Wdyn}
 - Anfahrwiderstand F_{WAnf}
- Beschleunigungswiderstand F_{Wa}

Luftwiderstand

Der Luftwiderstand F_{WL} besteht aus den Luftwiderständen an Bug und Heck sowie der gesamten Zugober-/außenfläche [56]. Er ist nach [50] über die gesamte Zuglänge abhängig von der:

- Fahrgeschwindigkeit relativ zur Windströmung
- angeströmten Fläche
- Ober-/Außenflächenreibung
- Druck- und Sogverteilung

Rollwiderstand

Unter dem Einfluss der Druckdefomation bilden Rad und Schiene an deren Kontaktstelle eine HERTZ'sche Kontaktfläche. Durch die ständige Veränderung dieser Kontaktflächen während der Fahrbewegung wird der Rollwiderstand $F_{W\mu}$ erzeugt [138]. Der Rollwiderstand $F_{W\mu}$ ist somit abhängig von [50]:

- der Radlast
- den tribologischen Anteilen aus den Eigenschaften der Rad/Schiene-Kontaktfläche
- dem Reibungswiderstand der Lager F_{WLa}
 - Alt: Gleitlager > Reibungswiderstand
 - Heute: Rollenlager < Reibungswiderstand
- dem Reibungswiderstand der Kraftübertragungseinheiten $F_{Kraftüber}$

Lagerreibungswiderstand

Der Lagerreibungswiderstand F_{WLa} ergibt sich aus der Reibung, der innerhalb der Lager (z.B. Gleitlager oder Wälzlager) von Schienenfahrzeugen entsteht [138].

dynamischer Widerstand

Während der Fahrbewegung tritt eine gedämpfte Schwingbewegung auf. Diese kontinuierliche Dämpfungsbewegung geht mit einem Energieverlust einher, der als dynamischer Widerstand $F_{W_{dyn}}$ bezeichnet wird [138].

Anfahrwiderstand

Der Anfahrwiderstand $F_{W_{Anf}}$ ist der Fahrzeugwiderstand zu Beginn der Bewegung [138]. Im Moment des Bewegungsbeginns müssen die Wälzkörper des Achslagers, die am Lagerring haften, gelöst und mit der Drehbewegung Schmiermittel in die Kontaktflächen gefördert werden [138].

Aufgrund der Toleranzen der Zugvorrichtung ist es möglich, „die Wagen nacheinander in der Ebene anzuziehen und damit den Anfahrwiderstand $F_{W_{Anf}}$ der Wagen nacheinander zu überwinden“ [84]. Daher ist der spezifische Anfahrwiderstand des Zuges geringer als der spezifische Anfahrwiderstand eines Einzelwagens ([84] und [138]).

Beim Anfahren in der Steigung geht dieser Vorteil jedoch verloren und der Anfahrwiderstand $F_{W_{Anf}}$ hängt von der Neigung ab [138]. Der spezifische Anfahrwiderstand $f_{W_{Anf}}$ an einer Steigung I wird mit dem Δs -Schrittverfahren ermittelt und ergibt sich nach [138] mit:

$$f_{W_{Anf}}(x) [\%] = f_{W_{Anf0}} + k_1 \cdot I(x) \quad (2-82)$$

$f_{W_{Anf}}(x) [\%]$	=	spezifischer Anfahrwiderstand an Stelle x
$f_{W_{Anf0}} [\%]$	=	spezifischer Anfahrwiderstand bei $I = 0 \%$
$I(x) [\%]$	=	Neigung an Stelle x
k_1	=	Steigungsfaktor für die lineare Gleichung (empirischer Faktor 0,3)

Beschleunigungswiderstand

Während der Beschleunigungsphasen tritt eine translatorische Beschleunigung und eine Drehbeschleunigung der rotierenden Massen auf [56]. Daraus ergibt sich der Beschleunigungswiderstand F_{W_a} . Er ist abhängig von [50]:

- der Masse des Zuges m_{Zug}
- der Masse der im Zug rotierenden Teile

Je größer das Verhältnis zur zu beschleunigenden Masse und je größer das Massenträgheitsmoment ist, desto größer ist das Beschleunigungsmoment [56]. Die fiktive Zugmasse m' mit den rotierenden Massen wird nach [50] mit dem Massenfaktor ρ ermittelt:

$$m' = m \cdot \rho \quad (2-83)$$

$\rho = \text{Massenfaktor}^{51}$

51 Abhängig von der bewegten Massen eines Fahrzeugs (z.B. bei Personenwagenzug $\rho = 1,06$ [138])

Der Beschleunigungswiderstand F_{Wa} berechnet sich dann aus Gleichung (2-83) [50]:

$$F_{Wa} \text{ [N]} = m' \cdot a = m \cdot \rho \cdot a \quad (2-84)$$

und der spezifische Beschleunigungswiderstand f_{Wa} :

$$f_{Wa} \text{ [‰]} = \frac{m' \cdot a}{m \cdot g} = \frac{\rho \cdot a}{g} \quad (2-85)$$

Für die Beschleunigen bzw. Beharrungsfahrt gilt für die Zugkraft F_T ([48] und [50]):

$$F_T = F_{WLauf} + F_{Wa} \quad (2-86)$$

Für die Beschleunigungsfahrt muss sein ([48] und [50])

$$F_T > F_{WLauf} \quad (2-87)$$

Damit ergibt sich [48]:

$$F_{Wa} > 0 \quad (2-88)$$

Nach [138] wird die Beschleunigungskraft F_a wie folgt berechnet:

$$F_a \text{ [N]} = m \cdot \rho \cdot a \quad (2-89)$$

Für die Beschleunigungskraft ist daher (vgl. Gleichung (2-84) und (2-89))

$$F_a = F_{Wa} \quad (2-90)$$

Wenn ein Zug sich in einer Steigung bewegt, wirkt der Neigungswiderstand F_N der Beschleunigungskraft F_a entgegen. Um den Zug mit der Zugkraft F_T in einer Steigung zu beschleunigen, wird die Beschleunigungskraft F_a aus Gleichung (2-62) zu:

$$F_a = F_T - (F_{WZ} + F_N) \quad (2-91)$$

Die spezifische Beschleunigungskraft f_a ergibt sich mit:

$$f_a \text{ [‰]} = f_T - (f_{WZ} + f_N) \quad (2-92)$$

Damit ergibt sich die momentane Beschleunigung a an der Stelle x aus Gleichung (2-92) und Gleichung (2-89) über das Δs -Schrittverfahren mit (Abbildung 36):

$$a = f_a \cdot \frac{g}{\rho} = \frac{g}{\rho} \cdot [f_T - (f_{WZ} + f_N)] = \frac{g}{\rho} \cdot [f_T - (f_{WZ} + I(x))] \quad (2-93)$$

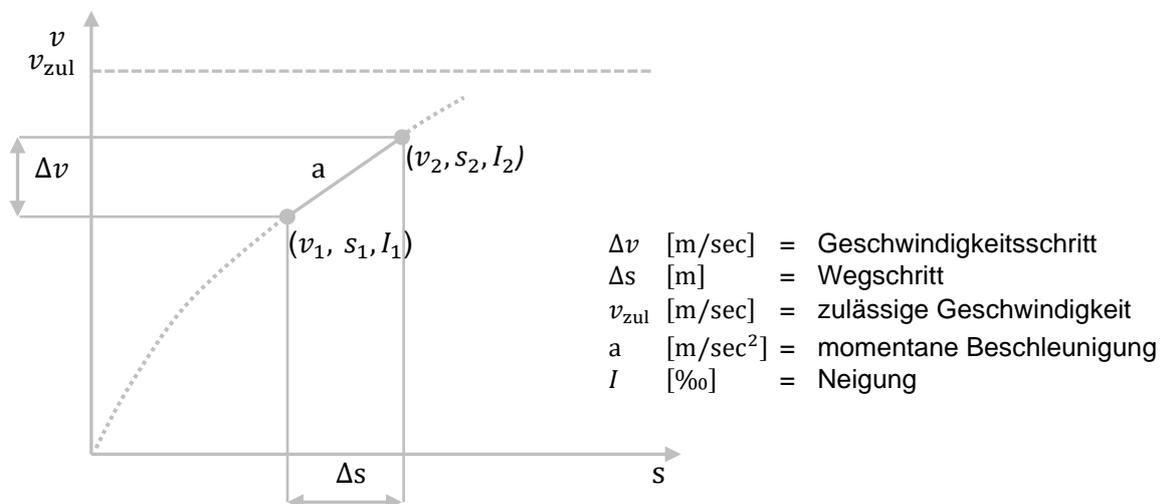


Abbildung 36: Berechnung der FSL beim Anfahren [84]

Gesamtfahrzeugwiderstand

Der Gesamtfahrzeugwiderstand F_{WZ} eines Zuges muss aus allen Teilwiderständen – für jeden Zug einzeln – berechnet werden. Da dies sehr aufwendig ist, wird in der Praxis zur Berechnung des Gesamtfahrzeugwiderstands F_{WZ} häufig die nachstehende empirische Formel verwendet ([84] und [138]):

$$F_{WZ}[N] = m \cdot g \cdot \left(c_0 + c_1 \cdot \frac{v}{v_{00}} + c_2 \cdot \left(\frac{v}{v_{00}} \right)^2 \right) \quad (2-94)$$

bzw. der spezifische Gesamtfahrzeugwiderstand f_{WZ} :

$$f_{WZ}[\text{‰}] = c_0 + c_1 \cdot \frac{v}{v_{00}} + c_2 \cdot \left(\frac{v}{v_{00}} \right)^2 \quad (2-95)$$

$$\begin{aligned} v_{00} \quad [\text{m/sec}] &= \text{Geschwindigkeitskonstante bezogen auf } 27,778 \text{ m/sec} = 100 \text{ km/h} \\ c_0, c_1, c_2 \quad [\text{‰}] &= \text{empirische Konstanten von } f_{WZ}^{52} \end{aligned}$$

Nach [50] wird der Fahrzeugwiderstands F_{WZ} eines Hochgeschwindigkeitszugs mit 100% angetriebenen Achsen – der als Triebwagenzug immer die gleiche gekuppelte Zugkonfiguration beibehält – wie folgt berechnet:

$$F_{WZ} = 11,4 \cdot m + (0,025 \cdot m + 21,89) \cdot v + 0,943 \cdot v^2 \quad (2-96)$$

2.3.3 Ruck

In der Fahrdynamik wird der Ruck c als einer der Komfortkriterien für den Fahrgast oder die zu transportierenden Güter betrachtet. Er beschreibt die Änderungsgeschwindigkeit Δv der Beschleunigung a .

Der Ruck c bestimmt sich durch die 2. Ableitung der Geschwindigkeit v nach der Zeit t bzw. der 1. Ableitung der Beschleunigung a nach der Zeit t wie folgt:

$$c = \frac{d^2v}{dt^2} = \frac{da}{dt} \quad (2-97)$$

$$\begin{aligned} c \quad [\text{m/sec}^3] &= \text{Ruck} \\ t \quad [\text{sec}] &= \text{Zeiteinheit für den Ruck} \end{aligned}$$

In [48] wird der Ruck c als eine Beurteilungsgröße für den Fahrgastkomfort festgelegt. Je kleiner das Zeitintervall für die Änderung der Beschleunigung a ist, desto größer ist die Auswirkung des Rucks c auf den Fahrgast.

Der Ruck c tritt in allen drei kartesischen Achsen einzeln auf, kann sich jedoch auch überlagern:

- c_x Ruck in x-Richtung
- c_y Ruck in y-Richtung
- c_z Ruck in z-Richtung

52 Der spezifische Gesamtfahrzeugwiderstand f_{WZ} ist die Summe aller Komponenten des Fahrzeugwiderstandes [138]. Da die Bestimmung des spezifischen Gesamtfahrzeugwiderstandes f_{WZ} komplex ist, werden für die Berechnung empirische Konstanten verwendet.

Ruck infolge der Seitenbeschleunigung in Gleisebene a_q

Im Eisenbahnwesen dürfte der Ruck c_y als Komfortminderung vorherrschend sein. Wenn ein Fahrzeug z.B. eine Gerade mit anschließendem Kreisbogen r befährt, ändert sich die Krümmung k am un stetigen Übergang plötzlich und damit auch die Seitenbeschleunigung in Gleisebene a_q .

Um dies näher zu betrachten Folgendes:

Aus Gleichung (2-13) ergibt sich die Seitenbeschleunigung in Gleisebene a_q :

$$a_q = \frac{u_f \cdot g}{s_k} \quad (2-98)$$

Mit $g = 9,81 \text{ m/sec}^2$ für die Erdanziehung und $s_k = 1.500 \text{ mm}$ für die Regel-/Normalspur berechnet sich die Seitenbeschleunigung in Gleisebene a_q :

$$a_q \cong \frac{u_f}{153} \quad (2-99)$$

D.h.

Die Seitenbeschleunigung in Gleisebene a_q und damit auch der Ruck c_y hängt vom Überhöhungsfehlbetrag u_f und dem Übergang ohne bzw. mit Übergangsbogen ab.

Ohne Übergangsbogen

Abbildung 37 zeigt den Verlauf für die wesentlichen Parameter ohne (links) bzw. mit (rechts) Überhöhung u , ohne Übergangsbogen, für den unvermittelten Krümmungswechsel:

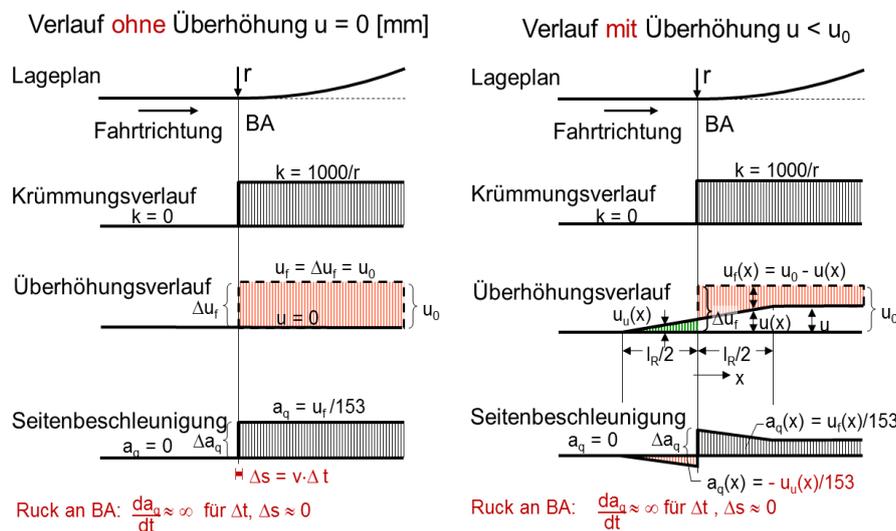


Abbildung 37: Vergleich der Verläufe des unvermittelten Krümmungswechsels (ohne Übergangsbogen) ohne (links) und mit (rechts) Überhöhung u [50]

- ohne Überhöhung u : der Überhöhungsfehlbetrag u_f und die Seitenbeschleunigung in Gleisebene a_q erreichen den Höchstwert von c_y am BA ruckartig, da Δt und $\Delta s \approx \lim 0$
- mit Überhöhung $u < u_0$: der Überhöhungsfehlbetrag u_f wächst langsam über die Rampenlänge l_R an; die negative Seitenbeschleunigung in Gleisebene a_q nimmt bis zum BA zu und zeigt durch den

zunehmenden Überhöhungsüberschuss u_u in der Geraden über $\frac{l_R}{2}$ zwei „Spitzen“ (negativ und positiv) mit dem Sprung Δa_q durch die Überhöhung u am BA. Im Sprung von Δa_q am BA ist Δt und $\Delta s \approx \lim 0$ und $\Delta c_y \approx \infty$

Aus *Abbildung 37* ist auch ersichtlich, dass beim Sprung Δa_q die Änderung der Zeit dt am BA wegen der kleinen Distanzänderung ds sehr klein ist. Daraus ergibt sich für den Ruck c_y am BA ohne Übergangsbogen:

$$c_y = \frac{da_q}{dt} \approx \infty \quad (2-100)$$

Mit Übergangsbogen

Um den Ruck c_y zu mildern, wird ein Übergangsbogen zwischen dem Kreisbogen r und der Geraden eingefügt, sodass sich die Seitenbeschleunigung in Gleisebene a_q über die Distanz des Übergangsbogens l_u und dem Zeitraum t , der zur Überwindung dieser Distanz benötigt wird (Zeit, in der der Zug den Übergangsbogen befährt), komfortadäquat ändert (*Abbildung 38*).

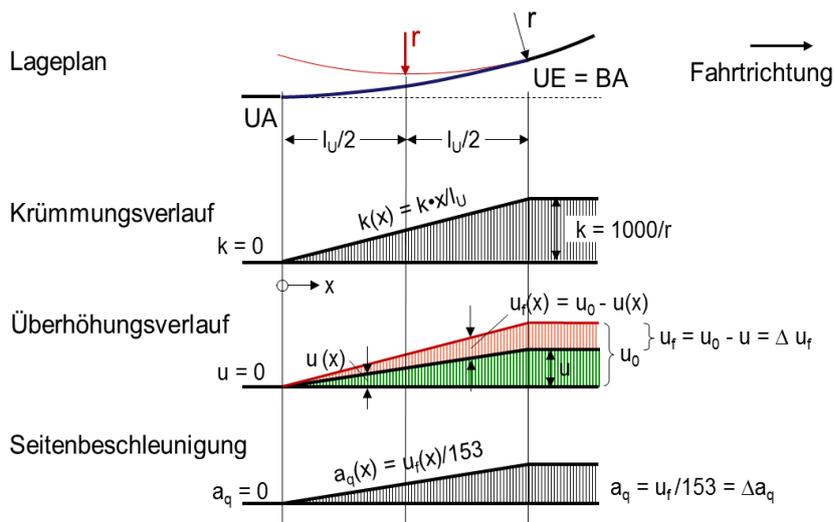


Abbildung 38: Verlauf des Krümmungswechsels mit Übergangsbogen [50]

Beim Krümmungswechsel mit Übergangsbogen ändert sich der Überhöhungsfehlbetrag u_f und damit die Seitenbeschleunigung in Gleisebene a_q kontinuierlich von $a_q = 0 \text{ m/sec}^2 (= UA)$ bis zum Maximalwert $\max a_q (UE = BA)$. Deshalb bleibt der Ruck c_y endlich und der Maximalwert des Rucks $\max c$ hängt vom Überhöhungsfehlbetrag u_f und der Übergangsbogenlänge l_u ab [50].

In dieser Arbeit wird daher der Ruck c_y für den Entwurf einer NBS Betrachtung berücksichtigt.

Ruck infolge der Längsbeschleunigung a_x und der vertikalen Beschleunigung a_z

Die Längsbeschleunigung a_x und die vertikale Beschleunigung a_z (Kapitel 2.2.2.2.4) auf den Fahrgast wird schwächer bewertet als die Seitenbeschleunigung in Fahrzeugebene a_y [48].

Die Längsbeschleunigung von Schienenfahrzeugen kann bis zu $a_x = 1,6 \text{ m/sec}^2$ betragen (z.B. Shinkansen [51]).

Solange noch keine komfortabhängig gesteuerte Änderungsbeschleunigung bzw. -verzögerung in Längsrichtung (a_x) möglich ist, sollte – z.B. im Personenverkehr ohne Fahrgastfixierung am Sitzplatz – eine Verzögerung von $a_{xb} = 0,8 \text{ m/sec}^2$ nicht überschreiten werden. Zwangs- und Schnellbremsungen erreichen Verzögerungen bis zu $a_{xb} = 1,5 \text{ m/sec}^2$.

Trotz maximaler Beschleunigung oder Verzögerung sollte in Längsrichtung kein komfortbeeinträchtigender Ruck c_x bei Betriebsbremsungen/-beschleunigungen entstehen. Nur bei Klotzbremsen entsteht kurz vor dem Halt ein – teilweise komfortüberschreitender – Längsruck c_x .

Ein Ruck c_z durch die Änderungsbeschleunigung Δa_z dürfte sich bei vorschriftengerechter Anwendung einer vertikalen Ausrundung beim Neigungsübergang innerhalb der Komfortgrenzen bewegen.

2.3.4 Energetische Betrachtung der Fahrt

Um sich auf einem Schienenfahrweg fortzubewegen, muss einem Zug Energie zugeführt werden. Neben der zugeführten elektrischen Energie müssen folgende Energiearten berücksichtigt werden ([49] und [138]):

- Potentialenergie E_{pot} (= gespeicherte Hubarbeit W_{pot}) besteht aus der Masse m eines Zuges und dem zu bewältigenden Höhenunterschied Δh

$$E_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot \Delta h \quad (2-101)$$

E_{pot} [Nm] = Potentialenergie

Δh [m] = Höhenunterschied

- kinetische Energie E_{kin} (= gespeicherte Beschleunigungsarbeit W_{kin}) setzt sich zusammen aus der Masse m eines Zuges und der Geschwindigkeit v

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m \cdot v^2 = \frac{1}{2} m \cdot a^2 \cdot t^2 = s \cdot m \cdot a \quad (2-102)$$

E_{kin} [Nm] = kinetische Energie

t [sec] = Zeiteinheit (hier Fahrzeit)

s [m] = Wegstrecke

Zur Energieeinsparung kann ein Zug mit der Potentialenergie E_{pot} aus dem Höhenunterschied Δh der Längsneigung I einen Gegenhang (Steigung) ohne Antrieb des Tfzs z.T. oder komplett

mit der kinetischen Energie E_{kin} bewältigen. Dies wird als Schwunghahrt (Umwandlung der gespeicherten Potentialenergie E_{pot} in kinetische Energie E_{kin}) bezeichnet (siehe auch *Tabelle 14*, wo auf NBS maximale Steigungslängen bei Überschreitung der EBO-Werte mit „*kein planmäßiges Halten und Anfahren*“ vorgegeben werden).

Die erreichbare Geschwindigkeit v bzw. die zu überwindende Höhe Δh (ohne Berücksichtigung der Widerstände) ermittelt HOHNECKER in [48]. Um jedoch die tatsächlich erreichbare Geschwindigkeit v am jeweiligen Ende einer Neigung (Talfahrt, Bergfahrt) zu ermitteln, muss der Neigungswiderstand F_N und der Fahrzeugwiderstand F_{WZ} bzw. der spezifische Neigungswiderstand f_N und der spezifische Fahrzeugwiderstände f_{WZ} berücksichtigt werden. Hierbei ist die Fahrtrichtung zu beachten:

Talfahrt

Wenn ein Zug ohne Zugkraft von der Spitze bis zum Fuß einer Neigung fährt, bewegt sich der Zug durch die Komponente der Gewichtskraft W_G (= Kraft entgegen der Steigungswiderstandskraft) in Richtung der Neigung und überwindet dabei den Fahrzeugwiderstand F_{WZ} . Daraus berechnet sich die Arbeit der Gewichtskraft W_G zu:

$$W_G = m \cdot g \cdot \tan \alpha \cdot s = m \cdot g \cdot l \cdot s = m \cdot g \cdot \Delta h = E_{\text{pot}} \quad (2-103)$$

$$\begin{aligned} W_G \text{ [Nm]} &= \text{Arbeit der Gewichtskraft} \\ \alpha \text{ [}^\circ\text{]} &= \text{Neigungswinkel} \\ s \text{ [m]} &= \text{Neigungslänge} \end{aligned}$$

Während dieses Vorgangs beschleunigt der Zug ausschließlich aus der Hangabtriebskraft (ohne Zugkraft F_T) von $v_{\text{Beginn}} = 0 \text{ m/sec}$ auf v_{Ende} . Aus dieser Geschwindigkeitsänderung Δv kann die Beschleunigung a wie folgt abgeleitet werden:

$$a = \frac{v_{\text{Ende}}^2 - 0}{2 \cdot s} = \frac{v_{\text{Ende}}^2}{2 \cdot s} \quad (2-104)$$

$$v_{\text{Ende}} \text{ [m/sec]} = \text{Geschwindigkeit am Neigungsende}$$

Damit berechnet sich die Beschleunigungsarbeit W_a – die E_{kin} entspricht – durch

$$W_a = m \cdot a \cdot s = m \cdot \frac{v^2}{2 \cdot s} \cdot s = \frac{1}{2} m \cdot v^2 = E_{\text{kin}} \quad (2-105)$$

Da die Geschwindigkeit des Zuges nur von der Erdbeschleunigung g beeinflusst wird, kann die Beschleunigung a daher aus der Erdbeschleunigung g berechnet werden

$$a = g \cdot \tan \alpha = g \cdot l = \frac{v^2}{2 \cdot s} \quad (2-106)$$

Gleichung (2-106) in Gleichung (2-105) mit $\Delta h = l \cdot s$ aus Gleichung (2-103) eingesetzt ergibt

$$m \cdot g \cdot \Delta h = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (2-107)$$

Daraus ergibt sich der Zusammenhang zwischen Potentialenergie E_{pot} und kinetischer Energie E_{kin} wie folgt:

$$E_{\text{pot}} = E_{\text{kin}} \quad (2-108)$$

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h} \quad (2-109)$$

$$\text{bzw.} \quad \Delta h = \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (2-110)$$

Bergfahrt

Wenn sich ein Zug ohne seine Zugkraft F_T vom Fuß einer Steigung mit ausreichend großer Geschwindigkeit v_{Beginn} bis zu der Spitze der Steigung mit $v_{\text{Ende}} = 0 \text{ m/sec}$ bewegt, muss der Zug mit abnehmender Geschwindigkeit gegen den Steigungswiderstand F_N anfahren. Da die Richtung des Steigungswiderstandes F_N der Fahrtrichtung des Zuges entgegengesetzt ist, berechnet sich die Arbeit des Steigungswiderstandes W_N mit:

$$W_N = m \cdot g \cdot \tan \alpha \cdot s = m \cdot g \cdot I \cdot s = m \cdot g \cdot \Delta h = E_{\text{pot}} \quad (2-111)$$

Aus der Geschwindigkeitsänderung Δv kann die Beschleunigung a wie folgt abgeleitet werden:

$$a = \frac{0 - v_{\text{Beginn}}^2}{2 \cdot s} = -\frac{v_{\text{Beginn}}^2}{2 \cdot s} \quad (2-112)$$

v_{Beginn} [m/sec] = Geschwindigkeit am Steigungsanfang

Damit berechnet sich die Beschleunigungsarbeit W_a – die E_{kin} entspricht – durch

$$W_a = m \cdot a \cdot s = m \cdot \left(-\frac{v^2}{2 \cdot s}\right) \cdot s = -\frac{1}{2} m \cdot v^2 = E_{\text{kin}} \quad (2-113)$$

Wie bei der Talfahrt wird die Geschwindigkeit des Zuges von der Erdbeschleunigung g – aber in der Gegenrichtung – beeinflusst. Daher kann die Beschleunigung a aus der negativen Erdbeschleunigung ($-g$) berechnet werden

$$a = -g \cdot \tan \alpha = -g \cdot I = -\frac{v^2}{2 \cdot s} \quad (2-114)$$

Gleichung (2-114) in Gleichung (2-113) mit $\Delta h = I \cdot s$ aus Gleichung (2-111) eingesetzt ergibt

$$-m \cdot g \cdot \Delta h = -\frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (2-115)$$

Somit ist auch bei der Bergfahrt

$$E_{\text{pot}} = E_{\text{kin}} \quad (2-116)$$

Da $f_N = I$ ist (siehe Kapitel 2.3.2.3.1), ergibt die Potentialenergie E_{pot} mit dem Neigungswiderstand F_N bzw. dem spezifischen Neigungswiderstand f_N

$$E_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot f_N \cdot s = F_N \cdot s \quad (2-117)$$

Daraus folgt, dass die Potentialenergie E_{pot} vom Neigungswiderstand F_N abhängt.

Bei einer Zugfahrt tritt immer der Fahrzeugwiderstand F_{WZ} auf. Sowohl bei der Talfahrt als auch bei der Bergfahrt tritt ein Widerstand aus der Summe der Fahrzeug- F_{WZ} und Neigungswiderstände F_N auf. Damit muss in Erweiterung der Gleichungen (2-108) bis (2-110) der Neigungswiderstand F_N und der Fahrzeugwiderstand F_{WZ} bzw. der spezifische Neigungswiderstand f_N und der spezifische Fahrzeugwiderstand f_{WZ} betrachtet werden, sodass durch die Schwungfahrt sowohl die erreichbare Geschwindigkeit v als auch die überwindbare Höhe Δh ermittelt werden kann:

$$(F_{WZ} + F_N) \cdot s = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (2-118)$$

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h \cdot \left(\frac{f_{WZ}}{f_N} + 1 \right)} \quad (2-119)$$

$$\text{bzw.} \quad \Delta h = \frac{v^2 \cdot f_N}{2 \cdot g \cdot (f_{WZ} + f_N)} \quad (2-120)$$

2.4 Grundlagen des Eisenbahnbetriebs

2.4.1 Begriffe und Definitionen

Trasse

Nach DB AG-Richtlinie 402 [97] ist eine Trasse (auch Fahrplantrasse)

„... die geplante zeitliche und räumliche Belegung der Schieneninfrastruktur für eine Zugfahrt durchgehend auf der Freien Strecke und in den Bahnhöfen.“

Es ist ersichtlich, dass die zu befahrende Trasse eine 4-dimensionale Form von Raum und Zeit darstellt.

Eine Trasse wird über die Länge in Abschnitte (= Blöcke) unterteilt. Für diese werden die benötigten Sperrzeiten (= Belegzeiten) bestimmt.

Block

Gleisabschnitt zwischen zwei aufeinanderfolgenden Hauptsignalen (Hp) [98].

Sperrzeit

Für die Dimensionierung der Eisenbahninfrastruktur ist wichtig zu wissen, wie lange ein Block von einer Zugfahrt belegt/für sie gesperrt wird. Das Streckennetz ist hierfür in Blöcke unterteilt, die jeweils nur von einem Zug/Fahrzeug belegt sein dürfen [84]. Dadurch ergibt sich beim Durchfahren eines Blocks eine Sperrzeit, in welcher der Block nicht für andere Zugfahrten zur Verfügung steht.

Die Sperrzeit eines Blocks für einen Zug (Abbildung 39) besteht aus folgenden Teilsperzeiten [98] und ist damit länger als die reine Fahrzeit im Block.

Abbildung 39 zeigt die Elemente der Sperrzeit eines Zuges im Sperrzeitenkasten.

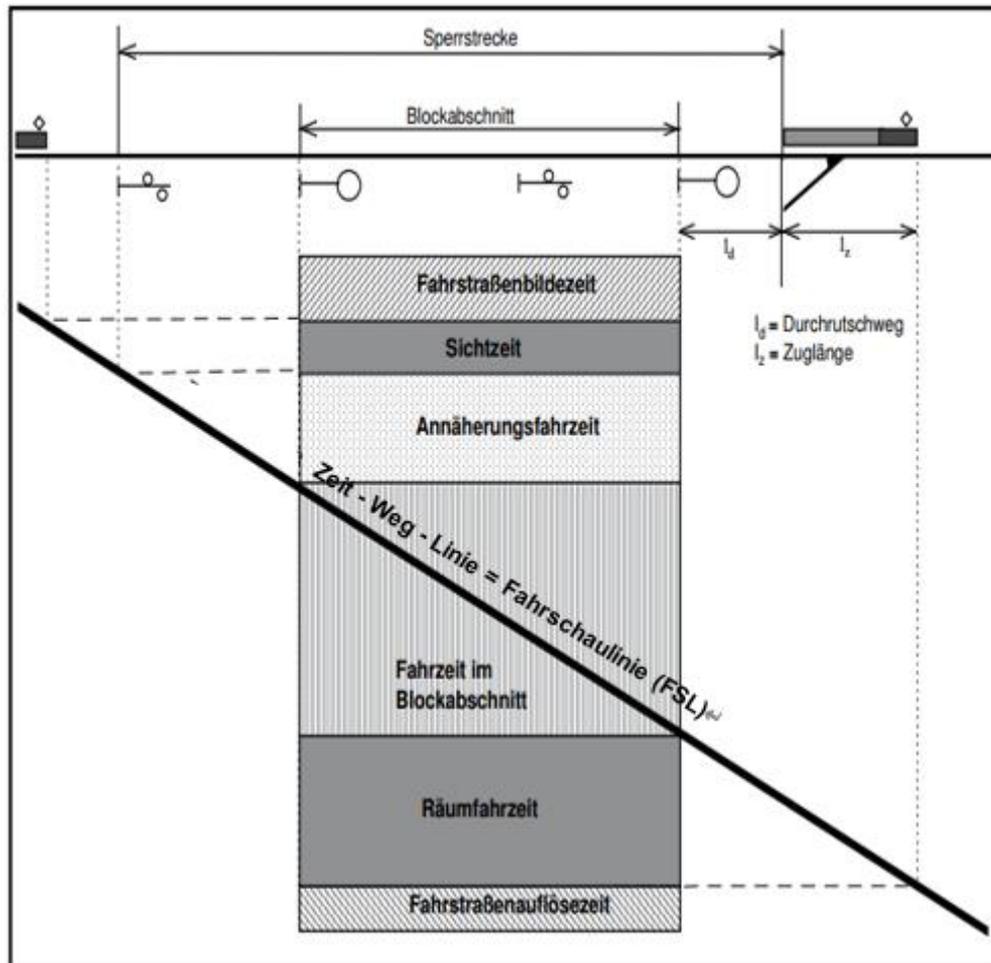


Abbildung 39: Sperrzeit eines Blocks im H/V-System [98]

- Fahrstraßenbildezeit** ist die Zeit, die den technischen Vorgang zwischen dem Beginn des Stellens des Fahrweges und dem Erfolgen des Fahrbefehls umfasst (Stellwerktyp abhängig)
- Signalsichtzeit** ist die Zeit, die der Triebfahrzeugführer (Tf) benötigt, um den Signalbegriff am Vorsignal (Vr) sicher zu identifizieren (Erfahrungswert: ca. 0,2 min)
- Annäherungsfahrzeit** ist die Zeit, die der Zug benötigt, um die Strecke zwischen Vr und Hp zurückzulegen
- Fahrzeit im Block** ist die Zeit, die der Zug benötigt, um die Strecke zwischen dem Hp, das den Beginn des zu durchfahrenden Blocks bestimmt, und dem Hp des nächsten Blocks zurückzulegen
- Räumfahrzeit** beginnt, wenn ein Zug mit seiner Spitze das den nächsten Block schützende Hp passiert und endet, wenn das Zugende die zugehörige Zugschlussstelle des den nächsten Block schützende Hp passiert hat

Fahrstraßenauflösezeit nachdem ein Zug den Block verlassen hat, muss im Stellwerk die zurückliegende Fahrstraße technisch entschert werden bevor eine neue Fahrstraße eingerichtet werden kann. Die hierbei vergehende Zeit ist die Fahrstraßenauflösezeit (Stellwerktyp abhängig)

Aufgrund der verschiedenen Zugbeeinflussungssysteme gibt es Unterschiede in der Sperrzeitberechnung. So z.B. für konventionelle Signalsysteme (z.B. H/V-Signalsystem) und neueren Signalsystemen⁵³ wie Linienzugbeeinflussung (LZB) oder European Train Control System ETCS Level 2 und 3.

Tabelle 16 zeigt den Vergleich der Sperrzeitelemente bei verschiedenen Zugbeeinflussungssystemen [70]

Tabelle 16: Vergleich der Sperrzeit bei verschiedenen Signalsystemen ([70], S. 36)

Elemente der Sperrzeit	H/V Signal und ETCS Level 1	ETCS Level 2 und LZB
Fahrstraßenbildezeit	+	+
Signalsichtzeit	+	- (vernachlässigbar klein)
Annäherungsfahrzeit	+	geschwindigkeitsabhängig
Fahrzeit im Block	+	+
Räumfahrzeit	+	+
Fahrstraßenauflösezeit	+	+

Aus Tabelle 16 ist ersichtlich, dass die Signalsichtzeit bei der LZB und im ETCS Level 2 durch die erforderliche Führerstandssignalisierung (FSS) sehr klein ist und damit vernachlässigt werden kann. Wenn keine FSS vorhanden ist, ist die Höchstgeschwindigkeit auf $V_{\max} = 160 \text{ km/h}$ begrenzt. Die Annäherungsfahrzeit hängt von der Geschwindigkeit v und dem Bremsweg des Zuges ab.

Mindestzugfolgezeit

Die Mindestzugfolgezeit ist nach DB AG-Richtlinie 405 [98]

„... die Zeit, in der bei technisch bedingter dichtest möglicher Zugfolge ein nachfolgender Zug einem vorausfahrenden auf dem gemeinsam benutzten Fahrweg behinderungsfrei folgen kann.“

Abhängig von der Geschwindigkeit v eines Zuges wird die Zugfolge in vier Fälle unterteilt:

⁵³ Neuere Signalsysteme siehe Kapitel 4.4.1

- langsamer Zug → folgt → langsamem Zug
- langsamer Zug → folgt → schnellerem Zug
- schneller Zug → folgt → schnellem Zug
- schneller Zug → folgt → langsamem Zug

Die Mindestzugfolgezeit wird i.d.R. für einen Abschnitt zwischen zwei Überholungs- oder Knotenbahnhöfen ermittelt [98].

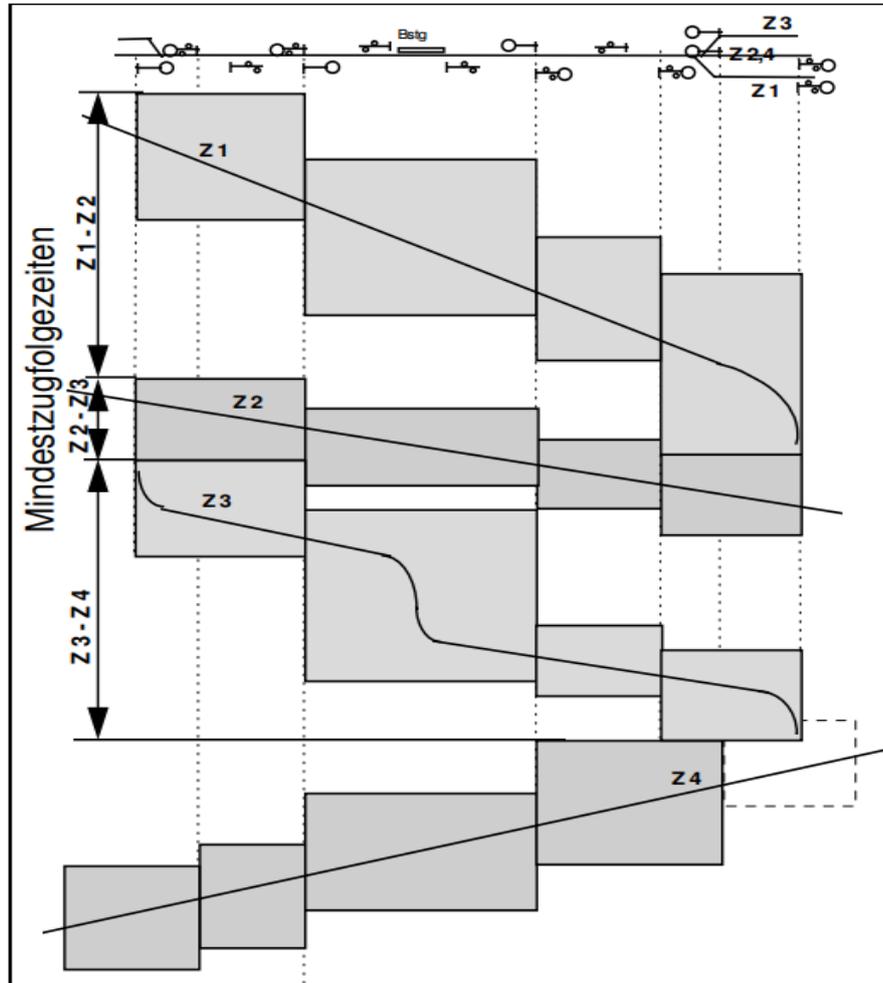


Abbildung 40: Mindestzugfolgezeiten auf einer 1-gleisigen Strecke bzw. in gleicher Richtung benutztem gemeinsamen Fahrweg [98]

Abbildung 40 zeigt die Mindestzugfolgezeiten verschiedener Zugfolgefälle auf einer 1-gleisigen Strecke bzw. in gleicher Richtung benutzter gemeinsamen Fahrweg:

- große Mindestzugfolgezeit: schneller Zug (Z_2) folgt langsamem Zug (Z_1)
- gleichbleibende Mindestzugfolgezeit: gleich schnelle/langsame Züge folgen sich
- kleine Mindestzugfolgezeit: langsamer Zug (Z_3) folgt schnellem Zug (Z_2)
- Bei 1-gleisigen Strecken wird die Mindestzugfolgezeit durch die Reihenfolge Richtung und Gegenrichtung erheblich beeinflusst (z.B. Mindestzugfolgezeit von Z_3 und Z_4)

Betriebsprogramm

Zur Ermittlung eines Betriebsprogramms für eine Strecke bzw. einen Knoten werden beim klassischen Vorgehen zunächst über alle Verkehrssysteme hinweg

- die ermittelten/prognostizierten Personen-/Güterströme auf die einzelnen Verkehrssysteme umgelegt

daraus

- die Anteile jedes Verkehrsträgers ermittelt
 - speziell für die „Schiene“: ein Betriebsprogramm erstellt

Das Betriebsprogramm fasst die Leistungsanforderungen für eine bestimmte Zeiteinheit zusammen, die nach Menge und Struktur differenziert, aber nicht fahrplanmäßig zeitlich festgelegt ist. Nach DB Richtlinie 405 [98] enthält es Angaben über

- die im Fahrplan zu erwartenden Zuggattungen
- die Anzahl der verkehrenden Linien
- die Fahrplanart
 - bedarfsorientiert
 - angebotsorientiert
 - Fahrplansysteme ohne Takt
 - Taktfahrplansysteme
- die Haltekonzepte je Zuggattung
 - deren Verkehrszeiträume

sowie

- weitere Faktoren je nach Aufgabenstellung

Das Betriebsprogramm für eine Strecke oder einen Knoten beschreibt somit – je nach Intensität –

- die Struktur des Fahrplans
 - ohne die beteiligten Züge dabei bereits in ihrer zeitlichen Lage minutengenau festzulegen
 - in ihrer räumlichen Lage gleisgenau festzulegen

Fahrplan

Eine wichtige Aufgabe der Fahrplanerstellung ist es die Trassenwünsche verschiedener Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU)⁵⁴ in realisierbare Trassenprogramme umzusetzen und zu koordinieren [84]. Richtlinie 402 der DB AG [97] führt dazu aus:

„Der Fahrplan eines Zuges ist der geplante zeitliche Ablauf einer Zugfahrt auf ihrem Laufweg. Der Fahrplan eines Zuges umfaßt mindestens

⁵⁴ Das EVU erbringt Verkehrsleistungen auf der Schiene und benutzt bei der Durchführung ihrer Verkehre die Eisenbahninfrastruktur eines Eisenbahninfrastrukturunternehmens (EIU). Das EVU meldet die gewünschten Trassen beim EIU an. Das EIU ordnet die angemeldeten Trassen, um einen fahrbaren Fahrplan zu erstellen.

- die Zugcharakteristik (Angaben zum Buchfahrplan⁵⁵kopf),
- den Laufweg mit den örtlich zugelassenen Geschwindigkeiten,
- Verkehrstagerregelung,
- Fahrplanzeiten,
- Zugfolgeregulungen.“

ITF

Der ITF gehört zu den angebotsorientierten Taktfahrplansystemen (siehe „Betriebsprogramm“). D.h.:

Wenn eine Zuggattung in festen Zeitintervallen auf einer Linie/Strecke verkehrt, wird dieser Fahrplan als Taktfahrplan bezeichnet.

Um die Transporteffizienz eines Verkehrsnetzes zu verbessern, ist es bei der Koordination notwendig, die verschiedenen Zuggattungen/Verkehrsträger systematisch und periodisch zu verknüpfen.

Ein Fahrplan wird als ITF bezeichnet, wenn dort

- der Öffentliche Verkehr (ÖV) in festen Zeitintervallen verkehrt (Taktfahrplan)
- der ÖV systematisch und periodisch verknüpft ist
- die passendsten Verbindungen zwischen und in den Knoten für den ÖV hergestellt werden
- die ÖV-Umsteigebeziehungen in den Knoten gewährleistet sind

Beim ITF ist zu unterscheiden um welchen ITF-Typ es sich dabei handelt:

- **Integraler Taktfahrplan:** der gesamte ÖV wird miteinander systematisch und periodisch verknüpft
- **Integrierter Taktfahrplan:** nur ein Verkehrsträger des ÖV wird untereinander systematisch und periodisch verknüpft

Diese Arbeit konzentriert sich auf den „Integrierten Taktfahrplan“ mit dem Verkehrsträger „Schiene“; hier im Speziellen der Vollbahnsysteme. Dort kommen i.A. hochrangige Züge (z.B. Fernzüge) nahe vor der Symmetriezeit an und fahren spiegelgleich zu ihrer Ankunft nach der Symmetriezeit ab. Da im Gegensatz zu allen anderen Fahrplansystemen (Bedarfs-, Taktfahrplan) beim ITF das Kriterium der Umsteigebeziehungen gewährleistet sein muss, kommen die niederrangigen Züge (z.B. Regionalzüge) als Zubringer vor den hochrangigen Zügen am Knoten an und fahren im spiegelgleichen Abstand der Symmetriezeit zu ihrer Ankunft als Abbringer nach den hochrangigen Zügen ab (*Abbildung 41*).

⁵⁵ Der Buchfahrplan enthält für jeden Streckenabschnitt zu beachtende Informationen und Hinweise (z.B. Geschwindigkeit, Ankunfts-/Abfahrtszeiten, Signalstandorte, Bremsstellung)

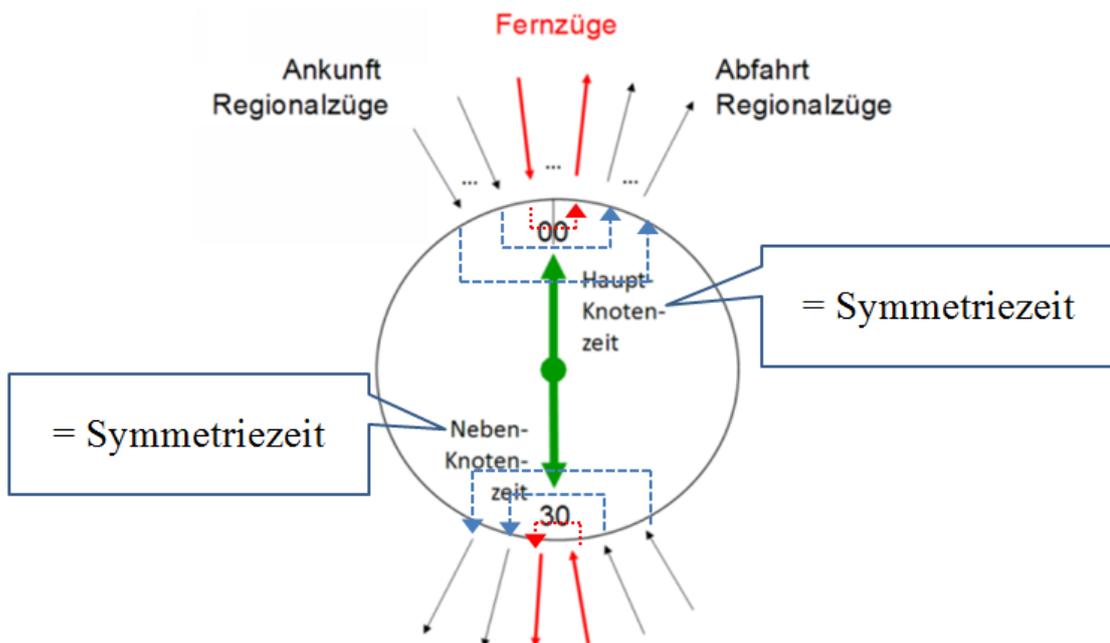


Abbildung 41: Darstellung der Zugankunft/-abfahrt/-anschlußsystematik im ITF ([70], S. 14)

Ziel des ITF ist es, die Reisezeit für jede Relation im gesamten Netzwerk zu optimieren – möglichst zu verkürzen [3]. Dazu muss das Kriterium – passendste Verbindung in den Knoten – das Umsteigen im Rendezvousverfahren am gleichen Bahnsteig über die gegenüberliegende Bahnsteigkante im Richtungsbetrieb ermöglichen (Abbildung 42).

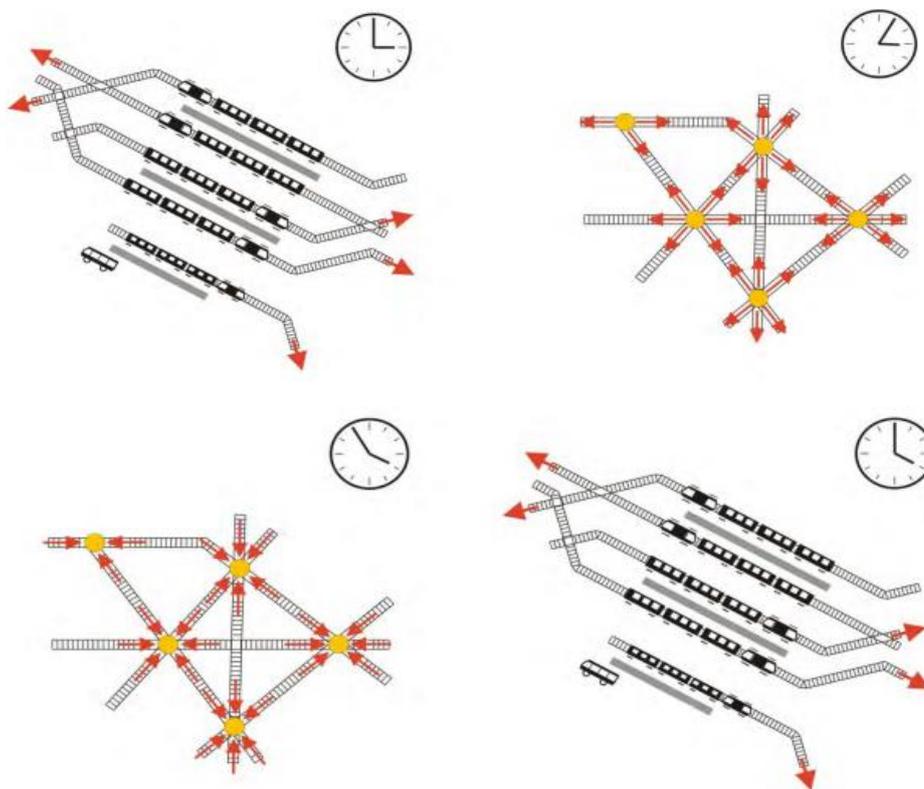


Abbildung 42: ITF-Grundlagen ([68], S. 2)

Abbildung 42 zeigt hierfür das Prinzip des ITF:

- Alle Züge kommen im Taktknoten vor der Symmetriezeit an – hier ist die Symmetriezeit beispielhaft die volle Stunde; jede weitere Unterteilung als Symmetriezeit innerhalb einer Stunde ist möglich.
- Nach der Halt- und Umsteigezeit fahren die Züge spiegelgleich zu ihrer Ankunft nach der Symmetriezeit ab und kommen – wie im Beispiel dargestellt – kurz vor der nächsten vollen Stunde am nächsten Symmetriehalt an, um dort ebenfalls ein gewährleistetes unmittelbares Umsteigen zu ermöglichen.

Um die optimalen Voraussetzungen zwischen den Knoten zu erzielen, müssen die Infrastruktur und die Fahrzeuge als weiteres Kriterium folgende Anforderung erfüllen:

- die Fahrzeit zwischen den Knoten muss das Taktintervall plus der gewährleisteten Umsteigezeit oder von diesem ein Vielfaches sein

Betriebliche, fahrzeug- und fahrwegtechnische Möglichkeiten, um die optimale Fahrzeit zwischen den Knoten zu erreichen, sind z.B.:

- Fahrzeitverlängerung durch
 - planmäßige Wartezeit
 - bedarfsorientierte Geschwindigkeit
- Fahrzeitverkürzung durch
 - komfortabhängige Maximierung der Beschleunigungen
 - Neige-Zug-Technik
 - Neu-/Um-/Ausbaustrecken/Knotenausbau

Leistungsfähigkeit/Kapazität

Um die benötigte Infrastruktur für einen Fahrplan oder ein Betriebsprogramm ermitteln zu können, stellen sich folgende Fragen:

- Wie viele Trassen (Zugfahrten) können auf einer bestimmten Infrastruktur innerhalb einer definierten Zeitspanne angeboten werden?

bzw.

- Welche Infrastruktur wird für eine definierte Anzahl von Trassen in dieser Zeitspanne benötigt?

Hierzu muss die Kapazität einer Strecke festgestellt werden.

Der Begriff der Leistungsfähigkeit wird in [98] als die theoretisch maximal mögliche Anzahl von Zugfahrten in einer bestimmten Zeiteinheit definiert. *Abbildung 43* zeigt die Arten der Leistungsfähigkeit.

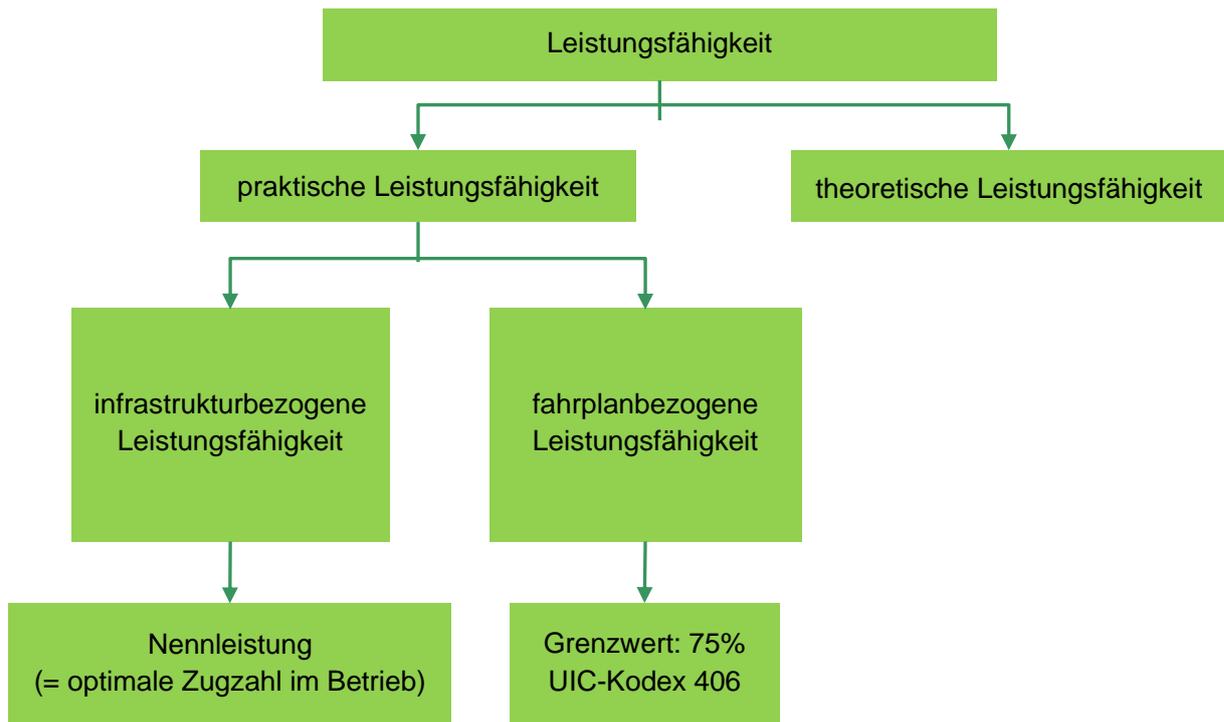


Abbildung 43: Arten der Leistungsfähigkeit [49]

Ohne Betrachtung der betrieblichen Qualität wird die Leistungsfähigkeit als theoretische Leistungsfähigkeit bezeichnet [98].

Die Richtlinie 405 der DB AG [98] inkludiert zur Leistungsfähigkeit das Qualitätsniveau in den Kapazitätsbegriff. Als Kapazität (Schienen- oder Fahrwegkapazität) wird also die Leistungsfähigkeit inkl. der Betriebsqualität bezeichnet [122].

Als Kapazität eines Abschnittes des Eisenbahnnetzes wird in der Literatur i.d.R. die Anzahl an Zügen definiert, die in einem spezifizierten Zeitfenster (z.B. 24 h) bei einer festgelegten Qualität (z.B. in Bezug auf außerplanmäßige Wartezeiten, Beförderungszeiten, Warteschlangenlänge) über den Streckenabschnitt verkehren kann ([11], [65] und [112]). Dem ist stets entweder ein Betriebsprogramm oder ein spezifischer Fahrplan – beim „*Deutschland-Takt*“ ein zukunftsfähiger ITF inkl. der geforderten Kriterien (z.B. Umsteigemöglichkeit, optimalste Verbindung zwischen und in den Knoten etc.) – zugrunde gelegt.

Nach UIC-Kodex 406 [123] ist die „Fahrwegkapazität“ folgendermaßen definiert:

„Unter der Kapazität der Eisenbahninfrastruktur versteht man

- die Gesamtzahl von möglichen Zugtrassen in einem definierten zeitlichen Rahmen unter Berücksichtigung der derzeitigen Trassenmischung (Anm.: = Betriebsprogramm) bzw. bekannter Entwicklungen und der eigenen Hypothese der Infrastrukturbetreiber,*
- in Knotenpunkten, auf einzelnen Strecken oder einem Teil des Netzes,*
- mit marktorientierter Qualität.“*

Die Kapazität setzt sich somit aus zwei Aspekten zusammen:

- Leistungsfähigkeit
- und
- Betriebsqualität

Beide werden in der DB-Richtlinie 405 definiert [98]:

„Die Leistungsfähigkeit ist die in einem Netzelement (Teilnetz, Streckenabschnitt, Bahnhof, Fahrstraßenknoten, Gleisgruppe)

- durch die Organisation des Zugbetriebes [...]
- auf dessen betrieblicher Infrastruktur

verarbeitete bzw. verarbeitbare Anzahl von Zug- und Rangierbewegungen in einem bestimmten Betrachtungszeitraum.

Die Qualität des Betriebs wird an den jeweiligen Anforderungen des Marktes (z.B. Pünktlichkeit, Anschlußsicherheit, Beförderungsgeschwindigkeit) gemessen und setzt sich daher aus mehreren Aspekten zusammen:

- der Eignung, Trassenprogramme mit marktfähigen zeitlichen Lagen und Beförderungszeiten anbieten zu können,
- der Einhaltung von vereinbarten Beförderungszeiten und Anschlußbindungen bei der Durchführung des Betriebs,
- der Fähigkeit zum Abbau von Verspätungen in den Netzelementen.“

Nach [98] fokussieren eisenbahnbetriebswissenschaftliche Untersuchungen (EBWU) auf die Leistungsbereiche.

Den Zusammenhang zwischen Infrastrukturauslastung und Betriebsqualität zeigt *Abbildung 44*.

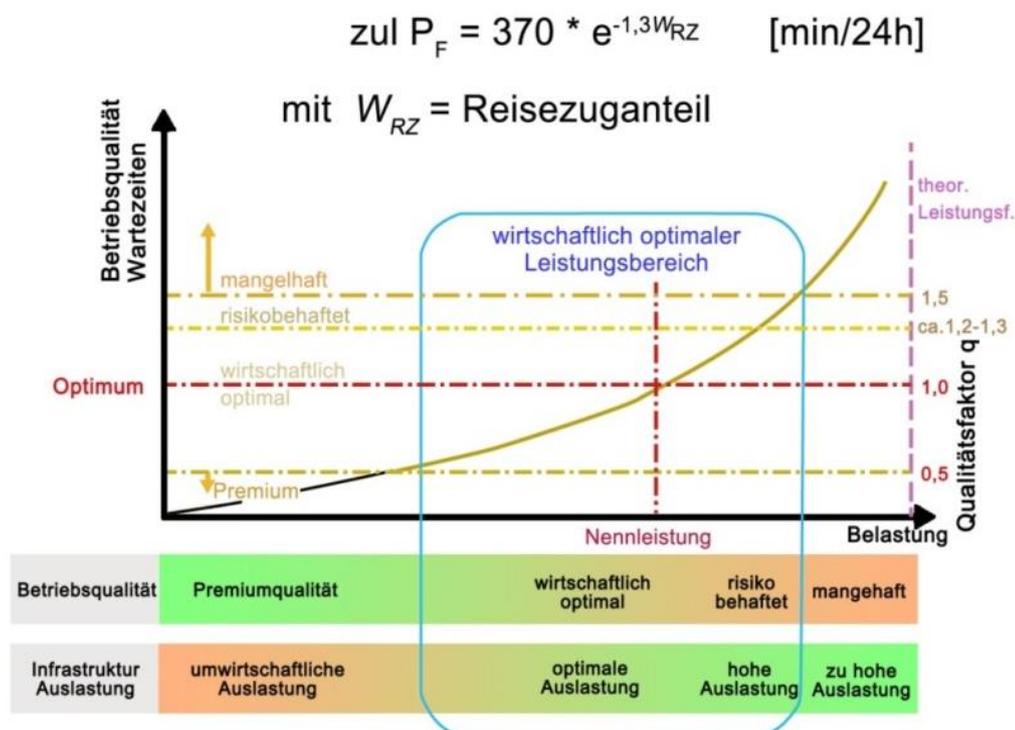


Abbildung 44: Darstellung des Zusammenhangs Infrastrukturauslastung und Betriebsqualität [98]

Aus *Abbildung 44* ist ersichtlich, dass die maximale Qualität und die maximale Leistung nicht gleichzeitig erreicht werden kann.

Abbildung 44 zeigt jedoch auch, dass die Bewertung „wirtschaftlich optimaler Leistungsbereich“ sich hauptsächlich auf die beiden folgenden Aspekte konzentriert:

- Betriebsqualität
- Infrastrukturauslastung

Um sicherzustellen, dass sich die Betriebsqualität und die Infrastrukturauslastung für zu planende bzw. Aus-/Umbaustrecken im optimalen Bereich befinden, muss der Qualitätsfaktor q im Bereich zwischen $q = 0,5$ und $q < 0,8$ – also nicht den Bereich „risikobehaftet“ und „hohe Auslastung“ erreichend – liegen. Diesem entspricht auch die Nennleistung gegen $q = 0,8$ der DB-Richtlinie 405 [98], den die Definition der „Planungsziele für Neu-, Aus- und Umbauten geringfügig überschreitet“ [98]. D.h.:

Für die genannten „Planungsziele“ muss die Nennleistung $q < 0,8$ sein!

2.4.2 Konventionelle Verfahren zur Infrastrukturermittlung

Gemäß DB Richtlinie 405 [98] können bei der Bestimmung der Kapazität zwei grundlegende Arten von Aufgaben unterschieden werden [140]:

- Aufgabentyp 1: Fahrplan- und Betriebstechnologieforschung
D.h.:
Überprüfung der Machbarkeit der Ausführung von Betriebsprogrammen auf einer bestimmten Infrastruktur
- Aufgabentyp 2: Bemessungsaufgaben der betrieblichen Infrastruktur
D.h.:
Die Größe der Dimensionierung wird anhand des geplanten oder vorhergesagten Betriebsprogramms bestimmt ([84] und [140]).

Wie *Abbildung 45* zeigt, werden die Aufgaben iterativ verarbeitet. Hierbei wird entweder das Betriebsprogramm oder die gegebene Infrastruktur so verändert, bis die erforderliche Leistung und Qualität erreicht ist. Das bedeutet:

Die notwendige Infrastruktur aus den Leistungsanforderungen – unabhängig von einem Fahrplan – wird über Streckenstandards und analytische Modelle ermittelt.

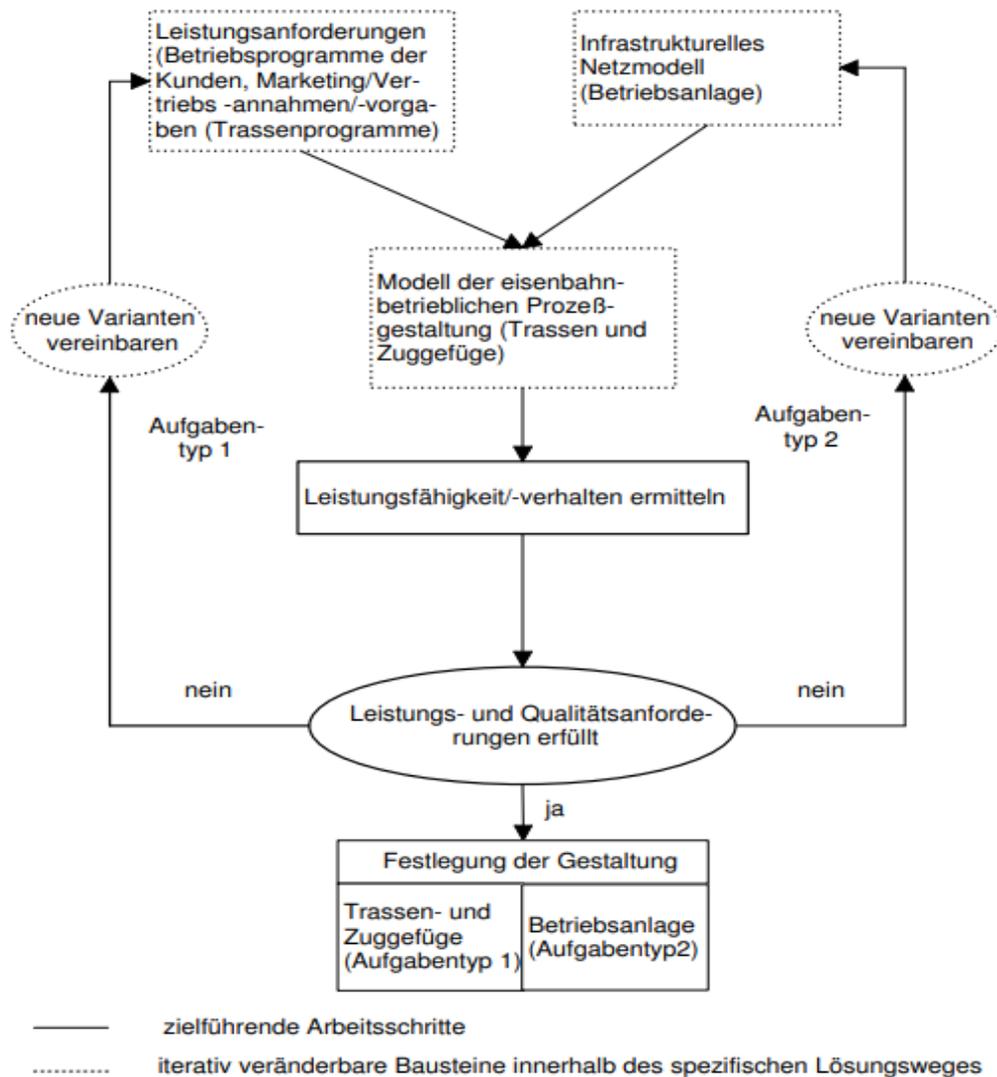


Abbildung 45: Lösungsweg für Untersuchungen zur Fahrwegkapazität nach DB AG-Richtlinie 405 ([140], S. 70)

Um die Leistung, Betriebsqualität und Kapazität der Eisenbahninfrastruktur i.V.m. einem Betriebsprogramm oder Fahrplan zu bewerten, wurden verschiedene Verfahren entwickelt. Diese Verfahren werden in vier Gruppen klassifiziert [34]:

- Statistisch-deterministische Verfahren
- Analytische Verfahren
- Konstruktive Verfahren
- Simulation

Statistisch-deterministische Verfahren

Statistisch-deterministische Verfahren werden hauptsächlich für die Datenerfassung und -auswertung verwendet. D.h.:

- Der tatsächliche Betriebsprozess des aktuellen und vergangenen Fahrplans kann analysiert werden.
- Obwohl historische Datenstatistiken verwendet werden können um zukünftige Betriebsformen zu prognostizieren, ist es nicht möglich zukünftige betriebliche Änderungen direkt zu erhalten.
- Es ist auch unmöglich die maximale Kapazität aus dem erforderlichen Qualitätsniveau zu bestimmen.

Daher können mit dieser Methode nur weniger qualifizierte und quantifizierbare Vorhersagen getroffen werden [34].

Analytische Verfahren

Die analytischen Verfahren sind stochastische Verfahren [61] aus gegebenen Werten zur Beschreibung von Infrastruktur und Betriebsprogramm, um Aussagen über die Betriebsqualität zu erhalten.

In einem einfacheren Modell werden die Parameter berechnet, welche die Systemauslastung beschreiben (z.B. den Belegungsgrad).

Empirische Methoden werden verwendet, um Aussagen über die erwartete Betriebsqualität zu treffen [84].

Anspruchsvollere analytische Verfahren basieren auf bedienungstheoretischen Ansätzen (z.B. der Warteschlangentheorie). Die in dem betrachteten Element vorhandenen Züge werden als bedienungstheoretischer Förderstrom und die Elemente der Infrastruktur (Teilstrecken, FK) als Bedienungskanäle aufgefasst [90]. Die Infrastruktur oder ein Teil von ihr, wird als Bedienstelle betrachtet, an der die Züge in unregelmäßigen Abständen eintreffen. Dabei kann es – bedingt durch das zufällige Eintreffen und den unterschiedlich langen Bedienzeiten für verschiedene Modellzüge – vor der Bedienstelle zu Warteschlangen kommen. Dadurch entstehen Wartezeiten, die als Qualitätskriterium zur Bewertung der Infrastruktur dienen [35].

Die Eigenschaften der analytischen Verfahren bestehen darin, dass sie nur auf einem Betriebsprogramm – keinem Fahrplan – basieren. Dies macht sie für eine langfristige konventionelle Planung zwar geeignet, aber nicht für einen zukunftsfähigen ITF.

Generell können die Elemente eines Fahrweges (Strecken, GG und FK) nur einzeln analysiert werden.

Bei der analytischen Untersuchung von Strecken kann die Strecke als 1-kanaliges Bedienungssystem betrachtet werden. Die Mindestzugfolgezeiten werden für die einzelnen Abschnitte

ermittelt. Die erwarteten Wartezeiten können mit Hilfe der STRELE-Formel⁵⁶ durch statistisch ermittelte Verspätungswerte berechnet werden ([112] und [131]).

Nach [84] werden zur Untersuchung von Fahrstraßenknoten diese häufig in sogenannte Teilfahrstraßenknoten (TFK) unterteilt, da Fahrstraßenknoten bei den Analysemethoden nicht mit ausreichender Genauigkeit betrachtet werden können. Die Mindestzugfolgezeiten und die Wartezeiten werden für jeden TFK berechnet. Durch Kombinieren der einzelnen Ergebnisse können Aussagen über die Leistungsfähigkeit des Knotens getroffen werden ([59] und [107]).

Mit den ermittelten Wartezeiten lässt sich nun für die einzelnen Infrastrukturelemente angeben, wie stark sie belastet sind. Überlastete und nicht benötigte Fahrwegelemente führen im nächsten Iterationsschritt zu entsprechenden Änderungen der zugrunde gelegten Infrastruktur. Der Ablauf des Verfahrens ist in *Abbildung 46* dargestellt.

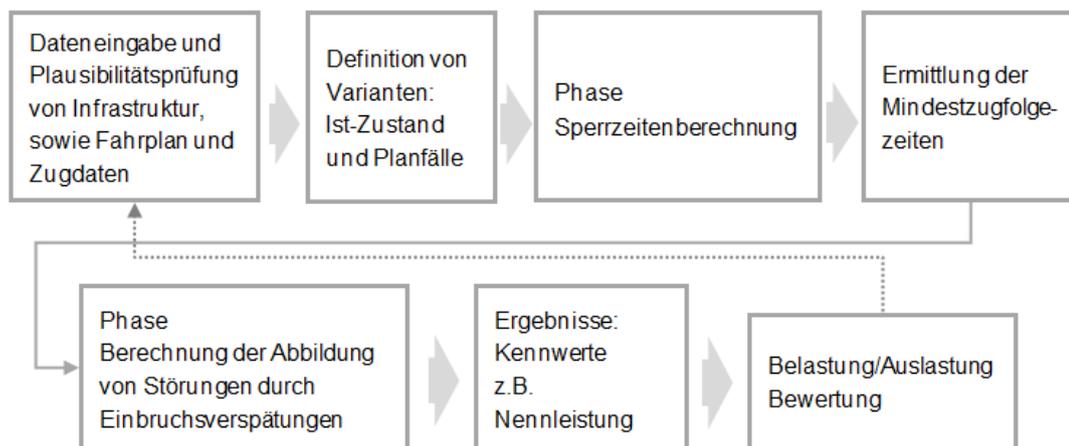


Abbildung 46: Arbeitsschritte der analytischen Verfahren ([140], S. 34)

Die analytischen Verfahren unterteilen sich weiter in

- theoretische Verfahren
und
- parametrische Verfahren

Theoretische Verfahren betrachten nur die Infrastruktur, ohne ein Betriebsprogramm zu Grunde zu legen. Sie sind daher auf sehr grundlegende Aussagen beschränkt und schlecht an die konkrete Situation vor Ort angepasst.

Parametrische Verfahren sind weit verbreitet. Sie legen ein Betriebsprogramm zu Grunde, bei dem die auftretenden Fahrzeugarten, Fahrwege und Haltekonzepte definiert und ihre mengenmäßigen Verhältnisse zueinander bestimmt sind [67].

⁵⁶ STRELE (Streckenleistungsfähigkeit) ist ein Computerprogramm zur Berechnung der Leistungsfähigkeit von Eisenbahnstrecken, welches die erwartete Wartezeit im Eisenbahnbetrieb prognostiziert. Das Programm wurde von W. SCHWANHÄÜßER anhand der Richtlinie 405 der Deutschen Bahn entwickelt.

Konstruktive Verfahren

Der Zweck der konstruktiven Verfahren besteht hauptsächlich darin, einen Fahrplan zu konstruieren. Diese Methode konnte bereits vor Einführung der elektronischen Datenverarbeitung (EDV) manuell ausgeführt werden [122]. Sperrzeitreppen und Zeitverbrauch werden mit Hilfe eines Bildfahrplans festgestellt.

Obwohl sie keine modellbasierten Wartezeitberechnungen enthalten, können konstruktive Verfahren, wie z.B. die Fahrplankonstruktion, spezifische Informationen über die Infrastruktur oder Fahrplanvarianten liefern, die jedoch nur für bestimmte Annahmen oder Spezifikationen gültig sind [34]. Voraussetzungen für die Anwendung sind

- auf infrastruktureller Seite
 - mindestens das Vorliegen von Informationen über die Zuglaufstrecken und ihre Lage zueinander, Verknüpfung der Strecken und räumliche Restriktionen des Knotens
- auf betrieblicher Seite
 - das Vorliegen von Zugzahlen, Vertaktungen, Anschlüssen und der Verlauf der Relationen

Je genauer verfügbare Informationen sind (z.B. Fahrzeugeinsatz oder genaue Fahrplanlagen), desto besser ist die Aussagefähigkeit der Ergebnisse [81]. *Abbildung 47* gibt einen Überblick über den Ablauf der konstruktiven Verfahren

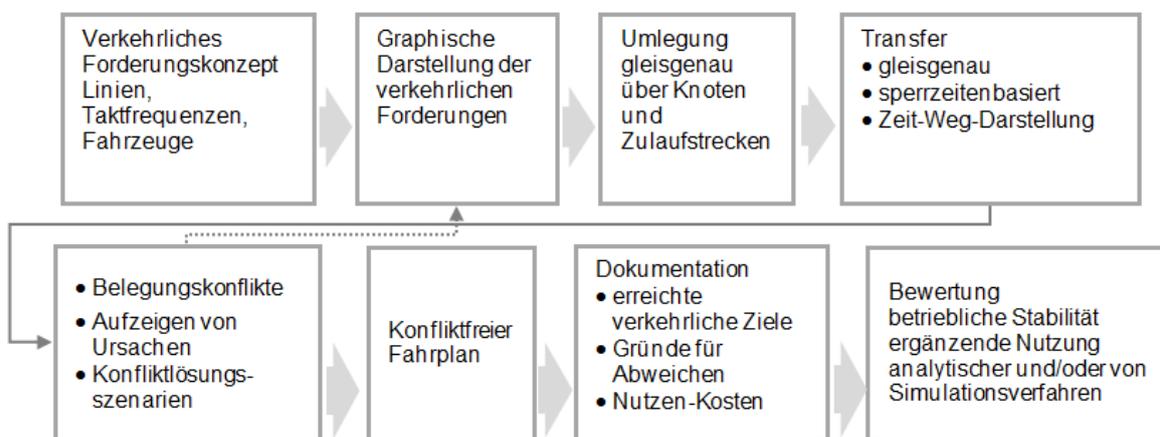


Abbildung 47: Arbeitsschritte der konstruktiven Verfahren ([140], S. 32)

Simulationsverfahren

Unter einer gegebenen Infrastruktur modellieren die Simulationsverfahren Informationen über die Züge eines Fahrplans und das Verhalten im Betriebsablauf. Hierfür ist eine mikroskopische Abbildung der Infrastruktur notwendig. Mit diesen Verfahren können – insbesondere komplexe Systeme – detailliert analysiert werden.

Nach [132] ist die Simulation kein Verfahren zur direkten Dimensionierung der Infrastruktur:

- sie gibt nicht an, wie einzelne Anlagenteile ausgelastet sind sondern zeigt auf,
- mit welcher Qualität auf einer gegebenen Infrastruktur ein gegebener Fahrplan – auch unter Störungen – durchgeführt werden kann.

Generelle Aussagen bezüglich Leistung und Betriebsqualität können aus der Auswertung mehrerer Simulationsläufe erhalten werden, z.B. kann dies aus unterschiedlichen Betriebstagen interpretiert werden [131].

Abbildung 48 gibt einen Überblick über den Ablauf der Simulationsverfahren.

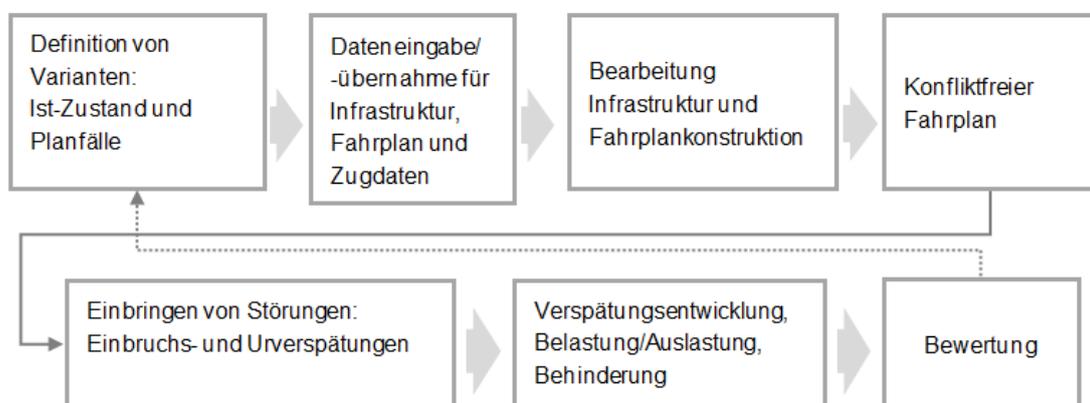


Abbildung 48: Arbeitsschritte der Simulationsverfahren ([140], S. 36)

2.4.3 Inverse Kapazitätsermittlung/-bemessung (C⁻¹)

Das C⁻¹-Verfahren wurde von Universitätsprofessor Dr.-Ing. E. HOHNECKER seit den 1980er Jahren erdacht und am Lehrstuhl für Eisenbahnwesen des KIT (Karlsruher Institut für Technologie, ehemals Universität Karlsruhe (TH)) unter seiner Leitung, weiterentwickelt.

Die Kernidee besteht darin, die benötigte Infrastruktur aus einem gegebenen zukunftsfähigen Fahrplan reproduzierbar abzuleiten ([7] und [9]), anstatt ein Betriebsprogramm bzw. einen Fahrplan aus der Infrastruktur – anhand der in Kapitel 2.4.2 aufgeführten eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Methoden – zu bestimmen.

Der Vergleich zwischen der konventionellen Planung und der fahrplanbasierten Infrastrukturplanung (C⁻¹-Verfahren) ist in *Abbildung 49* dargestellt.

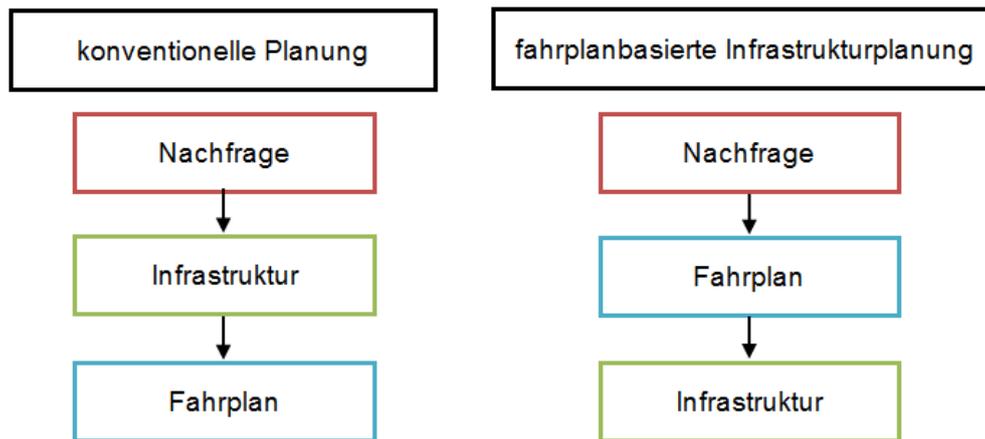


Abbildung 49: Vergleich der Grundprinzipien zwischen der konventionellen Planung und der fahrplanbasierten Infrastrukturplanung ([111], Ergänzung ZHAO)

Entwicklungsschritte

In [7] wurde eine erste allgemeingültige hierarchische Gliederung und Strukturierung für das inverse Verfahren zur Kapazitätsbemessung C^{-1} entwickelt. Als praktisches Beispiel diente der Neubau einer Gleisquerspange zwischen Erbach und Ehingen.

In [9] entsprach die Infrastrukturentwicklung den aktuellen Fahrplänen, so dass die gewünschte Konzentration der Rangieraufgaben auf dem Rbf Däniken mit C^{-1} nachgewiesen werden konnte.

Beide Arbeiten haben gezeigt, dass der neue Ansatz C^{-1} zur Dimensionierung der Eisenbahninfrastruktur auf Basis eines zukunftsfähigen Fahrplans sehr vielversprechend ist. Eine gesamtgesellschaftliche wissenschaftliche Betrachtung war in diesen Arbeiten nicht vorgesehen.

Mit den Erfahrungen aus [7] und [9] wurde in [140] der systematische Verfahrensablauf von C^{-1} weiterentwickelt. Die Problemstellung der Infrastrukturdimensionierung wird dort wie folgt formuliert:

„Ausgehend von einem vorgegebenen Fahrplan oder einem geforderten Betriebsprogramm, wobei es nicht darauf ankommt, ob es sich um neue Verkehre oder um Änderungen vorhandener Verkehre handelt, ist die Infrastruktur unter Beachtung räumlicher, zeitlichbetrieblicher, technischer (und ggf. finanzieller) Nebenbedingungen zu dimensionieren. Neben der Durchführung des geforderten Betriebs sollen noch ausreichende Reserven vorhanden sein, um sowohl bei Störungen ein bestimmtes Qualitätsniveau bei der Durchführung des Betriebs einhalten zu können als auch möglichst flexibel in Bezug auf (kleinere) künftige betriebliche Änderungen reagieren zu können.“ [140]

Zur Lösung der Problemstellung gibt WIECZOREK in [140], S. 51, eine Vorgehensweise in elf Schritten an, welche sich in drei Phasen gliedern lässt (Abbildung 50):

- „1. Betrachtungshorizont definieren:
Abgrenzung des Planungsproblems in zeitlicher Hinsicht
2. Maßgebliches Betriebsprogramm ermitteln:
Konkretisierung der betrieblichen Anforderungen
3. Planungs- und Untersuchungsgebiet definieren:
Abgrenzung des Planungsproblems in räumlicher Hinsicht
4. Verkehrliche Zielqualität und Ausbaustandard definieren:
erste infrastrukturelle Festlegungen aufgrund betrieblicher Anforderungen
5. Einschränkungen des Lösungsraums ermitteln:
Erkennen von wesentlichen Randbedingungen und unzulässigen Lösungen
6. Potenzielle Engpässe identifizieren:
Ermitteln der für die Leistung der Infrastruktur kritischen Elemente
7. Fahrplan zur Umsetzung des Betriebsprogramms aufstellen:
zeitliche Festlegung der betrieblichen Anforderungen
8. Fahrplan untersuchen:
Ermitteln der Leistungsanforderungen des maßgeblichen Fahrplans
9. Engpasselemente dimensionieren:
Bemessung der Engpasselemente
10. Kapazität der einzelnen Infrastrukturelemente bemessen:
Bemessung der übrigen Infrastruktur
11. Lösung untersuchen:
Nachweis der Machbarkeit, Ermittlung weiterer betrieblicher Eigenschaften“

Aus der jeweiligen Aufgabenstellung ergibt sich, welche Schritte tatsächlich bearbeitet werden müssen. Der Ablauf ist i. A. in [140] zu folgenden Phasen zusammengefasst:

- I. „Die Vorstufe der genauen Beschreibung des zu bearbeitenden konkreten Problems, indem die betrieblichen Ziele erfasst und das betreffende Gebiet eingegrenzt wird.“
- II. „Während der ersten Stufe werden Randbedingungen festgelegt, die den verfügbaren Lösungsraum einschränken.“
- III. „Die Inverse Kapazitätsermittlung (C^{-1}) im eigentlichen Sinne findet auf der zweiten Stufe statt. (...) ein vorgegebener Fahrplan (Anm. wird) auf seine Anforderungen hinsichtlich der Infrastruktur untersucht; aufbauend auf diesen Ergebnissen wird die Infrastruktur dimensioniert.“

Abbildung 50 zeigt die dargestellten Einzelschritte, die in folgende Phasen untergliedert werden:

- Vorstufe
- erste Stufe, in der die Rahmenbedingungen festgelegt werden
- zweite Stufe, in der die Inverse Kapazitätsermittlung (C^{-1}) im eigentlichen Sinne durchgeführt wird

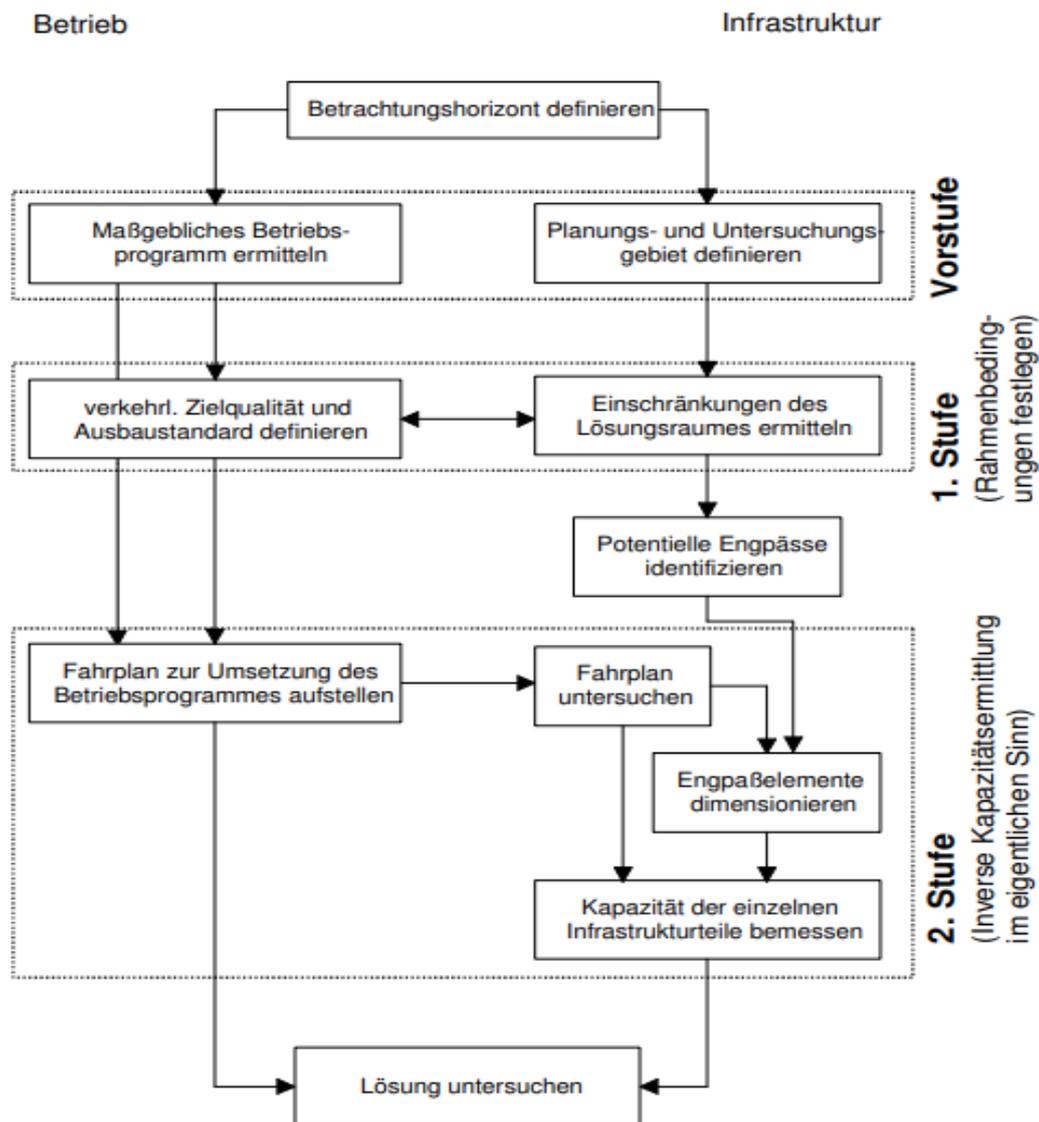


Abbildung 50: Vorgehensweise der Inversen Kapazitätsermittlung C^{-1} ([140], S. 60)

In [140] wurde der Forschungsbereich auf einen Knoten (Gleisgruppe sowie die beiden Bahnhofsköpfe) begrenzt, dessen parallele Leistung aus einem gegebenen Fahrplan ermittelt wurde. Die angrenzenden Strecken wurden nur mit Blick auf die Anschlussseite, Höchstgeschwindigkeit und Anzahl der Gleise berücksichtigt.

Um die Infrastruktur des Knotens dimensionieren zu können, sind Informationen über die zeitliche Belegung einzelner Infrastrukturabschnitte nötig.

Wie *Abbildung 51* zeigt, wird mittels des Scan-Line-Prinzips die parallele Leistungsanforderung (Gleisanzahl) ermittelt. Dies geschieht durch die maximale Anzahl der gleichzeitigen Belegungen der einzelnen Elemente.

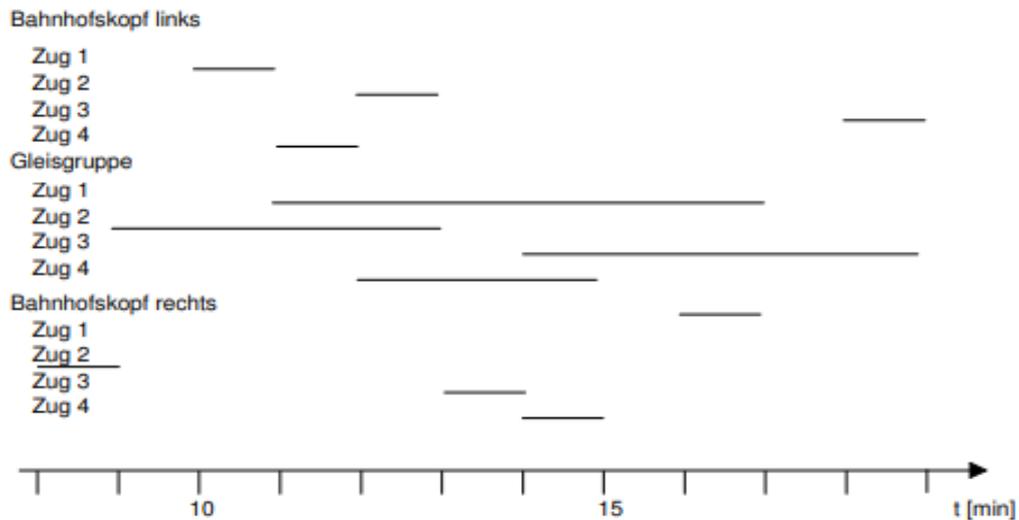


Abbildung 51: Belegungsanforderungen der Infrastrukturabschnitte ([140], S. 101)

[42] hat sich mit der inversen Kapazitätsermittlung (C^{-1}) der Freien Strecke beschäftigt. Aus den Fahrzeiten wurden die Belegungszeiten auf der Freien Strecken ermittelt (Abbildung 52).

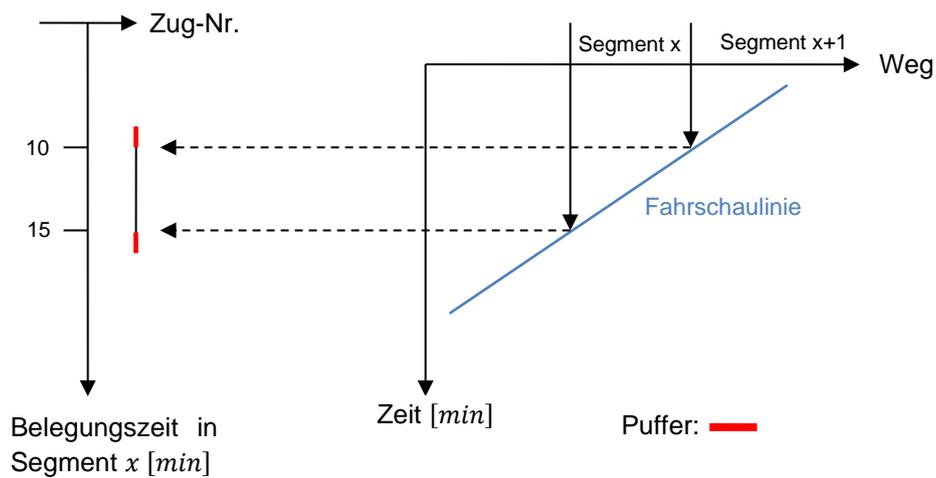


Abbildung 52: Überführung der Fahrtschaulinien (FSL) in diskrete Belegungen ([42], S. 20)

Mit einem Verspätungszuschlag auf die Belegungszeiten kann die Betriebsqualität berücksichtigt werden.

Unter Beachtung der betrieblichen Möglichkeiten – Fahren im festen Raumabstand sowie Fahren im absoluten Bremsabstand – wird in [42] mittels des Scan-Line-Verfahrens eine parallele Leistung auf der Freien Strecke ermittelt. Hierzu werden vor- und nachlaufende „Sperrlinien“ benötigt.

Die „Sperrlinie“ kennzeichnet die Parallelverschiebung der Fahrtafel auf der Zeitachse durch die Summe der Sperrzeiten. Sie wird gebildet durch die [42]:

- vorlaufende Sperrlinie: Fahrstraßenbildungszeit, Sicherheitszuschlag, Signallaufzeit⁵⁷ und Bremswegfahrzeit
- nachlaufende Sperrlinie: Räumfahrzeit und Fahrstraßenauflösezeit

Über vorab berechnete vorlaufende und nachlaufende Sperrlinien der FSL wird eine trapezförmige Sperrfläche generiert. Werden mehrere FSL verwendet, können diese sich auch überlagern. Tritt dieser Überlagerungsfall ein, wird die Anzahl der Überlagerungen mit der Gleisanzahl gleichgesetzt.

Wie in *Abbildung 53* erkennbar, ermittelt die Scan-Line, die sich von links nach rechts über den Bildfahrplan bewegt, die Anzahl der übereinanderliegenden Trapeze an jedem Ort.

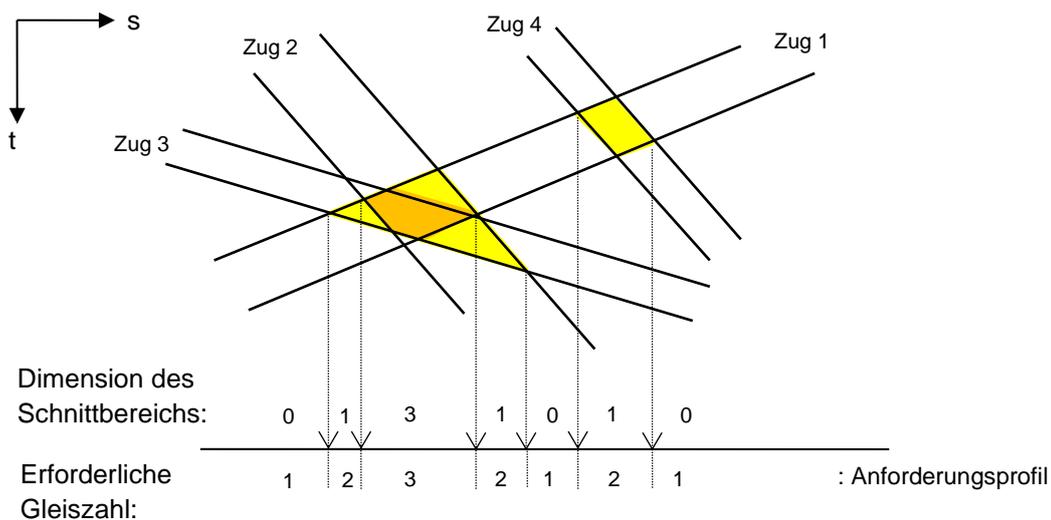


Abbildung 53: Dimension von Schnittbereichen ([42], S. 47)

Um die Berechnung zu vereinfachen, wurden einige Annahmen und Vereinfachungen in [42] hergestellt:

Die Beschleunigungs- und Bremszeiten sowie Geschwindigkeitsunterschiede auf der Strecke werden vernachlässigt.

Daher eignen sich für dieses vereinfachte Verfahren Strecken mit homogener Geschwindigkeitsverteilung und einfacher Bahnhofsgleistopologie.

⁵⁷ Die Signallaufzeit ist eine technische Latenzzeit und liegt im Bereich weniger Millisekunden. Sie tritt bei Führerraumsignalisierung auf; bei ortsfester Signalisierung steht an ihrer Stelle die Signalsichtzeit [42].

Das Verfahren zur Dimensionierung eines Bahnhofs in [140] wird um das Verfahren zur Dimensionierung eines kompletten Streckenabschnitts in [29] erweitert:

- Die parallele Leistungsfähigkeit im Knoten und auf Freier Strecke kann durch das aufgeführte Verfahren in [29] bestimmt werden.
- Die sequentielle Leistungsfähigkeit wurde durch optimale Blöcke bestimmt.

Diese Werkzeuge werden gemäß der Scan-Line-Methode von [140] auf eine dritte Dimension, die „Fahrplanlage“ erweitert. Sie ist in *Abbildung 54* dargestellt.

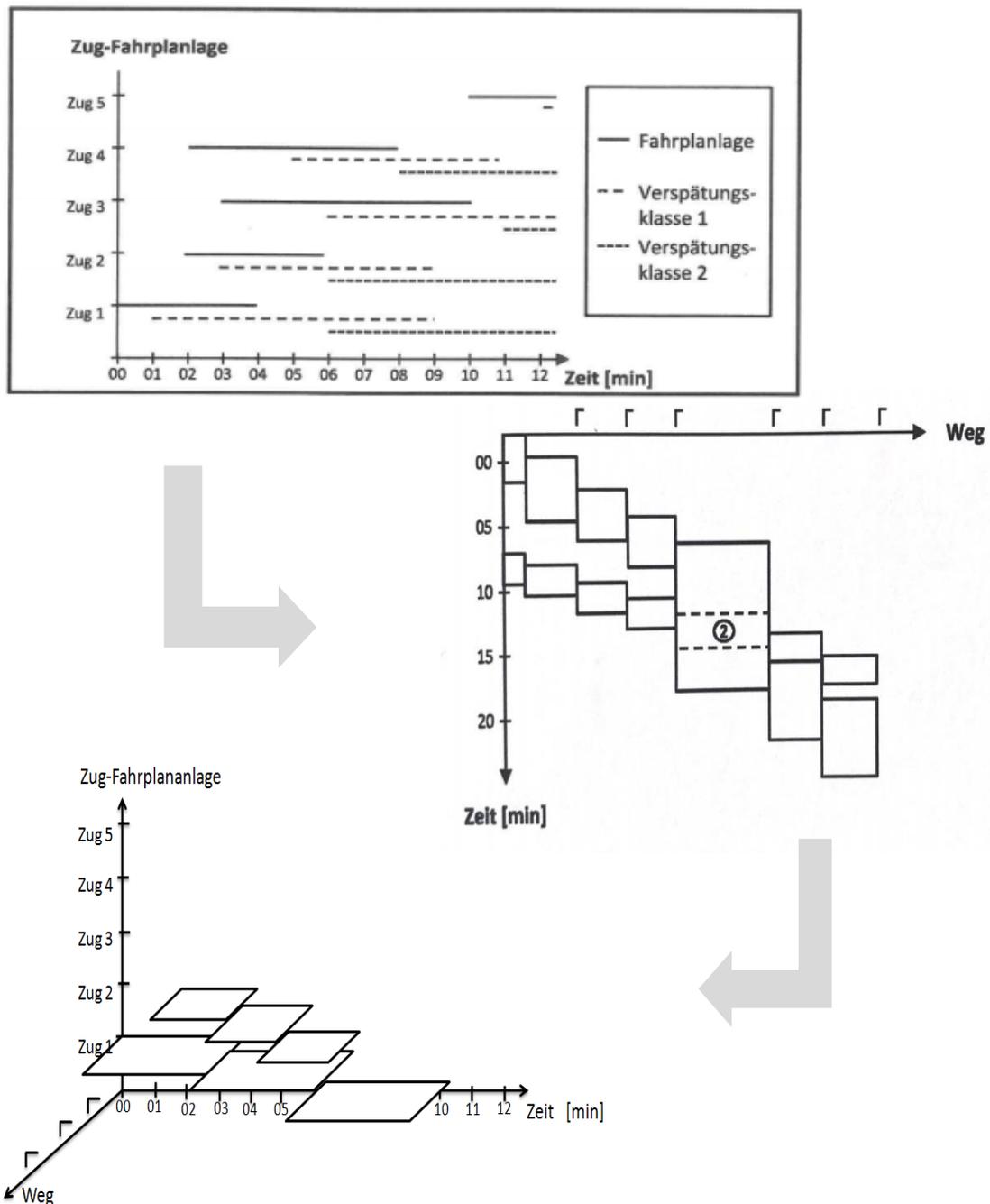


Abbildung 54: Erweiterung des Scan-Linie-Verfahrens aus [140] um die 3. Dimension „Fahrplanlage“ ([29], S. 55, 70, 71)

Die überlappenden Bereiche, die im Weg-Zeit-Diagramm entstehen, stellen die Anforderungen an die Gleisinfrasturktur dar. Diese Anforderungen werden generiert, wenn die Sperrzeit unter Berücksichtigung der Fahrgeschwindigkeit für jeden Block ermittelt wird.

Nach [29] ist es unmöglich, die genauen räumlichen Grenzen für die unterschiedlichen Infrastrukturanforderungen, durch die Festlegung der betrachteten Blöcke, zu bestimmen. Außerdem kann das Verfahren in [29] nicht direkt automatisiert werden und funktioniert bei einem hohen Anteil von Zugfahrten außerhalb des Bahnhofs nicht zufriedenstellend.

Um die Ziele „Langfristigkeit“ und „Flexibilität“ zu erfüllen, sollte die entwickelte Infrastruktur auch veränderte Fahrplankonzepte zulassen können bzw. durch geringe Anpassungen, welche auch den Trassierungsparametern genügen, dies ermöglichen. In [122] wurde hierzu ein Ansatz aus dem Fahrplankonzept entwickelt (*Abbildung 55*).

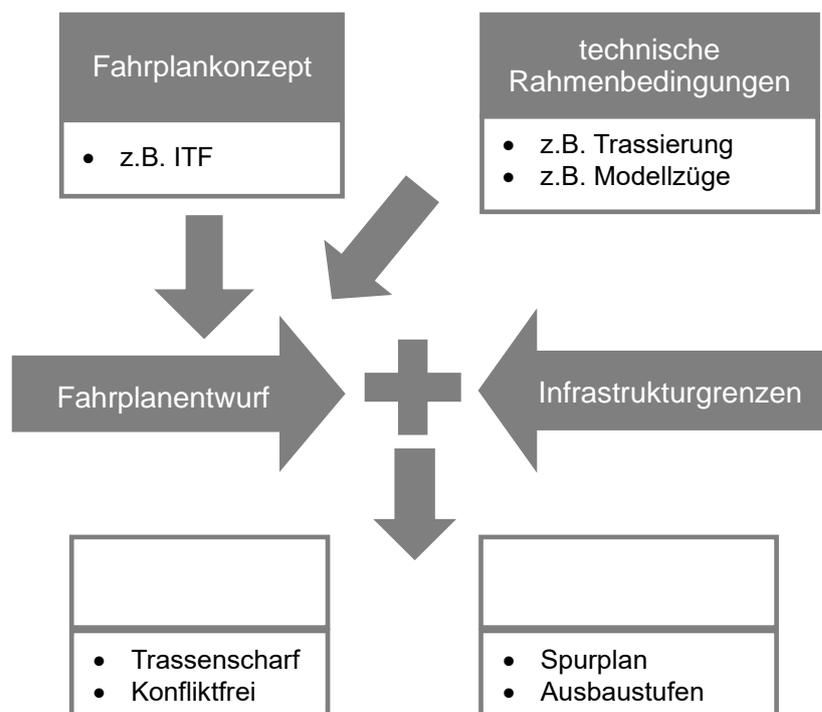


Abbildung 55: Übersicht über den Ablauf des Verfahrens von TZSCHASCHEL ([122], S. 76)

Wie *Abbildung 55* zeigt, werden Infrastruktur- und Fahrplanermittlung aus einem Fahrplankonzept innerhalb der Infrastrukturgrenzen in vier Schritten durchgeführt [122]:

1. „Prüfen und Ermitteln der Fahrzeiten“
2. „Erstellen eines ersten Gesamt-Belegungsdiagramms“
3. „Ermitteln der notwendigen Infrastruktur und Prüfen der gegebenen Infrastrukturrahmenbedingungen (d.h. gesetzte Infrastrukturgrenzen in den Eingangswerten)“
4. „Anpassung des Fahrplans an die ermittelte Weichenlage und Entschärfung von Konfliktbereichen“

Ein wichtiger Unterschied zu der zuvor genannten Arbeit in [29] ist, dass weder der Fahrplan noch die Infrastruktur komplett vorgegeben ist.

Obwohl die Ergebnisse mit dem heuristischen Algorithmus von [122] schnell erhalten werden können, gibt es keine Garantie ob die Lösung optimal ist.

Deshalb wurde von BLAUTH [6] ein lineares Optimierungsverfahren entwickelt, das auf [122] basiert. Damit erhält man die optimale Infrastruktur aus einem gegebenen Fahrplankonzept.

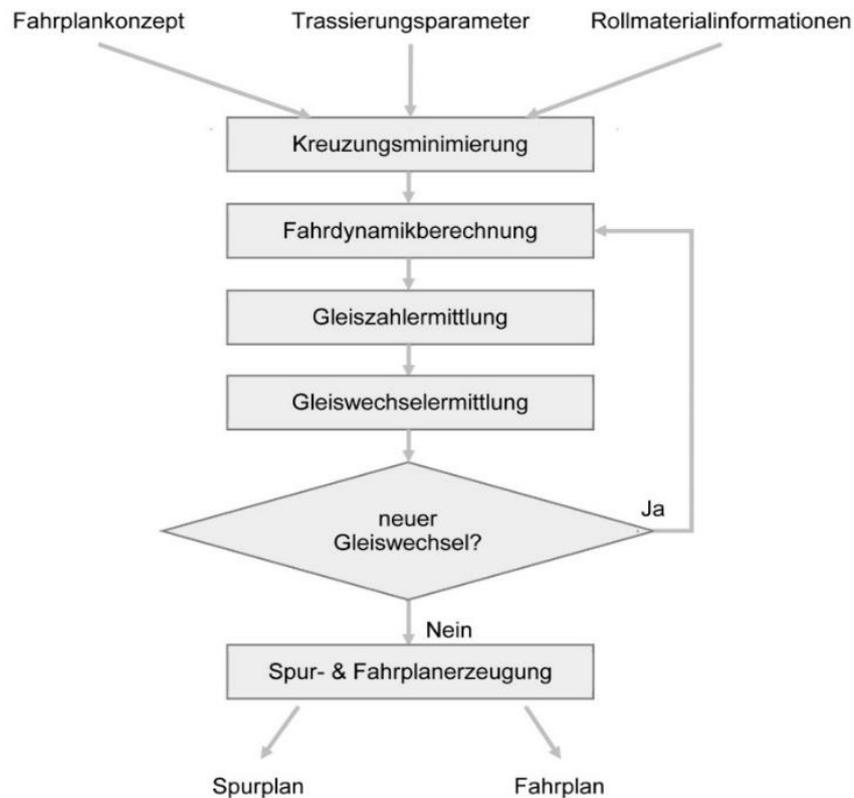


Abbildung 56: Übersicht über das Verfahren von BLAUTH ([6], S. 29)

Abbildung 56 zeigt das Verfahren von BLAUTH [6] in fünf Schritten:

1. „Ermittlung der Kreuzungsfolge und Minimierung der Kreuzungen“
2. „konfliktfreie Zugfahrten durch fahrdynamische Anpassungen“
3. „Ermittlung der notwendigen Gleiszahl“
4. „Erkennung nötiger Gleiswechsel und Durchführung einer neuen Fahrdynamikberechnung“
5. „Erzeugung eines gültigen Fahrplans und eines Spurplans“

Die aufgeführten C¹-Entwicklungsschritte bilden die betrieblich-infrastrukturelle Basis dieser Arbeit:

Eine Strecke inkl. der Bahnhöfe reproduzierbar zu entwickeln.

2.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden zunächst die Grundlagen der Eisenbahninfrastruktur und die Zusammenhänge der Linienführung, Trassierungs-, Gleis- und Fahrdynamikparameter vorgestellt.

Neben den 3 räumlichen, kartesischen Dimensionen mit den Koordinaten x , y , z müssen daher bei dem Entwurf einer NBS sowohl geometrische Einschränkungen als auch die folgenden Aspekte in dieser Arbeit berücksichtigt werden:

- Geschwindigkeit v
- Fahrzeit t
- Beschleunigung/Verzögerung
 - a_x in x -Richtung
 - a_q in Gleisebene y -Richtung
 - a_z in z -Richtung
- Ruck
 - c_y in y -Richtung

Da die Geschwindigkeit v durch die Linienführung, Trassierungs- und Gleisparameter begrenzt wird, kann ein NBS-Element aus der maximalen Geschwindigkeit $\max v$ ermittelt werden.

Darüber hinaus muss die Fahrzeit dem vorgegebenen ITF entsprechen. Fahrdynamikparameter wie Beschleunigung/Verzögerung a_x und Ruck c_y müssen als Komfortkriterium berücksichtigt werden.

Danach werden die Grundlagen des Eisenbahnbetriebs und die EBWU-Verfahren ausführlich beschrieben.

Bei allen konventionellen Methoden ist zu ersehen, dass eine Infrastruktur vorausgesetzt wird, um anschließend iterativ das durchführbare Verkehrsgeschehen bestimmen zu können.

Bei der Kapazitätsermittlung wird geprüft, ob die vorhandene Infrastruktur das Betriebsprogramm bzw. den Fahrplan mit der vorgesehenen Qualität aufnehmen kann. Erfolgreich ist dies, wenn das Betriebsprogramm bzw. der Fahrplan und die vorhandene Infrastruktur gut angepasst werden können.

Wenn die vorhandene Infrastruktur nicht mit dem Betriebsprogramm/Fahrplan übereinstimmt, muss die Infrastruktur überarbeitet werden. In diesem Fall wird zunächst die Kapazität, basierend auf der vorhandenen Infrastruktur oder einer empirisch ermittelten Infrastruktur, bestimmt. Anschließend wird geprüft, ob die Infrastruktur den Anforderungen entspricht. Wenn

dies nicht erfüllt ist, wird die Infrastruktur iterativ soweit angepasst, bis die betrieblichen Anforderungen erfüllt sind.

Analytische Verfahren erfordern keinen genauen Fahrplan, um die Infrastrukturermittlung durchzuführen [35]. Mittels dieser Methoden wird der Belastungszustand einzelner Fahrweegelemente anhand der Betriebsanforderungen (z.B. Modellzug, Wahrscheinlichkeit der Zugfolgefälle und Ankunftsverteilung) ermittelt. Aufgrund der zufälligen Verteilung der ankommenden Züge, ist das Ergebnis weniger präzise.

Konstruktive Verfahren sind für einen vorgegebenen Zeitraum eines Betriebsablaufs geeignet, in welchem verschiedene betriebliche Vorgänge in Reihe geschaltet werden. Grundlage hierfür ist die Fahrzeitermittlung. Diese Verfahren gelten nur für deterministische Größen und erlauben sehr genaue Aussagen über die geplanten Betriebsabläufe. Es sind jedoch viele, sehr detaillierte Informationen erforderlich (z.B. Zuglänge, Neigung, Höchstgeschwindigkeit, Signalstandorte). Für NBS sind diese Informationen unbekannt.

Simulationen reproduzieren einen Teil des möglichen Betriebsgeschehens auf dem Computer, sodass der Betriebsprozess – insbesondere komplexer Systeme – detailliert analysiert werden kann. Generell wird ein vorhandener konfliktfreier Fahrplan, inklusive der Verspätungen, auf die vorhandene Infrastruktur übertragen. Daraus werden die Folgen – wie z.B. die Übertragung von Verspätungen – bestimmt. Da dieses Verhalten vom Simulationsmodell bestimmt wird, muss dasselbe Ergebnis reproduziert werden können, wenn derselbe Fahrplan mehrmals simuliert wird.

Die Simulationen ermitteln jedoch keine Dimensionierung der Infrastruktur.

In [6], [29], [42], [122] und [140] wurde mit Unterstützung von [7], [9] und HOHNECKER die Idee von C^{-1} in unterschiedenen Raumbereichen entwickelt. Die Verfahren in den aufgeführten Quellen basieren auf einem vorgegebenen Betriebsprogramm/Fahrplan:

- Mit [140] kann die Belegung des Zuges im Bahnhofsbereich sekundengenau ermittelt werden. Es ist jedoch nicht möglich, den spezifischen Standort der Infrastruktur zu bestimmen.
- Basierend auf den Zugfolgezeiten wurde C^{-1} in [42] für die Freie Strecke weiterentwickelt.
- In [29] wurden beide Verfahren – [42] und [140] – zusammengeführt, um die Infrastruktur im Knoten und auf der Freien Strecke zu ermitteln. Dieser Prozess kann dort nicht direkt automatisiert werden.

- In [6] und [122] wurden verschiedene mathematische Verfahren entwickelt, welche die Fahrdynamik berücksichtigen.

Somit eignet sich C^{-1} um auf der Basis eines Fahrplans die Gleisinfrastruktur einer Strecke reproduzierbar zu ermitteln.

Tabelle 17 zeigt Beispiele der derzeit verwendeten Verfahren, ihre hauptsächlichlichen Einsatzgebiete und Voraussetzungen sowie die bisherigen Entwicklungen zu C^{-1}

Tabelle 17: Beispiele betrachteter Verfahren (Eigene Darstellung)

Veröffentlichung von	Verfahren	Voraussetzungen				Aufgabenstellung		
		Infrastruktur	Betriebsprogramm	Fahrplan	Fahrzeit	Netz	Strecke	Knoten
PACHL [84]	Analytische verfahren	x	x					x
FERCHLAND KÖRNER [35]		x	x				x	x
MUTSCHINK UHLMANN [81]	Konstruktive Verfahren	x	x		x			x
PACHL [84]	Simulationen	x	x					
WIECZOREK [140]	Inversen Kapazitäts-ermittlung C^{-1}			x				x
HARTMANN [42]				x	x		x	
DÜPMEIER [29]				x	x		x	x
TZSCHASCHEL [122]			x		x		x	x
BLAUTH [6]			x				x	x

Um die in Kapitel 1.2 aufgeführten Ziele weiter zu bestimmen, wird in Kapitel 3 eine NBS entworfen, welche die zukünftigen betrieblichen Anforderungen erfüllt und als Grundlage der zukünftigen, nachhaltigen Infrastruktur dient.

3 Linienführung und Trassierung einer NBS

Im zweiten Kapitel wurden die traditionellen EBWU und Elemente des neuen EBWU–Verfahren „C-1“ vorgestellt. In der vorliegenden Arbeit soll nun das EBWU–Verfahren „C-1“ weiterentwickelt und eine Methode zum Entwurf einer mikroskopisch modellierten Infrastruktur für neu zu planende Strecken vorgeschlagen werden.

Bei der Infrastrukturplanung werden hauptsächlich zwei Aspekte nach [140] berücksichtigt:

- „neue Verkehre: z.B. NBS, reaktivierte Strecken“
- „wesentliche Änderungen des Verkehrsangebotes: z.B. Einführung von Integrierten Taktfahrplänen“

Um in Zukunft eine nachhaltige Infrastruktur zu erhalten, muss, wie in Kapitel 2 erläutert, zunächst ein nachhaltiger, zukunftsfähiger Fahrplan erstellt werden. Die Erstellung des Fahrplans hängt eng mit dem Geschwindigkeitsprofil der Züge zusammen. Um sicherzustellen, dass die Züge in Zukunft „so schnell wie nötig“ eine ITF-Strecke befahren können, wird diese mit unterschiedlichen Geschwindigkeitsprofilen geplant.

In diesem Kapitel wird eine neue Methode vorgeschlagen, welche die Trassierungselemente und die Fahrdynamik umfassend berücksichtigt. Die optimale Linienführung und Trassierung einer neuzubauenden Strecke (hier: HGV-Strecke⁵⁸) wird dann über die notwendige ITF-Fahrzeit eines Zuges ermittelt.

Dieses Kapitel ist in drei Abschnitte mit abschließender Zusammenfassung unterteilt:

- Kapitel 3.1: Methoden zur Bestimmung von Elementen der Linienführung und Trassierung einer Eisenbahnstrecke
 - Enumeration
 - Variationsrechnung
 - Network Optimization
 - Linear Programming (LP)
 - Genetische Algorithmen (GA)
 - Hybrider Algorithmus
 - Heuristischer Algorithmus
 - Distance Transform (DT)
 - Methode der Trassierung nach HOHNECKER
- Kapitel 3.2: Aktuelle Verfahren der Fahrzeitermittlung
 - Mikroschrittverfahren
 - Methoden zur Fahrzeitermittlung

58 HGV-Strecken: $V_{\max} > 250$ km/h

- Kapitel 3.3: Entwicklung eines Modells für die Linienführung und Trassierung einer NBS
 - Entwurf möglicher Linienführungen mittels DT
 - Fahrzeitermittlung mit MIP
- Kapitel 3.4: Zusammenfassung

3.1 Methoden zur Bestimmung von Elementen der Linienführung und Trassierung einer Eisenbahnstrecke

Der Entwurf von Eisenbahnstrecken ist wegen der Berücksichtigung der Trassierungs-, Gleis- und Fahrzeugparameter und der Anpassung und Einfügung an/in die Topographie komplex und zeitaufwändig. Die Entwurfspraxis von Eisenbahnstrecken findet größtenteils empirisch statt und hängt daher stark vom Einfluss der Planer ab.

Um die Sucheeffizienz und die Lösungsqualität zu steigern, wird die Eisenbahnstrecken-ermittlung als Problem der Formoptimierung einer Raumkurve unter Berücksichtigung der Fahrdynamik angesehen. Zur Formoptimierung einer Raumkurve wurden viele Methoden entwickelt.

Bei der Gestaltung der Strecken werden durchgehende Raumelemente verwendet, die den geometrischen Anforderungen in der horizontalen und vertikalen Ebene entsprechen. Die Formoptimierung einer Raumkurve berücksichtigt diese Ebenen.

Um die Linienführung im Lage- und/oder Höhenplan zu ermitteln, werden z.B. folgenden Modelle benutzt:

3.1.1 Enumeration

Die Enumeration als Aufzählungstyp „... ist ein Datentyp für Variable mit einer endlichen Wertemenge“ [142]. Die Enumeration wird im Straßenbau verwendet. Dort wird die Straßenklasse⁵⁹ i.d.R. so festgelegt, dass sie den geometrischen Bedingungen der Straße entspricht. Sobald die Klasse festgelegt ist, werden die Mindestkosten bestimmt.

In [30] wurde ein Modell der Straßenklasse ausgewählt, indem alle Kombinationen aufgezählt werden, welche die Enumeration der geometrischen Beschränkungen erfüllen. Die geometrische Beschränkungen in [30] umfassen die Neigung, die Länge der Ausrundung sowie die Beziehung zwischen den Trassierungsparametern im Lage- und Höhenplan.

Mit Hilfe der linearen Programmierung wird die kostengünstigste Ausführung für alle Alternativen ermittelt.

⁵⁹ Straßenklassen dienen der Klassifizierung von Straßen in einem Straßennetz, die i.d.R. auf rechtlichen oder funktionalen Kriterien beruhen. Je nach Straßenklasse gelten unterschiedliche Normen und Standards wie z.B. Straßenbreite, Fahrspuren und Entwurfsgeschwindigkeiten.

Vorteil dieses Modells ist die Berücksichtigung aller wichtigen Details (z.B. Erdbauwerke). Da alle Kombinationen der Trassierungsparameter aufgelistet werden müssen, kann der Suchvorgang in Abhängigkeit der Größe des Untersuchungsgebiets sehr zeitaufwändig sein.

Darüber hinaus kann nur eine begrenzte Anzahl von diskreten Höhenpunkten berücksichtigt werden.

Der Ansatz der Enumeration reduziert zwar das Suchvolumen, aber das Ergebnis der Suche wird bei einer „global-optimalen Lösung“⁶⁰ nicht garantiert.

3.1.2 Variationsrechnung

Auch das Modell der Variationsrechnung (englisch: calculus of variations) wurde für den Straßenbau entwickelt.

Die Variationsrechnung besteht aus einem rein mathematischen Modell. Bei dieser Methode werden die Trassen als räumliche Kurven ermittelt, die zwei Endpunkte verbinden und den kleinsten Integralwert der Zielfunktion erfüllen sollten.

Die Zielfunktion wird für die Mindestkosten⁶¹ in [53] und [113] vorgeschlagen, um eine Optimierung von Straßentrassen im Lage- und Höhenplan zu erhalten.

Die Lösung dieser Methode ist sowohl „kontinuierlich“⁶² als auch „global-optimal“. Das Hauptproblem besteht darin, die komplexen Geometrieanforderungen für die Trassierungsparameter und die Annahme einer kontinuierlichen Kostenfunktion darzustellen. Je größer ein Untersuchungsgebiet ist, desto komplizierter wird die Modellierung und umso höher der Rechenaufwand.

60 Global- und lokal-optimale Lösung (englisch: Global and/or local optimization):

- die „global-optimale Lösung“ bezieht sich auf die einzige optimale Lösung in allen Lösungsmengen
- „lokal-optimale Lösung“ heißt, dass diese Lösung in Teilen der Lösungen optimal ist, aber nicht garantiert ob sie die einzige optimale Lösung aller Lösungsmengen darstellt.

61 Die Kosten beinhalten die Baukosten, die Nutzerkosten (z.B. Kraftstoff, Zeit, usw.), die Instandhaltungskosten und andere Kosten (z. B. Flächennutzung, ökologische Sanktionen) ([53] und [113]).

62 Die Variable eines Modells kann kontinuierlich oder diskret sein:

- kontinuierliche Variable: „*Variable mit unendlich vielen Ausprägungen. Zwischen zwei beliebigen Skalenwerten sind unendlich viele, beliebig fein auflösbare Intervalle definiert*“ [27].
- diskrete Variablen (= Gegensatz der kontinuierlichen Variablen): „*Variable mit endlich vielen (z. B. natürliche Zahlen von 1 bis 5) oder abzählbar unendlich vielen Ausprägungen (z. B. natürliche Zahlen von 1 bis ∞). In definierten Intervallen können alle Variablenausprägungen aufgezählt werden*“ [28].

3.1.3 Network Optimization

Auch das Konzept der Network Optimization kommt aus dem Straßenbereich. Es wurde in [118] zur Optimierung des Vorentwurfs für den Lageplan einer Straßentrasse verwendet.

Bei dieser Methode wird der Pfad in einer Reihe stückweise linear⁶³ vom Start- zum Endpunkt unterteilt, wobei die vorhandenen Krümmungsbeschränkungen durch die Suche nach den möglichen Winkeln auf dem Gitter erfüllt werden können [118]. Die Auswahl verschiedener Winkel führt zu verschiedenen möglichen Pfaden.

Die optimale Lösung erhält man aufgrund der minimalen Kosten.

Nachteile dieser Methode:

- wenn der Umfang des rechteckigen Gitters groß ist, wird die Berechnung zeitaufwändig und die Anforderung an den Speicherplatz groß
- TRIETSCH [118] berücksichtigt keine Linienverbesserung im Höhenplan

3.1.4 Linear Programming (LP)

In [94] wurde die Trassierung im Höhenplan mithilfe von Linear Programming (LP) bestimmt. Das Modell verwendet eine Polynomfunktion 5. Ordnung zur Darstellung der Raumkurve im Höhenplan. Die Neigung und die Neigungsunterschiede lassen sich mit dieser Funktion ermitteln. Schließlich werden die Koeffizienten des 5-fach Polynoms mit einem LP-Ansatz optimiert, um die Kosten der Bauarbeiten zu minimieren [94].

Diese Methode liefert Funktionen, die relativ einfach zu lösen sind; allerdings ist es i.d.R. schwierig, die gewählten Funktionsformen zu beweisen. Darüber hinaus kann das Modell nicht garantieren, dass alle Neigungen und Neigungsunterschiede auf der Längsschnittachse den geometrischen Beschränkungen entsprechen.

3.1.5 Genetische Algorithmen (GA)

Basierend auf genetischen Algorithmen (GA) wird in [87] ein Optimierungsverfahren für Eisenbahnstrecke vorgeschlagen.

Unter Berücksichtigung verschiedener Faktoren (z.B. Streckenlänge, Bahnhofs-, Brücken- und Tunnelposition) hat der Autor von [87] ein multi-Ziel Entscheidungssystem erstellt. Auf dieser

⁶³ Eine zusammenhängende Sequenz von Liniensegmenten, z.B. eine Kurve, kann durch Abtasten der Kurve und linearer Interpolation zwischen den Punkten angenähert werden.

Basis werden die geometrischen Bedingungen für die Raumkurve in der horizontalen und vertikalen Ebene definiert.

Gemäß den geometrischen Einschränkungen werden mehrere Iterationen mit den GA durchgeführt, bis das Ergebnis zu einer zufriedenstellenden Genauigkeit der Linienführung und Trassierung konvergiert.

Obwohl die GA in der Lage sind, relativ realistische Routenlösungen zu erhalten, nimmt die individuelle Vielfalt bei der iterativen Berechnung ab. Dies führt dazu, dass die Berechnungsergebnisse möglicherweise „lokal-optimal“ sind.

3.1.6 Hybrider Algorithmus

Um die individuelle Vielfalt bei der iterativen Berechnung mit den GA zu vermeiden wurden in [156] die GA mit der „dynamischen Programmierung“⁶⁴ kombiniert, um einen „hybriden Algorithmus“ für die Optimierung von Eisenbahnstrecken im Höhenplan zu entwickeln.

Mit dem GA kann die Anfangslösung iterativ im kontinuierlichen Raum⁶⁵ berechnet werden und die endgültige optimale Raumkurve wird auf der Grundlage dieser erzeugten Anfangslösung weiter optimiert. Dann wird die von den GA erzeugte Anfangslösung in kleinem Abschnitt unterteilt. Anschließend wird mit Hilfe der dynamischen Programmierung die genaue Lösung durch Optimierung jedes Abschnitts gefunden [156].

Die GA können durch den hybriden Algorithmus eine optimale Lösung erhalten. Bei komplexeren Randbedingungen wird eine vereinfachte Verarbeitung oder manuelle Einstellungen vorgenommen (z.B. wurde in [156] nach der Optimierung die Position der Stationen manuelle eingestellt).

64 Die „dynamische Programmierung“ ist eine Methode, bei der ein Optimierungsproblem zuerst in Teilprobleme unterteilt wird. Danach wird die optimale Lösung durch einen mehrstufigen Entscheidungsprozess gefunden. Dieser Entscheidungsprozess kann Variable und Einschränkungen der Teilprobleme reduzieren und die Recheneffizienz verbessern [156].

65 Die Berechnung erfolgt im kontinuierlichen Raum, d.h. innerhalb des angegebenen Bereichs können die Entscheidungsvariablen jeden Wert innerhalb des Bereichs auswählen, der die Bedingungen erfüllt.

3.1.7 Heuristischer Algorithmus

Ein „heuristischer Algorithmus“ der Nachbarschaftssuche für die gemischte ganzzahlige Programmierung wurde in [15] für den Straßenbau entwickelt.

Die Zielfunktion des Modells sind mehrere Kostenkomponenten (z.B. Bau-, Brücken- und Tunnelkosten). Der wichtigste Beitrag von [15] besteht darin, dass Übergangsbogen verwendet werden, um die gekrümmten Abschnitte der Trassen im Lageplan realistisch darzustellen, wobei geometrische Einschränkungen berücksichtigt werden.

Neben dem Profil der Trassen im Lage- und Höhenplan wird auch das Geschwindigkeitsprofil eines LKW auf den Trassen als Ausgabe erstellt.

Mit diesem Verfahren wurden zunächst die optimalen Trassierungsparameter im Lageplan bestimmt und dann die vertikalen Trassierungsparameter auf Basis der im Lageplan bestimmten Linienführung ermittelt. Dieser Optimierungsprozess ist einfach um eine „lokal-optimale Lösung“ zu erhalten.

3.1.8 Distance Transform (DT)

Eine „Gradient Constrained Distance Transform“ (DT) ist Thema in [17]. Dieses Modell kann eine optimale 3D-Linie erzeugen, welche die Gradientenbeschränkungen erfüllt. Die beste Linie wird in drei Schritten generiert [17]:

1. Bestimmung der anfänglich kürzesten Trassen, welche die Gradientenbeschränkungen erfüllen
2. Abstandsberechnung der Trassen mit einer Elevationsmatrix
3. Einfügung der Trassierungs- und Gleisparameter im Lage- und Höhenplan mit einer Spline-Funktion, um geometrische Beschränkungen zu erfüllen

Da die Methode eine große Anzahl von Kostenberechnungsprozessen durchläuft, werden Optimierungsergebnisse zeitaufwändig erhalten.

Darüber hinaus sollten für einen Entwurf einer Eisenbahnstrecke in Hügel- und Berggebieten die Einschränkungen berücksichtigt werden [69]. Um diese Einschränkungen darzustellen, wurde DT in [69] weiterentwickelt und eine 3D-Methode zur Optimierung der Linienführung von Eisenbahnen unter Berücksichtigung mehrerer Einschränkungen in Hügel- und Bergregionen vorgeschlagen. Mit einer bidirektionalen Scan-Strategie⁶⁶ soll die Rechenzeit der Pfadgenerierung verbessert werden. In einem geographischen Informationsmodell als Basis sind alle benötigten Informationen der Pfadsuche gespeichert [69].

⁶⁶ Siehe Kapitel 3.3.1.1 *Abbildung 61*

Das Modell wurde auf ein reales Problem angewandt, in dem die Ergebnisse zeigen, dass diese DT-Methode mit einer 3D-Methode zur Optimierung der Linienführung von Eisenbahnen und der bi-direktionalen Scan-Strategie bei der Generierung von Routen effektiv ist und gleichzeitig mehrere Einschränkungen erfüllt.

Diese verbesserte Methode eignet sich für alle Geländearten (z.B. Flachland, bergig, Gebirge).

3.1.9 Methode der Trassierung nach HOHNECKER

Bei den oben genannten Methoden wurde bei der Linienführung einer Strecke neben geometrische Einschränkungen nur die maximale Entwurfsgeschwindigkeit berücksichtigt.

In der Praxis können bei der Fahrt eines Zuges z.B. durch einen Gleisbogen, vertikale Ausrundungen sowie bei un stetiger Gleislage, etc. Änderungen der Beschleunigung in verschiedene Richtungen den Fahrkomfort beeinträchtigen, insbesondere bei höheren Geschwindigkeiten (z.B. entsteht eine überlagerte Beschleunigung $a_{x,y}$, durch eine Bremsverzögerung a_x in Längsrichtung mit überlagerter Querbeschleunigung a_y beim Durchfahren eines Gleisbogens). Die Fahrgäste können jedoch immer nur das Ergebnis einer überlagerten Beschleunigung wahrnehmen [48].

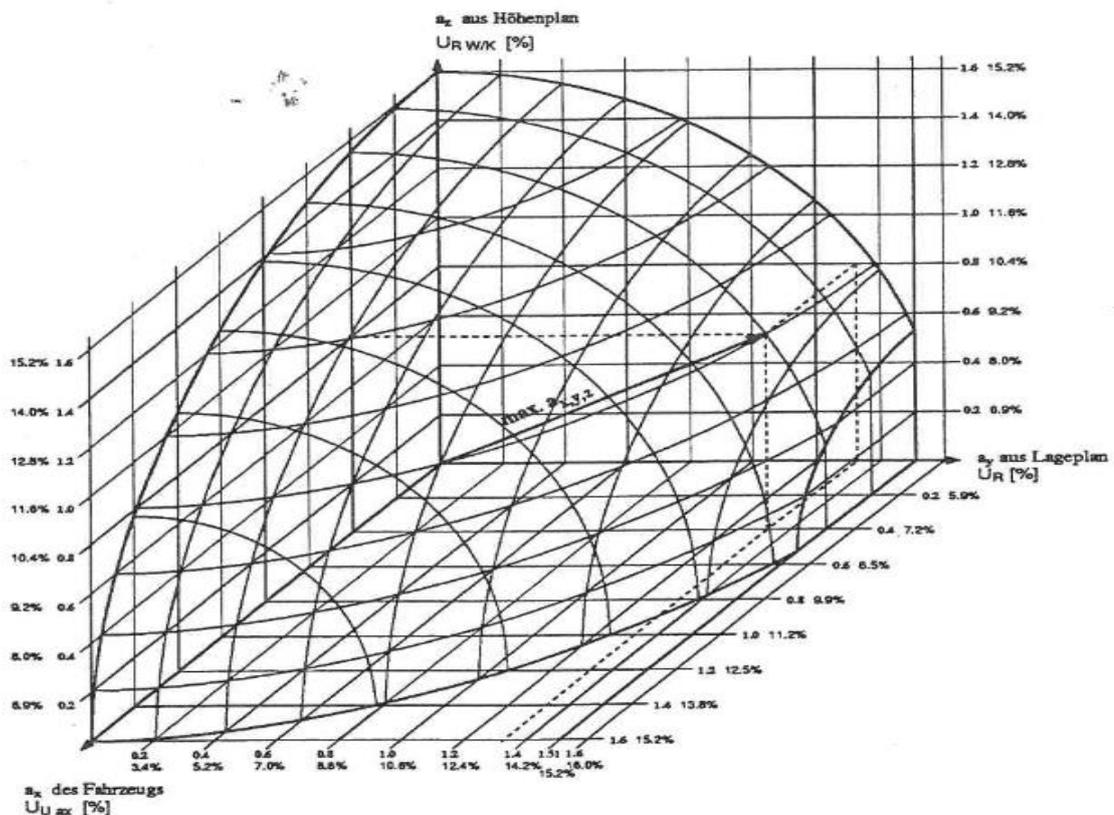


Abbildung 57: Dreidimensionale Beschleunigung ([48], S. 90)

Gemäß experimentellen Untersuchungen bei British Railways hat HOHNECKER in [48] die mehrdimensionale Beschleunigung $a_{x,y,z}$ definiert (Abbildung 57), die sich auf den Fahrkomfort der Fahrgäste bzw. des zu transportierenden Guts als wichtiges Kriterium für die Trassierung einer Strecke auswirken und als Unzufriedenheitsgrad U bezeichnet wird.

Mit dem Unzufriedenheitsgrad U aus [48] können sowohl mehrdimensionale Beschleunigung als auch beschleunigungsabhängige Trassierungselemente und Gleisparameter wie Bogenradius, Überhöhung, Überhöhungsfehlbetrag, Ausrundungsradien usw. ermittelt werden.

Die Vorteile der Methode nach HOHNECKER sind:

- es werden alle Trassierungsparameter im Lage- und Höhenplan berücksichtigt
- die Trassierung einer NBS kann oberflächennah (d.h. möglichst ohne Tunneln und großen Brücken) geplant werden
- auch Züge mit höheren Geschwindigkeiten (bis zu $V_{max} = 400\text{km/h}$) haben keine Fahrkomforteinbuße

Es können auch enge Radien und größere Neigungen bestimmt werden.

3.1.10 Zusammenfassung der Methoden zur Linienführung und Trassierung

Tabelle 18 zeigt Beispiele der beschriebenen Methoden, sowie deren hauptsächliche Einsatzgebiete.

Tabelle 18: Zusammenfassung der Forschungsarbeiten zur Streckenermittlung (Eigene Darstellung)

Autor	Methode	Nur für Lageplan (2-dimensional)	Nur für Höhenplan (2-dimensional)	Für Lage- und Höhenplan (3-dimensional)
HOWARD, et.al. [53]	Variationsrechnung	x		
SHAW, et.al. [113]	Variationsrechnung	x		
TRIETSCH [118]	Network Optimization	x		
EASA [30]	Enumeration		x	
REVELLE, et al. [94]	LP		x	
PAN [87]	GA	x	x	
ZHANG [156]	Hybrider Algorithmus	x	x	
DE SMITH [17]	DT			x
LI, et al. [69]	DT			x
CHENG, et.al. [15]	heuristischer Algorithmus			x
HOHNECKER [48]	Mehrdimensionale Beschleunigung			x

Die Vor- und Nachteile der dargestellten Methoden zur Ermittlung einer Eisenbahnstrecke sind in der *Tabelle 19* aufgeführt

Tabelle 19: Vor-/Nachteile der Methoden (Eigene Darstellung)

Methoden	Vorteile	Nachteile
Enumeration	<ul style="list-style-type: none"> • Erhalt der tatsächlichen Linienform • finden des „globalen Optimums“ 	<ul style="list-style-type: none"> • unbegrenzte Anzahl von Aufzählungsschemata • nicht für kontinuierlichen Untersuchungsraum geeignet
Variationsrechnung	<ul style="list-style-type: none"> • geeignet für den kontinuierlichen Untersuchungsraum • findet „global-optimale Lösungen“ 	<ul style="list-style-type: none"> • differenzierbare Zielfunktion • zeitaufwändige Berechnung
Network Optimization	<ul style="list-style-type: none"> • funktioniert einfach 	<ul style="list-style-type: none"> • großer Speicherraumbedarf • nicht für kontinuierlichen Untersuchungsraum geeignet
Linear Programming	<ul style="list-style-type: none"> • geeignet für den kontinuierlicher Untersuchungsraum • funktioniert einfach 	<ul style="list-style-type: none"> • muss eine lineare Form für alle Kostenelemente haben
Genetische Algorithmen	<ul style="list-style-type: none"> • Erhalt der tatsächlichen Raumkurve • geeignet für den kontinuierlichen Untersuchungsraum 	<ul style="list-style-type: none"> • Lösungsvielfalt ist nicht gut • Konvergenz zu einer einzelnen Lösung, nicht geeignet für den Lösungsvergleich und die -auswahl
Heuristischer Algorithmus	<ul style="list-style-type: none"> • Erhalt der tatsächlichen Raumkurve • geeignet für den kontinuierlichen Untersuchungsraum 	<ul style="list-style-type: none"> • generiert „lokal-optimale Lösungen“
Distance Transform	<ul style="list-style-type: none"> • Erhalt der tatsächlichen Raumkurve • geeignet für den kontinuierlichen Untersuchungsraum 	<ul style="list-style-type: none"> • großer Speicherraumbedarf
Methode nach HOHNECKER	<ul style="list-style-type: none"> • oberflächennah • Fahrkomfort gewährleistet 	<ul style="list-style-type: none"> • kein Software zur automatischen Berechnung vorhanden

Aus *Tabelle 18* und *Tabelle 19* ist ersichtlich, dass bei der Verwendung von DT zum Entwerfen einer Strecke die horizontale und die vertikale Ebene gleichzeitig eingeschränkt werden kann. Daher wird in dieser Arbeit DT zu der Linienführung einer Eisenbahnstrecke verwendet.

Die in dieser Arbeit entworfene NBS soll möglichst oberflächennah geführt, den geometrischen Randbedingungen gerecht werden und gleichzeitig die für den ITF notwendigen Geschwindigkeiten erreichen. Dabei spielt die Änderung der Beschleunigungen und deren Überlangerungen eine wichtige Rolle bei der Bestimmung der Trassierungselemente (Radius, Überhöhung, etc.), so dass der Unzufriedenheitsgrad U berücksichtigt wird.

3.2 Aktuelle Verfahren der Fahrzeitermittlung

3.2.1 Bewegungsablauf eines Zuges

Die Fahrzeitermittlung ist eine der wichtigsten Anwendungen der Fahrdynamik ([71] und [84]). Anhand der Fahrzeug- und Streckendaten wird die FSL einer Zugfahrt berechnet.

Wie in *Abbildung 58* dargestellt wird die Berechnung der Fahrzeit dazu verwendet, um die Geschwindigkeitskurve eines Zuges zu bestimmen. Die x-Achse repräsentiert die zu befahrende Strecke s und die y-Achse die Geschwindigkeit v .

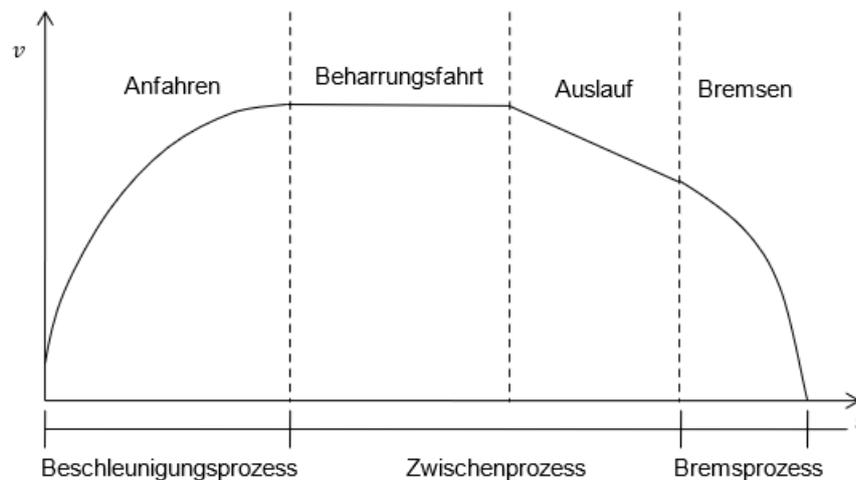


Abbildung 58: Geschwindigkeitskurve eines Zuges ([84], S. 30)

Im Allgemeinen ist die Zuggeschwindigkeitsgraphik in drei Teile unterteilt:

Beschleunigungsprozess

- Der Zug beschleunigt aus dem Stillstand auf eine vorgegebene Geschwindigkeit v bzw. die Höchstgeschwindigkeit v_{\max}

Zwischenprozess

- Der Zug fährt möglichst mit konstanter Geschwindigkeit v_{konst} bis zur nächsten Geschwindigkeitsänderung Δv
- Anschließend kann der Zug, je nach Streckenprofil, mit reduzierter Geschwindigkeit v_{zul} fahren

Bremsprozess

- Zuletzt erfolgt die Bremsphase, die Zuggeschwindigkeit nimmt mit der zurückgelegten Strecke ab und der Zug hält schließlich am Zielpunkt

3.2.2 Mikroschrittverfahren

Da Änderungen der Streckenparameter (z.B. Bogen und Neigung) in kurzen Abständen folgen können, kann dies zu einer ständigen Änderung der Zugkraft des Tfs führen. D.h.

Die Geschwindigkeit wird beibehalten, reduziert oder gesteigert. Eine kontinuierliche Berechnung dieser Bewegungsvorgänge kann nicht durchgeführt werden.

Nach [138] wird zur Berechnung der Zugsbewegung eine schrittweise Integration verwendet. Die dazu verwendeten Mikroschrittverfahren, die mit sehr kleinen Schrittintervallen arbeiten, werden in Zugfahrungsprogrammen eingesetzt. Die Lösung der Problemstellung wird nach [138] wie folgt durchgeführt:

1. *„Eingabe der Variablen“*
„Die Variablen des Anfangszustands v_A, t_A und s_A sowie die Schrittweite werden festgelegt.“
2. *„Ermittlung der Stützstellen“*
„Die v_A umschließenden Stützstellen $P_x (v_x, a_x)$ und $P_{x+1} (v_{x+1}, a_{x+1})$ werden ermittelt. Der Verlauf der Beschleunigung $a(v)$ zwischen 2 Stützstellen wird (Anmerkung: wegen der Kürze) als Gerade dargestellt.“
3. *„Anpassung der Zählvariablen der Stützstellen“*
„Überschreitet die Endgeschwindigkeit v_E eines Simulationsschritts das aktuelle Stützstellenintervall, wird die Zählvariable der Stützstellen um 1 erhöht oder erniedrigt, so dass v_A wiederum von 2 Stützstellen umschlossen wird.“

Die Genauigkeit der Mikroschrittverfahren hängt direkt von der Schrittweite des berechneten Bereiches ab.

Grundsätzlich wird zwischen den folgenden drei Mikroschrittverfahren unterschieden [138]:

- Mikrozeitschrittverfahren
- Mikrogeschwindigkeitsschrittverfahren
- Mikrowegschrittverfahren

Mikrozeitschrittverfahren (Δt - Schrittverfahren)

Das Δt -Schrittverfahren ist das einfachste Mikroschrittverfahren. Es basiert auf äquidistanten Zeitschritten Δt , die normalerweise 0,1 sec betragen. Mit dem Δt -Schrittverfahren können spezielle Fahrdynamikprozesse simuliert werden (z.B. das Anfahren und Bremsen, Kraftstoff- und Energieverbrauchsrechnungen) ([71] und [138]).

Mikrogeschwindigkeitsschrittverfahren (Δv - Schrittverfahren)

Um die Fahrzeit im mikroskopischen Modell explizit zu berechnen, wird häufig das Δv -Schrittverfahren verwendet [138]. Beim Δv -Schrittverfahren werden Intervalle mit gleichbleibenden Geschwindigkeitsschritten Δv berechnet.

Wenn ein Zug sich der Beharrung nähert, muss auf diese gewechselt werden, da die Weg- bzw. Geschwindigkeitsschritte zu einer Division durch Null ($a = 0$) kommen ([71] und [138]).

Vor dem Ausführen des Simulationsschritts muss der Vorzeichenfaktor von $\Delta v(j)$ zugewiesen werden, da auf diese Weise unterschieden wird, ob die Geschwindigkeit erhöht oder verringert wird [138].

Mikrowegschrittverfahren (Δs -Schrittverfahren)

Im Δs -Schrittverfahren wird eine Strecke je nach Bedarf in kleine Wegschritte Δs unterteilt, indem $s_{BC} = s_{BC} = \dots = \Delta s$ ist (Abbildung 59). Da die Wegschritte Δs klein sind, wird die Geschwindigkeitsänderung Δv in jedem Abschnitt als linear betrachtet.

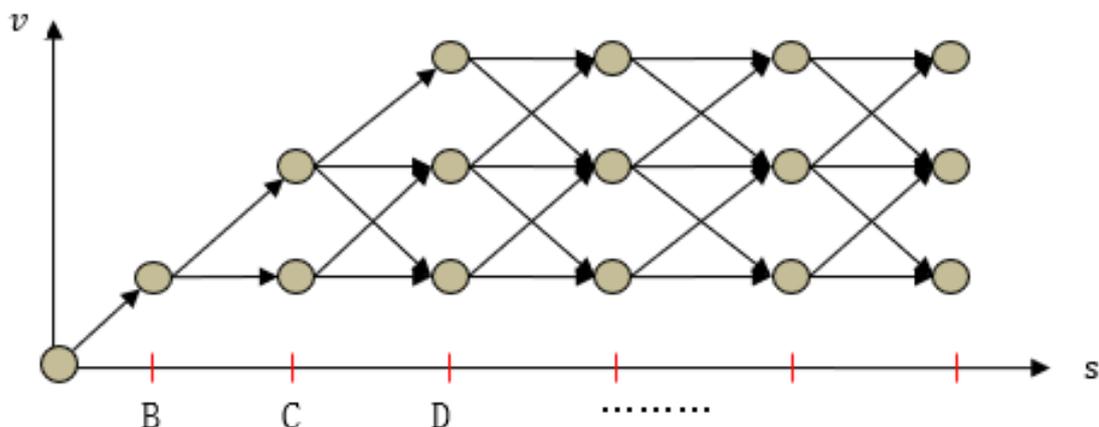


Abbildung 59: Geschwindigkeitsprofil nach dem Mikrowegschrittverfahren zum Modell von [8]

Das Fahrverhalten in jedem Wegschritte Δs muss bestimmt werden: Beschleunigen, Beharrungsfahrt, Auslaufen oder Bremsen. Nach der Feststellung des Fahrverhaltens wird die Fahrzeit für jeden Wegschritt Δs ermittelt.

Das Mikrowegschrittverfahren eignet sich für spezielle Untersuchungsstellen, z.B. an Bahnhöfen und Haltepunkten (in dieser Arbeit speziell ITF-Knoten) oder an Neigungsänderungen [138].

3.2.3 Methoden zur Fahrzeitermittlung

Die Formulierung des Fahrplans basiert in dieser Arbeit auf der ITF-Fahrzeit des Zuges zwischen den ITF-Knoten (vgl. Tabelle 23). D.h.:

Die Bestimmung einer ITF-konformen FSL zwischen den ITF-Knoten ist Voraussetzung für die ITF-konforme Fahrplankonstruktion.

Im Folgenden werden einige der bestehenden Methoden zur Berechnung von Zugfahrzeiten/FSL beschrieben.

3.2.3.1 Numerische Algorithmen

Ein „numerischer Algorithmus“ zur Bestimmung der optimalen Fahrgeschwindigkeitsverteilung eines Zuges wird in [62] vorgestellt.

Der Autor geht davon aus, dass der Zug einen Massepunkt darstellte und betrachtete die Bestimmung der FSL des Zuges als ein Zugsteuerungsproblem. Unter Berücksichtigung der

Fahrwegneigung, der maximalen Zug- und Bremskraft und der Geschwindigkeitsbegrenzungen wurde ein Optimierungsmodell mithilfe des Maximumprinzips für das Geschwindigkeitsprofil eines Zuges, mit der kinetischen Energie E_{kin} als Variable, entwickelt.

Ziel von [62] ist es, ein detailliertes Programm für Traktions- und Bremsanwendungen zu erstellen, das den Energieverbrauch beim Bewegen des Zuges auf einer definierten Strecke für eine bestimmte Zeit minimiert.

Obwohl der Algorithmus anhand des numerischen Beispiels in [62] einfach zu bedienen ist, behandelt das Modell den Zug als Massepunkt, so dass das Berechnungsergebnis in der mikroskopischen Betrachtung von der tatsächlichen Situation eines „Massebands“ abweichen kann.

3.2.3.2 Genetische Algorithmen (GA)

Im Bahnbetrieb wird die Einhaltung des Fahrplans i.d.R. durch die vorgegebenen Fahrzeiten der Züge erreicht. Die entsprechende Auslaufsteuerung (Bestimmung der Positionen, wo der Auslauf beginnen und enden soll) kann nicht nur den vorgegebenen Fahrplan einhalten, sondern auch Energie sparen [14].

In [14] wurde ein GA vorgeschlagen, um die Zugbewegungen durch eine geeignete Auslaufsteuerung zu optimieren. Diese Auslaufsteuerung ändert sich nach [14] mit dem Abstand zwischen den Zielpunkten (z.B. Bahnhöfe oder Signale) und bei Neigungsprofilen. Mittels des GA wird bestimmt, wo der Auslauf gestartet oder beendet werden soll, indem die Trassierungsparameter, der Komfort (in Form von Beschleunigungen) und der Energieverbrauch während der digitalen Fahrt des Zuges berechnet werden.

Basierend auf dem Multi-Ziel-Modell der Zuggeschwindigkeitskurve im Automatic Train Operation (ATO) System⁶⁷ wurde in [38] für die Optimierung der ATO-FSL ein GA verwendet. Die Autoren von [38] hatten zunächst eine Reihe von Zielfunktionen festgelegt: Pünktlichkeit, genaue Halteposition, Komfort und Energieverbrauch des Hochgeschwindigkeitszuges. Dann haben sie eine vorgegebene Strecke als GA-Suchraum in gleich große Intervalle unterteilt. Schließlich wurde die optimale ATO-FSL berechnet, so dass alle Zielfunktionen erfüllt sind.

67 ATO ist ein automatisches Steuerungssystem, d.h. entsprechend den Fahrzeugeigenschaften, Längsneigung, Bogen usw. wird der Zug zum Beschleunigen oder Abbremsen ganz oder teilweise vom Computer gesteuert. ATO wird in vier Stufen unterteilt [94]:

- GoA1: nicht-automatisches Fahren
- GoA2: teilautomatisches Fahren mit Fahrer
- GoA3: fahrerloses Fahren
- GoA4: vollautomatisches Fahren

Obwohl GA einfach zu implementieren sind, ist das „global-optimale Ergebnis“ nicht garantiert.

Die dargestellte Methode dient hauptsächlich zur Berechnung der Einsparung des Energieverbrauchs in Abhängigkeit der ATO-FSL. Die Nebenbedingung „Fahrzeit“ wird i.d.R. durch die Mindestfahrzeit begrenzt.

Es wurde nicht untersucht, ob diese Einschränkung den Anforderungen der Fahrplankonstruktion entspricht. Darüber hinaus bezieht sich das Berechnungsergebnis mit nichtlinearen Modellen auf die voreingestellte Anzahl von Iterationen und ist nicht reproduzierbar.

3.2.3.3 Mixed Integer Linear Programming (MIP)

In [139] wurde für die Infrastruktur- und genaue fahrdynamische Angaben das MIP-Modell verwendet. Dabei spielen die mittlere Abweichung von den gewünschten Werten der Ankunfts- und der Abfahrtszeiten, die ausreichende Pufferzeit sowie die mittlere Unterschreitung der Sollfahrzeitreserven eine Rolle, um die technisch fahrbare FSL mit der zugehörigen Sperrzeitentreppe zu bestimmen.

Um eine FSL des Bremsvorgangs zu ermitteln, wurde in [74] auch die MIP angewendet. Die Autoren von [74] gehen davon aus, dass die Geschwindigkeit des Fahrzeugs beim Bremsen monoton abnimmt und die FSL auf einen vorgegebenen Wegabstand und Zeitbereich begrenzt ist. Einschränkungen (wie Geschwindigkeitsbegrenzung, Neigung und Fahrzeugeigenschaften) können, basierend auf der Annahme der Monotonie, von der Geschwindigkeitssequenz linearisiert werden, um die optimale Geschwindigkeitslösung zu finden.

In [70] wurde ein reproduzierbares Modell zur Entscheidungsunterstützung in Verspätungsfällen zwischen Bahnhöfen entwickelt. D.h.:

Eine neue zulässige FSL wird berechnet, wenn eine Verspätung eines Zugs aufgetreten ist, sodass alle Züge konfliktfrei die Strecke befahren können.

Nach [70] sind die Ankunfts- und Abfahrtszeiten der Züge kontinuierliche Variable. Gleichzeitig darf als diskrete Variable nur eine FSL für jeden Zug gewählt werden. Daher wurde die FSL mit MIP unter Berücksichtigung der Fahrdynamik formuliert und modelliert.

Mit MIP kann nicht nur die FSL berechnet werden, vielmehr sind auch die Ergebnisse der Untersuchung reproduzierbar. In der vorliegenden Arbeit wird daher die FSL anhand des MIP-Modells berechnet. Das Berechnungsverfahren wird im Kapitel 3.3.2 ausführlich beschrieben.

3.3 Entwicklung eines Modells für die Linienführung und Trassierung einer NBS

Ziel dieser Untersuchung ist es, die bisher bekannten Verfahren zur Bestimmung von C^{-1} zu erweitern und ein Werkzeug zu entwickeln, mit dem eine NBS durch Knoten und Abschnitten der Freien Strecke beschrieben werden kann.

Zunächst wird die Linienführung einer NBS zwischen zwei ITF-Knoten entworfen, was in dieser Arbeit in zwei Phasen unterteilt wird:

1. Ermittlung möglicher Linienführungen zwischen den beiden ITF-Knoten unter Berücksichtigung der geometrischen Beschränkungen (z.B. Bogen, Neigung, usw.)
2. Auswahl der optimalen Linienführungen anhand der ITF-Fahrzeit eines Zuges, die sich in einen zukünftigen ITF einfügen müssen

3.3.1 Entwurf möglicher Linienführungen mittels DT

Das übergeordnete Ziel der Gestaltung einer Eisenbahnlinienführungsauswahl besteht darin, die Anforderungen an den Schienenverkehr zu erfüllen, wobei möglichst hohe Belastungen berücksichtigt werden müssen.

Die Linienführung einer NBS zu entwerfen, die den zukünftigen Verkehrsanforderungen entspricht, wird hauptsächlich unter folgendem Aspekt betrachtet:

Ist es möglich die Fahrzeit zwischen zwei ITF-Knoten so zu legen, dass die ITF-Bedingungen erfüllt werden?

Häufig geht dies einher mit einer Erhöhung der zulässigen Geschwindigkeit *zul v* und/oder Verkürzung der Streckendistanz.

Nach Kapitel 2.2.2 sind die Beziehungen zwischen Trassierungsparametern, Zugeigenschaften und Auswirkungen auf die Fahrzeiten in *Tabelle 20* dargestellt.

Tabelle 20: Zusammenhang zwischen Trassierungsparametern, Zugeigenschaften und Auswirkungen auf die Fahrzeit (Eigene Darstellung)

Trassierungs-/Gleisparameter		Zugeigenschaften	Auswirkungen auf die Fahrzeit
Lageplan	Bogen	Höchstgeschwindigkeit	zulässige Geschwindigkeit auf verschiedenen geometrischen Elementen (z.B. Bogen, Längsneigung)
	Überhöhung, Überhöhungsfehlbetrag		
Höhenplan	Längsneigung	erforderliche Zug- / Bremskraft	
	Kuppen-/Wannen-ausrundung	zulässige maximale Geschwindigkeit	

Ziel der Ermittlung einer Linienführung:

Optimale Auswahl der Linienführung einer Eisenbahnstrecke zwischen zwei ausgewiesenen ITF-Knoten.

Theoretisch müsste die optimale Strecke anhand aller Auswahlmöglichkeiten⁶⁸ vom Startpunkt bis zum Ziel entwickelt werden. Diese Vorgehensweise, ist jedoch sehr zeitaufwändig. Um dies bei der Gestaltung der Linienführung zu vermeiden, werden die Zeitaufwendungen durch Entwurfsnebenbedingungen eingeschränkt.

I.A. können die wichtigsten Kriterien, die beim Entwurf der Linienführung berücksichtigt werden müssen, in zwei Ebenen unterteilt werden:

- Ebene 1:
Lageplan Eine Strecke besteht aus Geraden und Bogen im Lageplan. Der kürzeste Abstand wird als Ziel für die Bestimmung der Linienführung herangezogen.
- Ebene 2:
Höhenplan Der wichtigste Trassierungsparameter im Höhenplan ist die Neigung I . Der Neigungswinkel α und die Neigungslänge s_{Neigung} wirken sich direkt auf die Geschwindigkeit v und die Befahrbarkeit⁶⁹ aus.

3.3.1.1 Distance Transform (DT)

Nach [17] bietet die DT eine sehr einfache und schnelle Methode zur Approximation euklidischer Abstände von jeder Zelle eines rechteckigen Gitters zur nächsten Zelle. Die Abstände über die Gitter werden, basierend auf dem Abstand zu den benachbarten Zellen, in einer inkrementellen Weise berechnet. Der Ablauf wird wie folgt zusammenfasst [17]:

- Initialisierung des Abstands jeder Zelle im Gitter. Der Wert der Zielzelle ist 0 und der der anderen Zellen ist ∞
- Durchführung eines Zwei-Pass-Scans der Gitterdaten:
 - ein Vorwärtsscan von oben links nach unten rechts
 - dann ein Rückwärtsscan von unten rechts nach oben links
- Wenn eine Zelle gescannt wird, wird die Mitte der Adjazenzmatrix darübergerlegt und das Element $d_{z,s}$ wird zum Wert der Zelle addiert

Wie *Abbildung 60* zeigt, wird die Adjazenzmatrix als 5×5 quadratisches Gitter G_Q mit dem Wert $d_{z,s}$ in jeder Zelle beschrieben. Der neue Wert dieser Zelle ist das Minimum aller Summen. Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis sich kein Zellenwert mehr ändert. Der Endwert jeder Zelle im Gitter ist der Mindestabstand zum Ziel.

68 Auswahlmöglichkeiten bedeutet: alle Linienführungen, bei denen die Trassierungsparameter den Auslegungskriterien bzw. Richtlinie sowie den ITF-Bedingungen entsprechen.

69 Die Bewegung des Zuges in einer Neigung hängt vom Neigungswinkel α selbst, der Neigungslänge s_{Neigung} und der Geschwindigkeit v des Zuges ab. Aufgrund der großen Zugmasse m_{Zug} und der in steilem Gelände unzureichenden Traktion des Triebfahrzeugs bzw. der vorhandenen unzureichenden Bremstechnik im Gefälle kann es vorkommen, dass der gesamte Zug eine Neigung nicht bewältigen kann. Dies bedeutet: Ausnutzung der Schwungfahrt (s. Kapitel 2.3.4 und Kapitel 3.3.1.2.1), Zugteilung, Schub-/Bremslok.

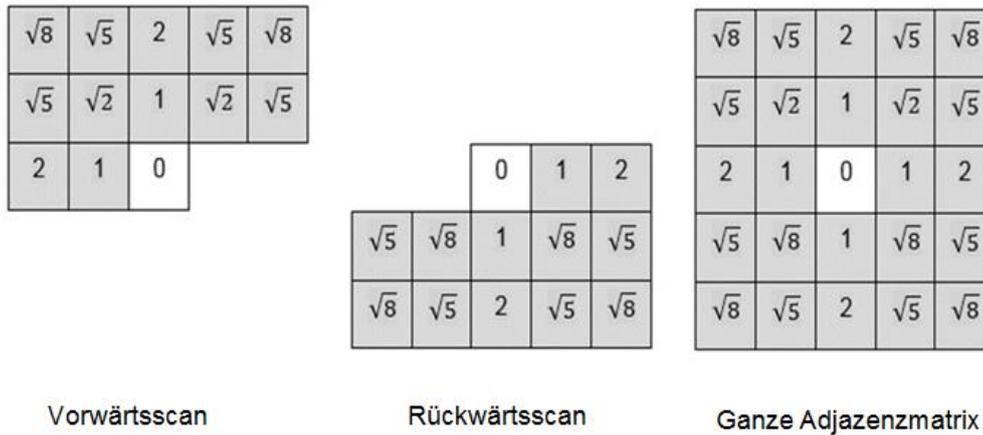
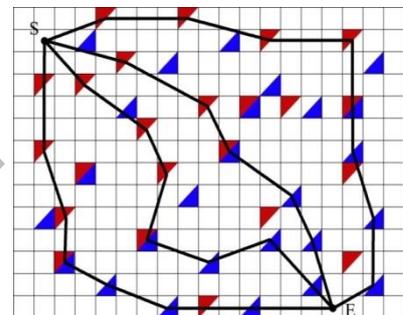
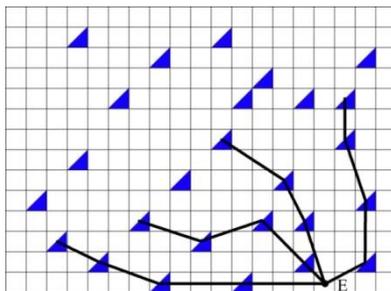
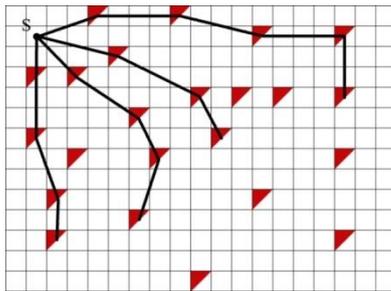


Abbildung 60: 5x5 Adjazenzmatrix der DT [69]

Wie *Abbildung 61* zeigt, wird der Abstand zwischen dem Startpunkt als Zielpunkt und den benachbarten Punkten berechnet. Der Punkt mit dem kleinsten Abstand, der gleichzeitig die vorgegebenen Bedingungen erfüllt, wird als Zielpunkt für die nächste Berechnung markiert (Rote Punkte in *Abbildung 61*).

Berechnung mit dem Startpunkt als Zielpunkt



S: Startpunkt
E: Endpunkt

Berechnung mit dem Endpunkt als Zielpunkt

Abbildung 61: Generierte Routen durch DT ([69], Ergänzung ZHAO)

Die ausgewählten blauen Punkte stellen die Lösungen dar, die sich durch die Berechnung des Mindestabstands zwischen dem Endpunkt als Zielpunkt und den benachbarten Punkten ergeben.

Danach werden die generierten Punkte zusammengeführt. Dadurch werden alle verfügbaren Polygonzüge zwischen Start- und Endpunkt erhalten (*Abbildung 61* rechts).

Nach [17] und [69] wird für DT folgendes definiert:

p = zufällige Zelle im Gitter

$D(p)$ = minimaler Abstand von p zur Zielzelle

$d_{z,s}$ = euklidischer Abstand der Zelle (Zeile z , Spalte s in der Matrix G_Q) zur mittleren Zelle

$\Delta Z(p)$ = inkrementelle Zeilenbewegungen in p auf dem entsprechenden kürzesten Weg

$\Delta S(p)$ = inkrementelle Spaltenbewegungen in p auf dem entsprechenden kürzesten Weg

$D(p)$, $\Delta Z(p)$ und $\Delta S(p)$ werden in dieser Zelle gespeichert. Wenn die Bewegung von unten oder rechts zu oben/links erfolgt, werden $\Delta Z(p)$ und $\Delta S(p)$ als negativ beschrieben.

Der Standardalgorithmus initialisiert zuerst die Werte $D(p)$, $\Delta Z(p)$ und $\Delta S(p)$ für alle Zellen:

$$D^0(p) = \begin{cases} 0 & p \in \text{Ziel} \\ \infty & p \notin \text{Ziel} \end{cases} \quad (3-1)$$

$$\Delta Z(p) = 0 \quad (3-2)$$

$$\Delta S(p) = 0 \quad (3-3)$$

Ziel = Zielzelle

$D^0(p)$ = ursprünglicher Wert in p (ohne Iteration)

Anschließend wird ein Zwei-Pass-Scan der Gitterdaten durchgeführt: Wenn die Zelle p gescannt wird, werden ihre Werte durch die folgende Gleichung aktualisiert

$$D^m(p) = \min\{D^{m-1}(q) + d_{z,s}, d_0\} \quad (3-4)$$

$$\Delta Z(p) = z \quad (3-5)$$

$$\Delta S(p) = s \quad (3-6)$$

$D^m(p)$ = Wert in p für die m -te Iteration (= die zentrale Zelle in der Adjazenzmatrix)

q = zufällige Zelle in der Adjazenzmatrix

$D^{m-1}(q)$ = aktueller Abstandswert in q

$d_{z,s}$ = euklidischer Abstand der Adjazenzmatrix von p zu q

d_0 = initialisierter Abstand jeder Zelle bzw. 0 oder ∞

Abbildung 62 stellt den einfachen Fall dar, in dem der Minimalwert von $D^{m-1}(q) + d_{z,s}$ (Wert der gelben Zelle) erhalten wird.

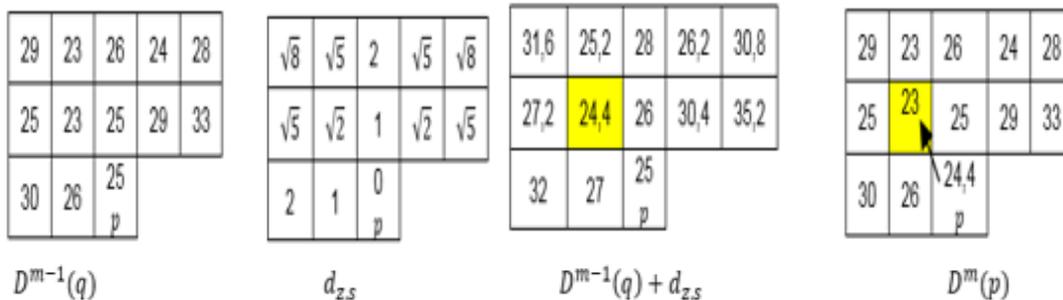


Abbildung 62: Beispiel für die Aktualisierung des Abstands mittels DT [69]

Die daraus folgenden neuen Werte sind:

$$D^m(p) = 24,4 \quad (3-7)$$

$$\Delta Z(p) = -1 \quad (3-8)$$

$$\Delta S(p) = -1 \quad (3-9)$$

3.3.1.2 Modellierung der Linienführung und Trassierung

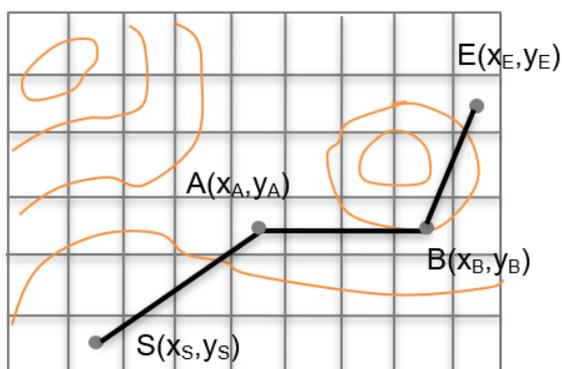
Um direkt auf einer digitalen topographischen Karte den möglichen Weg zu finden der die Bedingungen erfüllt, wird in dieser Arbeit DT verwendet. I.A. gibt es dabei folgende Anforderungen:

- Entwurf aller möglichen Linienführungen zwischen zwei Zielpunkten, wobei die Einschränkungen (z.B. ganze Länge und maximale Neigung) erfüllt werden müssen
- Einfügung aller Trassierungsparameter in alle möglichen Linienführungen aus dem DT-Verfahren anhand der geometrischen Nebenbedingungen, wie Radius, Überhöhung usw.

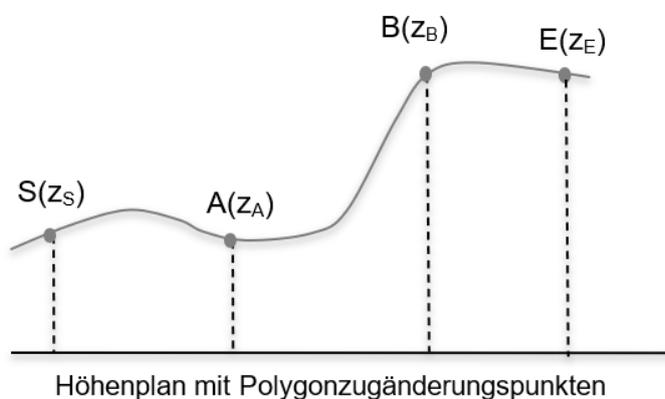
3.3.1.2.1 Suche möglicher Linienführungen

Um die neue Strecke zwischen zwei ITF-Konten zu bestimmen, muss zunächst die digitale topographische Karte des geplanten Gebiets vorliegen. Dieser werden die geometrischen Informationen des geplanten Gebiets entnommen (z.B. die Entfernung zwischen den Zielen und die Höhenänderungen innerhalb des gesamten Gebiets). Für dieses Vorgehen wird die digitale topographische Karte in Zellen unterteilt.

Die 3D-Koordinaten-Informationen (x, y, z) des Mittelpunkts jeder Zelle können so ermittelt werden, wobei x und y jeweils einen Positionspunkt im Lageplan darstellen und z die Höhe des Punktes im Höhenplan (*Abbildung 63*).



Polygonzug im zellenunterteilten Lageplan mit Höhenlinie



Höhenplan mit Polygonzugänderungspunkten

Abbildung 63: Darstellung von Geländeinformationen zwischen den Änderungspunkt im Polygonzug

Obwohl anhand der Gleichungen (3-1) bis (3-6) der kürzeste Laufweg berechnet werden kann, sollten in der Praxis zwei Einschränkungen berücksichtigt werden:

- Umwegfaktor U_F
- Längsneigung I

Umwegfaktor

Der Umwegfaktor U_F „... einer Verkehrsverbindung drückt das Verhältnis des kürzesten bzw. des gewählten Laufwegs zwischen zwei Knoten und der Luftlinienentfernung dieser Knoten aus“ [37].

Nach [17] wird die Reiseentfernung aus der Reisedauer t_{Reise} und der Entfernung s zwischen den ITF-Knoten unter Berücksichtigung geschwindigkeitsabhängiger Umwegfaktoren berechnet. Aufgrund der Einschränkungen aus der Bau- und Fahrzeugtechnologie wurde der Bau von Eisenbahnstrecken in Gebieten mit deutlichen Höhenänderungen i.d.R. vermieden. Vielmehr wurde versucht, in Gebieten mit flachem Gelände zu bauen. Infolge dieser Linienführung, die große Höhendifferenzen Δh meidet, ist der Wert des Umwegfaktors U_F in flachen Geländen kleiner als im Hügel-, Bergland oder Gebirge, ausgenommen Basistunnel.

Diese Untersuchung wird mit Blick auf eine zukünftige NBS vorgenommen. Es wird davon ausgegangen, dass die Bau- und Fahrzeugtechnologie die Anforderungen der Strecke in Gebieten mit deutlichen Geländeänderungen erfüllen kann. Das bedeutet:

Der Umwegfaktor U_F wird i.V.m. einer möglichst oberflächennahen Linienführung verringert und dadurch die Entfernung s zwischen zwei ITF-Knoten verkürzt.

Hierzu muss Folgendes erfüllt sein:

$$l_{SP} + l_{PE} = U_F \cdot l_{SE} \quad (3-10)$$

l_{SP} [m] = Abstand zwischen dem Startpunkt S und einem definierten Punkt P im Untersuchungsgebiet

l_{PE} [m] = Abstand zwischen dem Endpunkt E und dem definierten Punkt P im Untersuchungsgebiet

l_{SE} [m] = Abstand zwischen Startpunkt S und Endpunkt E

U_F = Umwegfaktor

Steigung und Schwungfahrt

In der Vertikalen wirkt sich die Höhendifferenz Δh sowohl auf die zulässige Geschwindigkeit v als auch auf die potentielle Energie E_{pot} aus. Um die Bewegungsenergie E_{kin} eines Zuges zu nutzen, kann nach [48] die Schwungfahrt⁷⁰ in einer Längsneigung I berücksichtigt werden.

70 Siehe Kapitel 2.3.4

Die Höhendifferenz Δh ergibt sich unter Berücksichtigung des spezifischen Fahrzeugwiderstandes f_{WZ} und spezifische Neigungswiderstandes f_N (siehe Kapitel 2.3.4), aus Gleichung (2-118) wie folgt:

$$\Delta h = \frac{v^2 \cdot f_N}{2 g \cdot (f_{WZ} + f_N)} \quad (3-11)$$

f_{WZ} [‰] = spezifischer Neigungswiderstand

f_N [‰] = spezifischer Fahrzeugwiderstand

Wenn ein Zug eine große Steigung I befährt, ist i.d.R. die Länge s der Steigung I gegenüber einer flacheren Steigung I über den gleichen Höhenunterschied Δh geringer. Wenn dabei die maximale Zugkraft F_T des Zuges geringer ist als der Neigungswiderstand F_N , kann der Zug das Steigungsende mit der aus der potentiellen Energie E_{pot} umgesetzten gespeicherten Hubarbeit W_{pot} in die Beschleunigungsarbeit W_{kin} (Schwungfahrt) selbst oder mit Unterstützung seiner installierten Leistung P erreichen (vgl. *Tabelle 14*).

Befährt ein Zug mit konstanter Geschwindigkeit v_{konst} eine Steigung, muss er den Fahrzeugwiderstand F_{WZ} und Streckenwiderstand F_{WStr} überwinden. Diese Widerstände können als negative Beschleunigung betrachtet werden, die der Zugkraft T_{fz} entgegenwirken.

$$P_{gesamt} = P_a = P_{kin} + P \quad (3-12)$$

$$F_a \cdot v = F_{kin} \cdot v + T_{fz} \cdot v \quad (3-13)$$

P_{gesamt} [J/s] = Σ –power vom Steigungsanfang bis zum Steigungsende

P_a [J/s] = Σ –power bei der Beschleunigung

P_{kin} [J/s] = Power aus der kinetischen Beschleunigungskraft

P [J/s] = installierte Leistung

F_a [N] = Beschleunigungskraft

F_{kin} [N] = Zugkraft aus der kinetischen Beschleunigungsarbeit

T_{fz} [N] = Zugkraft in T_{fz} ist gleich installierte Leistung P

Die kinetische Energie E_{kin} ergibt sich aus der potenziellen Energie E_{pot} unter Berücksichtigung des Widerstands F (F_{WZ} und F_{WStr}), so dass die Gleichung (3-12) nach [48] und [138] als Arbeit aus der Beschleunigungskraft W_{kin} durch die Neigung I gesehen werden kann:

$$W_{kin} = F_{kin} \cdot v \cdot t = W_{pot} = (F_N + F_{WZ}) \cdot v \cdot t = (F_N + F_{WZ}) \cdot s \quad (3-14)$$

$$F_a \cdot v \cdot t = T_{fz} \cdot v \cdot t + m \cdot g \cdot I \cdot s + F_{WZ} \cdot s \quad (3-15)$$

$$m \cdot a \cdot s = m \cdot g \cdot t_{fz} \cdot s + m \cdot g \cdot \Delta h + m \cdot g \cdot f_{WZ} \cdot s \quad (3-16)$$

$$\frac{1}{2} m \cdot v^2 = m \cdot g \cdot t_{fz} \cdot s + m \cdot g \cdot \Delta h + m \cdot g \cdot f_{WZ} \cdot s \quad (3-17)$$

$$s [m] = \frac{\Delta h}{I} = \frac{\Delta h}{f_N} \text{ Neigungslänge}^{71}$$

71 Siehe Kapitel 2.3.2.3.1

Die mit der kinetischen Energie E_{kin} erzeugte Schwungfahrt und der installierten Leistung P überwindbare Höhendifferenz Δh berechnet sich dann mit

$$\Delta h = \frac{v^2 \cdot f_N}{2 g \cdot (t_{fz} + f_N + f_{WZ})} \quad (3-18)$$

3.3.1.2.2 Einfügung der Trassierungselemente in die möglichen Linienführungen

Der Entwurf einer Eisenbahnstrecke wird durch ihre Elemente im Lage- und Höhenplan bestimmt.

Die Elemente im Lageplan umfassen in den x und y Koordinaten die Trassierungselemente horizontaler Kreisbogenradius r , Übergangsbogen und die Übergangsbogenlänge l_U sowie die Gleisparameter u und u_f – gegebenenfalls u_u (vgl. Kapitel 2.2.2.1.3).

Die Elemente im Höhenplan umfassen in den x und z Koordinaten die Längsneigung I und den Ausrundungsradius r_a .

Um die Komplexität des Modells zu verringern, wird die Übergangsbogenlänge l_U nicht als Entwurfsvariable festgelegt, da Übergangsbogen den Zielfunktionswert nur geringfügig beeinflussen.

Nebenbedingungen

Entwurfsgeschwindigkeit

Die gemäß der DB-Richtlinie 413 [100] zulässige Höchstgeschwindigkeit für unterschiedliche Eisenbahnstrecken ist in *Tabelle 21* angegeben.

Tabelle 21: Streckenstandard und zulässige Höchstgeschwindigkeit nach [100] (Ergänzung ZHAO)

Streckenstandard	Beschreibung der Strecke	zul V_{max} [km/h]
P300 ⁷²	HVG-Strecken	300
P230	ABS	230
M230 ⁷³	ABS	230
P160	Vorhandenes Netz, Hauptbahnen	160
M160	Vorhandenes Netz, Hauptbahnen	160
G120 ⁷⁴	Güterzugstrecken	120
R120 ⁷⁵	SPNV	120-160

72 P300, HVG Personenverkehrsstrecken mit max $V = 300$ km/h

73 M230, Mischverkehrsstrecken mit max $V = 230$ km/h

74 G120, Güterverkehrsstrecken mit max $V = 120$ km/h, mit SPNV bis max $V = 160$ km/h

75 R120, Regionalverkehrsstrecken für den SPNV mit max $V = 120$ km/h bis 160 km/h

Aufgrund der Weiterentwicklung der Fahrzeug- und Streckenbautechnologie könnte der Entwurf zukünftiger NBS größere Höchstgeschwindigkeiten ermöglichen. Für zukünftige Strecken könnten die Entwurfsgeschwindigkeiten⁷⁶ höher als der Geschwindigkeitsstandard nach [100] angesetzt werden.

In [48] wurde die maximale zukünftige Höchstgeschwindigkeit auf HGV-Strecken wegen der langen Nutzungszeit der Eisenbahninfrastruktur (i.d.R. > 100 Jahre) mit $V = 400 \text{ km/h}$ unterstellt. In der vorliegenden Arbeit wird die Entwurfsgeschwindigkeit auf $V = 500 \text{ km/h}$ festgelegt.

Kreisbogenradius

Durch Berechnung ergibt sich im Lageplan (x, y-Achse) der minimale Kreisbogenradius $\min r$ jeder Krümmung und die Bogenlänge l_b . Der verwendete Kreisbogenradius r darf nicht kleiner sein als $\min r$. I.A. ist der Kreisbogenradius r umso größer, je höher die Geschwindigkeit v ist. Der Mindestwert des Kreisbogenradius r hat in Abhängigkeit der Geschwindigkeit v einen großen Einfluss auf die Trassierung und den Fahrkomfort.

Abbildung 64 zeigt die tangentielle Einfügung eines Kreisbogens ohne Übergangsbogen in die Trassierung. Bogenanfang (BA) und Bogenende (BE) sind Start- und Endpunkt des Kreisbogenradius r .

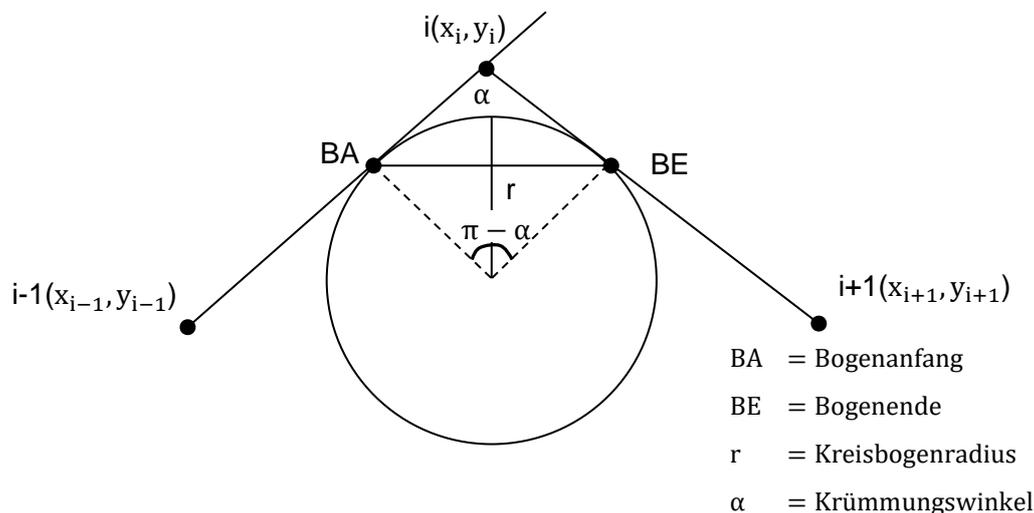


Abbildung 64: Tangentielle Einfügung eines Kreisbogens ohne Übergangsbogen in die Trassierung

Um die hohe Entwurfsgeschwindigkeit zu erreichen, soll der Kreisbogenradius r wie folget ermittelt werden:

76 Heute: S-Bahn-Strecke mit max $V = 140 \text{ km/h}$ und ABS bis zu max $V = 250 \text{ km/h}$

$$r_i = \max \left\{ 180 \text{ m}, r_{\alpha,i}, \min \left(r_{V,\min}, r_{a_q,i} \right) \right\} \quad (3-19)$$

r_i [m] = i-ter Kreisbogenradius

180 [m] = minimaler Bogenradius nach [31] (s. *Tabelle 7*)

$r_{\alpha,i}$ [m] = Radius aufgrund des Krümmungswinkels α

$r_{V,\min}$ [m] = minimaler Kreisbogenradius aufgrund der Entwurfsgeschwindigkeit V_e

$r_{a_q,i}$ [m] = Radius aufgrund der Seitenbeschleunigung in Gleiseben a_q

Die Länge der Bogen l_b lässt sich wie folgt darstellen:

$$(\pi - \alpha_i) \cdot r_i \geq \min l_b \quad (3-20)$$

α_i [°] = Winkel der i-ten Krümmung

$\min l_b$ [m] = Mindestlänge des Bogens

Die Länge der Geraden zwischen zwei benachbarten Bogen wird wie folgt ermittelt:

$$l_g = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2} - r_{i-1} \left| \tan \frac{\pi - \alpha_{i-1}}{2} \right| - r_i \left| \tan \frac{\pi - \alpha_i}{2} \right| \geq \min l_g \quad (3-21)$$

x_i = horizontale Koordinate des i-ten Punktes

y_i = vertikale Koordinate des i-ten Punktes

$\min l_g$ [m] = Mindestlänge der Geraden zwischen zwei Bogen

Überhöhung u und Überhöhungsfehlbetrag u_f

Die Überhöhung u dient dazu, die auf das Fahrzeug und das zu transportierende Gut wirkende Seitenbeschleunigung a_q zu verringern, wenn der Zug in einen Bogen ein-/ausfährt. Wie im Kapitel 2.2.2.1.1 dargestellt, werden die Kreisbogenradien r in Abhängigkeit der Entwurfsgeschwindigkeit v und der Überhöhung u sowie des Überhöhungsfehlbetrags u_f ermittelt. Wie schon erwähnt wird die ausgleichende Überhöhung u_0 i.d.R. nicht eingesetzt. Wenn die Geschwindigkeit $\max v$ höher als die in der Berechnung angenommene Geschwindigkeit v ist, liegt ein Überhöhungsfehlbetrag u_f und damit eine Beschleunigung zur Bogenaußenseite vor. Nach [103] ergibt sich der Mindestradius r_{\min} aus Gleichung (2-9) wie folgt:

$$r_{\min} \cong 11,8 \cdot \frac{V^2}{\max u + \text{zul } u_f} \quad (3-22)$$

$\max u$ [mm] = maximale Überhöhung

$\text{zul } u_f$ [mm] = zulässiger Überhöhungsfehlbetrag

V [km/h] = Geschwindigkeit

Die maximale Überhöhung $\max u$ und der zulässige Überhöhungsfehlbetrag $\text{zul } u_f$ werden, wie in *Tabelle 3* und *Tabelle 5* aufgezeigt, beschränkt.

Im Regelfall berechnet sich die Überhöhung u nach [103] wie folgt:

$$u_i = \frac{6.5 \cdot V^2}{r_i} \quad (3-23)$$

u_i [mm] = Überhöhung im i-ten Bogen

Die Überhöhung u_{fi} aus Gleichungen (3-22) und (3-23) berechnet sich dann mit:

$$u_{fi} = 11,8 \cdot \frac{V^2}{r_i} - u_i \leq \max \text{zul } u_f \quad (3-24)$$

u_{fi} [mm] = i-ter Überhöhungsfehlbetrag im i-ten Bogen

Länge der Übergangsbogen (nachrichtlich)

Gemäß *Tabelle 12* hängt die Länge des Übergangsbogens l_U, l_{US}, l_{UB} von der Änderung des Überhöhungsfehlbetrags Δu_f und der Entwurfsgeschwindigkeit v der jeweiligen Strecke ab.

Die Länge der Übergangsbogen l_U, l_{US}, l_{UB} soll nach [103] wie folgt berechnet werden:

$$l_{\text{Entwurf}U_i} = (l_{U_i}, l_{US_i}, l_{UB_i}) \quad (3-25)$$

$l_{\text{Entwurf}U}$ [m] = Länge des Entwurfsübergangsbogens

l_{U_i} [m] = Länge der i-ten geraden Krümmungslinie

l_{US_i} [m] = Länge des i-ten s-förmigen Übergangsbogens

l_{UB_i} [m] = Länge des i-ten Übergangsbogens nach BLOSS

Um den Übergangsbogen geometrisch einbauen zu können, muss der Kreisbogen um das Abrückmaß f ($f \geq 15 \text{ mm}$), von der Geraden (Tangente) abgerückt werden [50].

Nach vorheriger Bestimmung der Kreisbogenelemente können die tatsächliche Position der UA und UE direkt auf der digitalen topographischen Karte markiert werden. In dieser Arbeit können die Kenngrößen des Übergangsbogens z.B. die Übergangsbogenlänge l_U und die Änderung des Überhöhungsfehlbetrags Δu_f ohne Bestimmung der Übergangsform ermittelt werden.

Unzufriedenheitsgrad U im Gleisbogen

Kapitel 3.1.9 zeigt den Unzufriedenheitsgrad U als Komfortkriterium.

Unzufriedenheitsgrad $U_{R_{x,y}}$ im Kreisbogen

Nach [48] wird der Unzufriedenheitsgrad $U_{R_{x,y}}$ für Kreisbogen wie folgt berechnet:

$$U_{R_{x,y}} = 8,4608 \cdot a_{yp} + 0,08532 \cdot (1 + \beta) \cdot u_f - 21,7 \leq \max U_{R_{x,y}} \quad (3-26)$$

$U_{R_{x,y}}$ [%] = Unzufriedenheitsgrad im Kreisbogen

a_{yp} [m/sec²] = Peak to Peak-Amplitudenwert der Beschleunigung⁷⁷

β = Wankkoeffizient⁷⁸

Die Grenze des maximalen Unzufriedenheitsgrad $\max U_{R_{x,y}}$ in Kreisbogen beträgt ca. 45% bei maximalen dyn $a_y = 2,5 \text{ m/sec}^2$ [48].

⁷⁷ Peak to Peak-Amplitudenwert der Beschleunigung $a_{yp} = 2 \cdot \text{dyn } a_y$, mit dyn a_y = dynamischer Zuschlag durch Unstetigkeit in der Gleislage. Bei der DB beträgt max dyn $a_y = 2,5 \text{ m/sec}^2$ [48]

⁷⁸ Die Seitenbeschleunigung in Fahrzeugebene setzt sich zusammen aus der Querbeschleunigung in Gleisebene a_y und einer im Fahrzeug diese Querbeschleunigung überlagernden Wankneigung [48]. Die Wankneigung wird durch den Wankkoeffizienten β beschrieben

Unzufriedenheitsgrad $U_{\ddot{u}_{x,y}}$ im Übergangsbogen

Der Unzufriedenheitsgrad $U_{\ddot{u}_{x,y}}$ im Übergangsbogen mit der Änderungsgeschwindigkeit der Steigung des Überhöhungsfehlbetrags $\frac{\Delta u_f}{\Delta t}$, von der auch der Ruck c abhängt, wird nach [48] wie folgt berechnet:

$$U_{\ddot{u}_{x,y}} = (1 + \beta) \cdot \left(0,0591 \cdot \Delta u_f + 0,0632 \frac{\Delta u_f}{\Delta t} \right) - 5,9 \leq \max U_{\ddot{u}_{x,y}} \quad (3-27)$$

$U_{\ddot{u}_{x,y}} [\%] = \text{Unzufriedenheitsgrad im Übergangsbogen}$

Dabei wird der Überhöhungsfehlbetrag u_f wie folgt begrenzt:

$$\frac{\Delta u_f}{\Delta t} \leq \max \frac{\Delta u_f}{\Delta t} \quad (3-28)$$

Aus [137] berechnet sich die Änderungsgeschwindigkeit des Überhöhungsfehlbetrags $\frac{\Delta u_f}{\Delta t}$ über die Mindestlänge des Übergangsbogens wie folgt:

$$\min l_U = \frac{k \cdot V \cdot \Delta u_f}{1.000} = \frac{V \cdot \Delta t}{3,6} \quad (3-29)$$

$$\Delta t = \frac{\min l_U}{v} \quad (3-30)$$

$$\frac{\Delta u_f}{\Delta t} = \frac{\Delta u_f \cdot v}{\min l_U} \leq \max \frac{\Delta u_f}{\Delta t} \quad (3-31)$$

$\min l_U$ [m] = Mindestlänge des Übergangsbogens

Δu_f [mm] = Unterschied der Überhöhungsfehlbeträge zwischen Bogenanfang und -ende

k = Parameter für die Form des Übergangsbogens⁷⁹

Der maximale Unzufriedenheitsgrad $\max U_{\ddot{u}_{x,y}}$ in Übergangsbogen wird begrenzt auf ca. 20% bei $\max \frac{\Delta u_f}{\Delta t} = 93 \text{ mm/sec}$ [48].

Ausrundungsbogen im Höhenplan

Nach [103] beträgt der maximale Ausrundungsradius r_a im Höhenplan (z-Achse): $r_a = 25.000 \text{ m}$. Als kleinster Ausrundungsradius $\min r_a$ in Gleisen, die von allen Fahrzeugen befahrbar werden sollen gilt $r_a = 2.000 \text{ m}$. Die Länge des Ausrundungsbogens soll $l_a \geq 20 \text{ m}$ betragen.

Der Ausrundungsradius wird immer tangential zu den Neigungsgeraden eingefügt.

⁷⁹ Die Parameter für die Form des Übergangsbogens nach [138] unterscheidet sich:

- $k = 4,0$: Übergangsbogen mit gerader Krümmungslinie
- $k = 4,5$: Übergangsbogen nach BLOSS
- $k = 6,0$: s-förmige Übergangsbogen

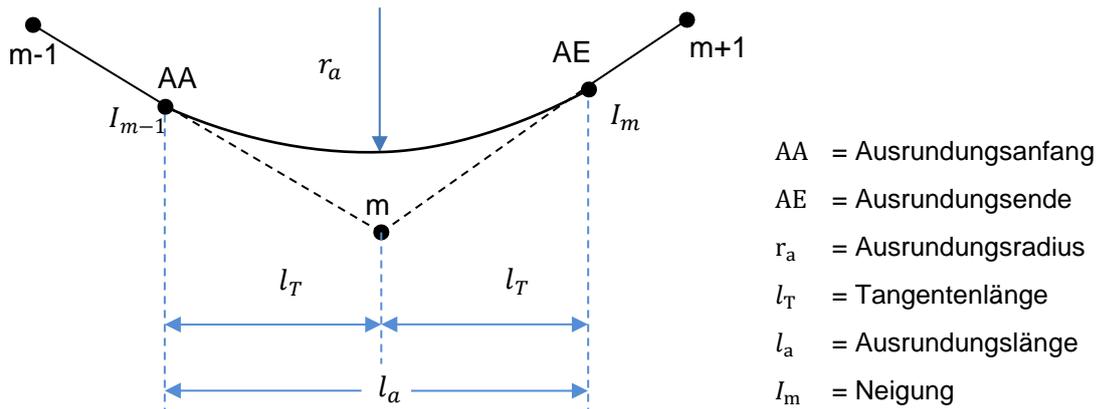


Abbildung 65: Einfügung eines Ausrundungsbogens im Höhenplan

Der Radius r_a des Ausrundungsbogens ergibt sich wie folgt:

$$2.000 \text{ m} \leq r_{a,m} = \min (r_{\theta,m}, r_{a_z,m}) \leq 22.500 \text{ m} \quad (3-32)$$

- $r_{a,m}$ [m] = m-ter Ausrundungsradius
- $r_{\theta,m}$ [m] = Ausrundungsradius aufgrund des Winkels θ
- $r_{a_z,m}$ [m] = $\frac{v^2}{a_z}$ Ausrundungsradius aufgrund der Vertikalbeschleunigung a_z

Damit berechnet sich die Länge der Tangente l_T mit:

$$l_T = \left| \frac{r_a}{2} \cdot \frac{I_{m-1} - I_m}{1.000} \right| \quad (3-33)$$

Unzufriedenheitsgrad U_{R_z} des Ausrundungsbogens im Höhenplan

Nach [48] wird der Unzufriedenheitsgrad U_{R_z} in z-Richtung:

$$U_{R_z} = 16,9215 \cdot \text{dyn } a_y + 13,0479 \cdot a_z - 21,7 \leq \max U_{R_z} \quad (3-34)$$

- U_{R_z} [%] = Unzufriedenheitsgrad im Ausrundungsbogen
- $\text{dyn } a_y$ [m/sec^2] = dynamischer Zuschlag durch Unstetigkeit in der Gleislage
- a_z [m/sec^2] = Vertikalbeschleunigung

Der maximale Unzufriedenheitsgrad $\max U_{R_z}$ in z-Richtung wird auf ca. 40% beschränkt [48].

3.3.1.3 Arbeitsschritte zur Ermittlung der möglichen Linienführungen

Auf den Grundlagen von Kapitel 3.3.1.2.1 sind die möglichen Linienführungen zwischen den ITF-Zielstationen dadurch gekennzeichnet, dass zuerst der Mittelpunkt jeder Zelle ausgewählt wird. Die Mittelpunkte, welche die Nebenbedingungen aus Kapitel 3.3.1.2.2 erfüllen, werden nach der Streckensuchrichtung miteinander verbunden. Damit entstehen die auswählbaren Linienführungen als Polygonzüge.

Hauptschritte (Abbildung 66):

1. Das Untersuchungsgebiet ist den Planern bekannt. Die topographische Karte des Untersuchungsgebiets wird in ein gleichmäßiges Raster mit $m \times n$ quadratischen Zellen unterteilt. Die Zellenbreite beträgt d . Der Wert der Breite d wirkt sich direkt auf die Berechnungsgenauigkeit aus. D.h.:
Je kleiner d ist, desto genauer ist das Berechnungsergebnis.
2. Die Koordinaten von jedem Mittelpunkt einer Zelle sind verfügbare Punkte für die Ermittlung der Linienführungen.
3. Mit DT (Kapitel 3.3.1) werden entsprechend der Reihenfolge von links nach rechts und von oben nach unten, mit dem Startpunkt S als Zielpunkt, die Abstände zwischen dem Zielpunkt und den benachbarten Punkten berechnet. Dann werden die Punkte mit dem kürzesten Abstand markiert, welche die Bedingungen erfüllen gleichzeitig die nächsten Zielpunkte für die weitere Berechnung zu sein (rote Punkte in *Abbildung 61*).
4. Entsprechend der Reihenfolge von rechts nach links und von unten nach oben, mit dem Endpunkt E als Zielpunkt, werden die Abstände zwischen dem Zielpunkt und den benachbarten Punkten berechnet. Dann werden die Punkte mit dem kürzesten Abstand markiert, welche die Bedingungen erfüllen gleichzeitig die nächsten Zielpunkte für die weitere Berechnung zu sein (blaue Punkte in *Abbildung 61*).

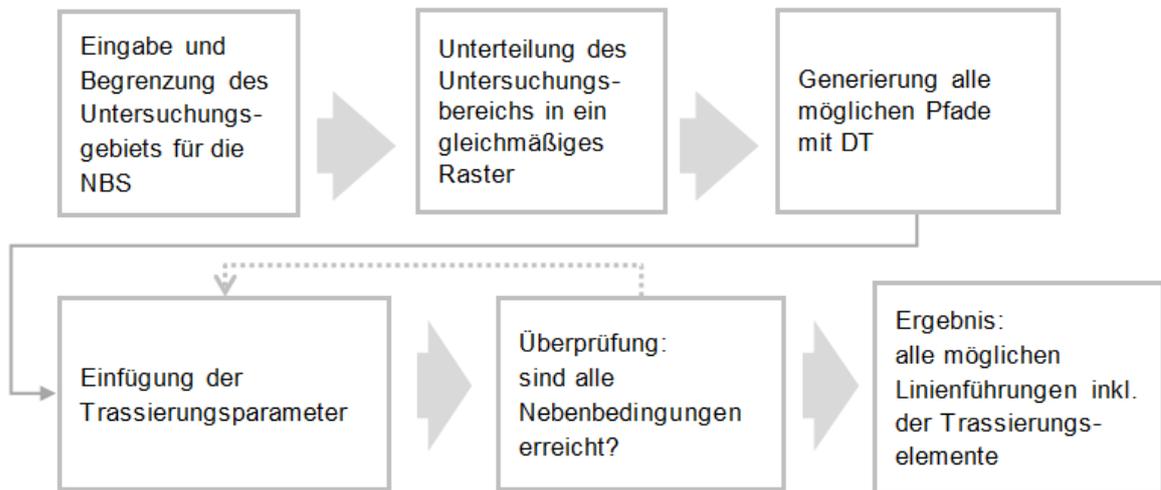


Abbildung 66: Arbeitsschritte zur Ermittlung der möglichen Linienführungen durch DT (Eigene Darstellung)

3.3.2 Fahrzeitenermittlung mit MIP

Um einen Fahrplan für eine noch nicht bekannte Infrastruktur zu ermitteln und darauf basierend wiederum die Infrastruktur korrekt zu dimensionieren, werden genaue Fahrzeiten zwischen den ITF-Knoten benötigt.

In Kapitel 3.3.1 wird die Linienführung zwischen Start und Ziel ermittelt. Basierend auf den erhaltenen Streckendaten kann die Fahrzeit berechnet werden.

Um die benötigte Fahrzeit zu eruiieren, wird bei den gängigen Verfahren stets von einem Startpunkt und einer Startgeschwindigkeit ausgegangen. Zudem wird eine maximale Geschwindigkeit v_{\max} für die Strecke angenommen und es wird an einem Endpunkt eine Endgeschwindigkeit

gesucht. Diese Methode führt allerdings nicht die Fahrdynamik sowie die Trassierungs- und Gleisparameter zusammen, sodass die berechnete Fahrzeit ungenau ist. Um dies zu berücksichtigen wird nach [74] eine lineare Berechnungsmethode entwickelt.

3.3.2.1 Modellierung

3.3.2.1.1 Zielfunktion

Abbildung 67 zeigt die gesamte Geschwindigkeitstrajektorie⁸⁰ für eine FSL, diskretisiert in einer Reihe von Abschnitten mit einem Abstand von Δs . Jeder Abschnitt kann einen Teil der Geschwindigkeit v darstellen, der die Distanz der Zugfahrt Δs , die Fahrzeit Δt und die verbrauchte Energie E enthält.

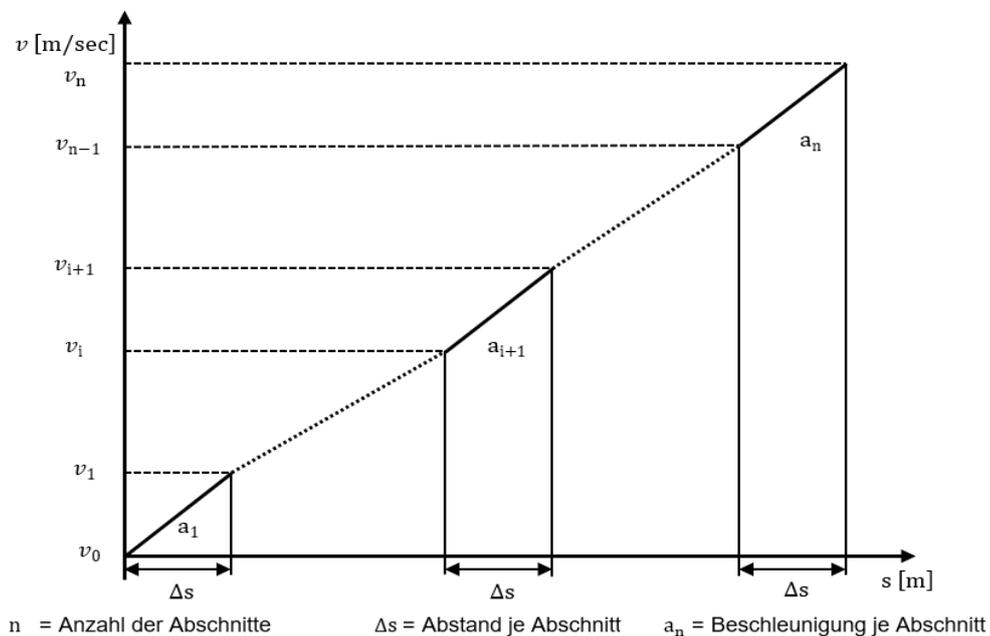


Abbildung 67: Schema des MIP-Modells für die FSL

Wie Gleichung (3-35) zeigt, ist die Zielfunktion des Modells die Summe des mechanischen Energieverbrauchs E_{mechan} vom Tzf.

$$\min E_{\text{mechan}} = \sum E_i \quad (3-35)$$

E_{mechan} = mechanischer Energieverbrauch

E_i = mechanischer Energieverbrauch von v_i nach v_{i+1}

Gleichung (3-36) zeigt den Energieverbrauch für jeden Abschnitt:

$$E_i = (F_{i,a}(a_i) + F_{i,WZ}(v_{i,m}) + F_{i,N}(I_i)) \cdot \Delta s \quad (3-36)$$

$F_{i,a}$ = Zugkraft des Zuges zwischen v_i und v_{i+1}

⁸⁰ Eine Geschwindigkeitstrajektorie ist die Ideallinie eines festen Punktes, auf der ein Streckenabschnitt mit der größten Geschwindigkeit befahren werden kann [88].

- $F_{i,WZ}$ = Widerstand des Fahrzeugs zwischen v_i und v_{i+1}
- $F_{i,N}$ = Neigungswiderstand zwischen v_i und v_{i+1}
- a_i = Beschleunigung zwischen v_i und v_{i+1}
- $v_{i,m}$ = mittlere Geschwindigkeit zwischen v_i und v_{i+1}
- I_i = Neigung zwischen v_i und v_{i+1}

Die Geschwindigkeitspunkte werden durch $v_0, v_1, v_2 \dots v_{n-1}, v_n$ als Entscheidungsvariable gekennzeichnet. Wenn jedoch die Anzahl der Geschwindigkeitsunterteilungen n und die Anzahl der Streckensegmente m zu groß sind, wird die Berechnung zu aufwändig. Daher werden Nebenbedingungen eingeführt, um unangemessene Berechnungsergebnisse zu beseitigen und die Berechnungsgeschwindigkeit zu steigern.

3.3.2.1.2 Nebenbedingungen zur Fahrzeitermittlung

Fahrzeiten

Aufgrund der Eigenschaften des ITF ist es relativ einfach, einige Infrastrukturelemente (z.B. Gleisanzahl im Knoten [140]) aus dem Fahrplan abzuleiten. Daher muss die Fahrzeit T den Zeitanforderungen des ITF entsprechen.

Neben der reinen Fahrzeit zwischen zwei Knoten enthält ein ITF-Takt auch die Fahrzeitzuschläge (z.B. Regel- und Bauzuschlag) sowie die Symmetriezeit⁸¹, um die plan- und außerplanmäßigen Abweichungen der Fahrzeit auszugleichen (*Tabelle 23*).

Tabelle 22 zeigt den Regelzuschlag für verschiedene Reisezüge.

Tabelle 22: Regelzuschlag für Reisezüge ([52] und [97])

Traktionsart	Diesellok		Ellok			Triebzüge (ICE1+ICE2)	Sonstige Triebzüge/wagen
	≤ 250t	> 250t	≤ 350t	351 – 600t	> 600t		
Anhängelast							
V_{max} [km/h]							
≤ 120	3%	4%	3%	3%	4%	4%	3%
120 < V_{max} ≤ 160				4%	5%	5%	
> 160			4%				

Tabelle 23 zeigt die ICE-Zeitanteile beim 30/60 min Takt.

81 Der Symmetriezeitzuschlag ist die Zeit, in welcher der betrachtete Zug vor der Symmetriezeit am ITF-Knoten ankommt plus der Zeit, in der er symmetrisch zur Symmetriezeit abfährt (Beispiel: vorrangiger Zug kommt 1 min vor der Symmetriezeit an und fährt 1 min nach der Symmetriezeit ab, siehe *Abbildung 41*) [52].

Tabelle 23: Zeitanteile für einen ICE beim 30/60 min Takt ([70] und [98])

Takt	30 min	60 min
Regelzuschlag* 5%	ca. 1,5 min	ca. 3 min
Bauzuschlag*	2-3 min	2-3 min
Symmetriezeitzuschlag (= Türöffnungszeit ICE) zwischen Vor- und Nachlaufzeit (1st in – 1st out, 2nd in – 2nd out, ...)	≥ 2 min	≥ 2 min
Vor-/Nachlaufzeit innerhalb der Bahnhofgleissperrzeit	≥ 2 min	≥ 2 min
reine Fahrzeit*	≤ 21,5 - 22,5 min	≤ 50 - 51 min
*: max. auf $\frac{1}{2}$ min gerundet		

Die Fahrzeit berechnet sich somit

$$T_{\text{Takt}} = T + T_{\text{Zuschläge}} + T_{\text{BhfVor-/Nachlauf}} \quad (3-37)$$

- T = reine Fahrzeit zwischen den ITF-Knoten
- T_{Takt} = Takt (z.B. 30 Minuten, 60 Minuten)
- $T_{\text{Zuschläge}}$ = Regel-, Bau-, Symmetriezeitzuschlag, etc.
- $T_{\text{BhfVor-/Nachlauf}}$ = Vor-/Nachlaufzeit innerhalb der Bahnhofgleissperrzeit (ohne Türöffnungszeit)

Beschleunigung/Verzögerung in Längsrichtung (x-Achse)

Die verschiedenen Zugtypen/-gattungen haben unterschiedliche fahrdynamische Charaktere.

Die Änderungen der Fahrzeuglängsbeschleunigung/-verzögerung a wirken sich nicht nur auf die FSL aus, sondern haben auch einen großen Einfluss auf den Fahrkomfort. Daher ist es notwendig, die Längsbeschleunigung- und -verzögerung mit den Kriterien der Zugtypen/-gattungen und des Fahrkomforts zu begrenzen.

Die Längsbeschleunigung und -verzögerung a_i zwischen v_i und v_{i+1} sollte die maximale Beschleunigung/Verzögerung a_{max} nicht überschreiten. Die Längsbeschleunigung und -verzögerung a zwischen v_i und v_{i+1} wird somit durch Gleichung (3-38) definiert:

$$0 \leq a_i = \frac{v_{i+1}^2 - v_i^2}{2\Delta s} \leq a_{\text{max}} \quad (3-38)$$

- Δs [m] = Abstand zwischen v_i und v_{i+1}
- a_{max} [m/sec²] = maximale Längsbeschleunigung und -verzögerung in x-Richtung

Zulässige Geschwindigkeiten auf den Strecken

In extremen Fällen fährt ein Zug mit einer sehr niedrigen Geschwindigkeit v_{\min} und erreicht nach längerer Zeit das Terminal. Diese FSL ist weder sinnvoll noch entspricht sie dem Konzept eines zukünftigen ITF dessen Bedingung ist:

So schnell wie nötig!

Um dies in der Berechnung auszuschließen, muss die Ober-/Untergrenze der maximalen Zuggeschwindigkeit v_{\max} begrenzt werden. I.A. wird die Obergrenze der maximalen Geschwindigkeit $\overline{v_{\max}}$ als maximal zulässige Streckengeschwindigkeit v_{\max} gesehen, die Untergrenze der maximal zulässigen Geschwindigkeit $\underline{v_{\max}}$ kann durch die Fahrzeitanforderungen beschrieben werden:

$$\underline{v_{\max}} \leq v_{\max} \leq \overline{v_{\max}}^{82} \quad (3-39)$$

$\overline{v_{\max}}$ = Obergrenze der maximalen Geschwindigkeit
= maximale zulässige Streckengeschwindigkeit

$\underline{v_{\max}}$ = Untergrenze der maximalen Geschwindigkeit

Wie bereits erwähnt steht der Kreisbogenradius r im engen Zusammenhang mit der Zuggeschwindigkeit v . I.A. ist die zulässige Geschwindigkeit v in einem Kreisbogen umso höher, je größer der Kreisbogenradius r ist. In einem Abschnitt mit einem kleinen Kreisbogenradius r muss die Geschwindigkeit v für ein sicheres Fahren begrenzt werden:

$$v^2 \leq \frac{r_{\max} \cdot g \cdot u}{1.500} \quad (3-40)$$

$$v \leq \sqrt{\frac{r_{\max} \cdot g \cdot u}{1.500}} \quad (3-41)$$

Energieverbrauch je Abschnitt

Neigungsänderungen haben einen großen Einfluss auf die Kinetik einer Zugfahrt. Passiert ein Zug beim Beschleunigen z.B. eine negative Neigung, kann kinetische Energie E_{Kin} durch den Höhenunterschied Δh als Teil der Beschleunigungskraft wirken. In diesem Fall können die Triebfahrzeuge durch die Schwungfahrt den Traktionsaufwand P reduzieren um die erforderliche Geschwindigkeit v_{erf} zu halten. Die Zugfahrt kann das Höhenprofil zum Energiesparen nutzen (vgl. Kapitel 3.3.1.2.1: „Steigung und Schwungfahrt“).

Zur Berechnung des Energieverbrauchs E sind daher auch detaillierte Streckenneigungsdaten erforderlich.

⁸² Nach den Bedingungen des ITF ist die tatsächliche maximale Streckengeschwindigkeit v_{\max} nicht immer gleich der maximalen zulässigen Streckengeschwindigkeit $\overline{v_{\max}}$, sofern die ITF-Fahrzeit eingehalten wird.

Die Reduktion der Zugkraft F ist abhängig von den Höhendifferenz Δh der Strecke. Der Energieverbrauch zwischen v_i und v_{i+1} beschränkt sich auf:

$$E_i - F_{i,WZ} \cdot \Delta s - m \cdot g \cdot \Delta h \geq \frac{1}{2} m \cdot (v_{i+1}^2 - v_i^2) \quad (3-42)$$

E_i = Energieverbrauch von v_i nach v_{i+1}

$F_{i,WZ}$ = Widerstand des Fahrzeugs zwischen v_i und v_{i+1}

3.3.2.2 Fahrzeitermittlung

Die Berechnung der Fahrzeit dient zur Bestimmung der Geschwindigkeitskurve eines Zuges, die sich im Bildfahrplan als FSL ausdrückt.

Wie in Kapitel 3.2.1, *Abbildung 58*, vorgestellt, wird eine Zugfahrt in Beschleunigungs-, Zwischen- und Bremsphase unterteilt. Zuerst beschleunigt der Zug aus dem Stillstand auf eine vorgegebene Geschwindigkeit v bzw. Höchstgeschwindigkeit v_{\max} . Anschließend fährt der Zug mit konstanter Geschwindigkeit v_{konst} . Je nach Streckenprofil kann er mit reduzierter Geschwindigkeit v fahren. Die letzte Phase ist die Bremsphase, in der die Geschwindigkeit v abnimmt und der Zug am Ziel zum Stehen kommt.

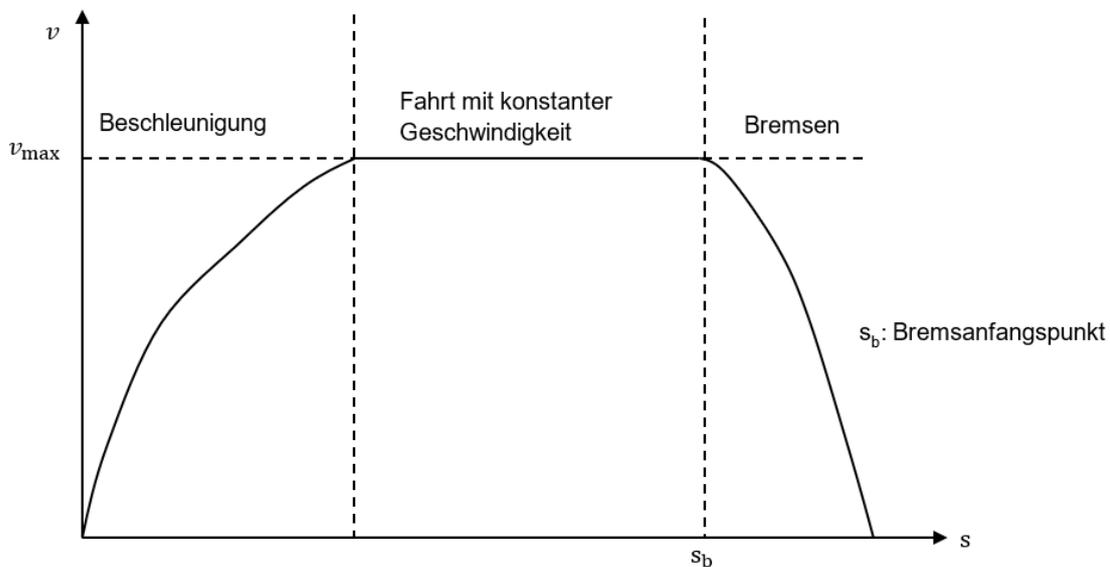


Abbildung 68: Aufteilung der FSL

Um die genaue FSL zu berechnen, wird die FLS in zwei Abschnitte unterteilt (*Abbildung 68*).

- In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass die Beschleunigungs- und Beharrungsfahrt eines Zuges den ersten Teilabschnitt darstellt. Die Geschwindigkeitssteigerung ist dabei monoton.
 - I.A. steigt die Geschwindigkeit des Zuges in der Beschleunigungsphase bis zur zulässigen Höchstgeschwindigkeit v an.
 - Dann fährt der Zug kontinuierlich mit konstanter Geschwindigkeit v_{konst} . Das bedeutet: Die Beschleunigung $a > 0$ ist

- Die Bremsphase wird durch zwei Teile repräsentiert:
 - In der Bremsphase wird die Geschwindigkeit des Zugs bis auf 0 km/h reduziert. Die Geschwindigkeitsänderung $\frac{\Delta v}{\Delta s}$ nimmt dabei monoton ab.
 - Um den Bremsanfangspunkt s_b zu bestimmen, wird der Bremsvorgang vom Ziel her berechnet (*Abbildung 69*).

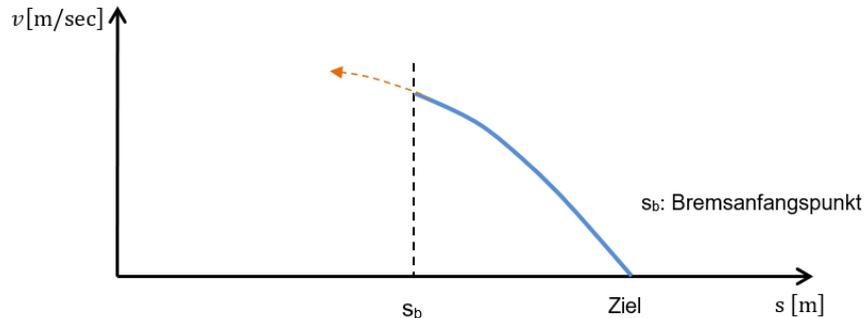


Abbildung 69: Berechnung des Bremsanfangspunkts s_b

Der Fokus bei der Berechnung des Bremsvorgangs liegt auf der Bestimmung des Bremsanfangspunkts s_b . Die Position des Bremsanfangspunkts s_b hängt von der Bremsrate ab. In früheren Forschungen wurde die Verzögerung a i.d.R. als konstant, ohne Änderungsbeschleunigung $\frac{\Delta a}{\Delta s}$ angenommen.

Um den Fahrkomfort zu halten, wird die Bremsverzögerung a wegen des Rucks c langsam erhöht. Um den Bremsvorgang genau zu berechnen, wird dieser in dieser Arbeit als umgekehrte (negative) Beschleunigungsbewegung betrachtet (*Abbildung 69*). D.h.:

Die Geschwindigkeitsberechnung setzt als „umgekehrter Beschleunigungsprozess“ am Endpunkt an. Wenn die Höchstgeschwindigkeit v_{\max} erreicht ist, wird die Berechnung an diesem Punkt gestoppt. Dieser Punkt wird als Bremsanfangspunkt s_b für die Bremsverzögerung a bezeichnet.

Anschließend werden die Beschleunigung a und die konstante Geschwindigkeit v_{konst} vom Ausgangspunkt aus berechnet. Dabei ist zu beachten, dass die Beschleunigung a des Zuges während des Beschleunigungsprozesses nicht konstant ist. Um die genauen Geschwindigkeitsänderungen $\frac{\Delta v}{\Delta s}$ zu berechnen, muss daher zuerst die untersuchte Strecke diskretisiert werden. D.h.

Die Strecke wird in gleich kleine konstante Segmente unterteilt.

Obwohl sich die Beschleunigung a während der Fahrt des Zuges ändert, kann davon ausgegangen werden, dass die Beschleunigung a in jedem diskretisierten Abschnitt konstant bleibt.

Aus *Abbildung 67* ist ersichtlich, dass es eine Reihe von monoton ansteigenden Geschwindigkeiten, $v_0, v_1, v_2 \dots v_n$ entlang der Strecke gibt. Wobei $v_0 = 0$ m/sec und v_n die maximale Geschwindigkeit v_{\max} des Zuges ist. Die Strecke ist in gleichen Anständen Δs unterteilt. Die Größe der Wachstumsrate von v_{i+1} wird durch v_i , Δs und a_{i+1} berechnet.

Wenn n eingestellt ist und die Anfangsgeschwindigkeit v_0 und die Endgeschwindigkeit v_n bekannt sind, wird die Geschwindigkeitssequenz bestimmt.

Beispiel:

Annahmen: Das Geschwindigkeitsintervall ist $\Delta v = 10$ m/sec, $\max v = 20$ m/sec.
Der Wegschritt ist $\Delta s = 100$ m.

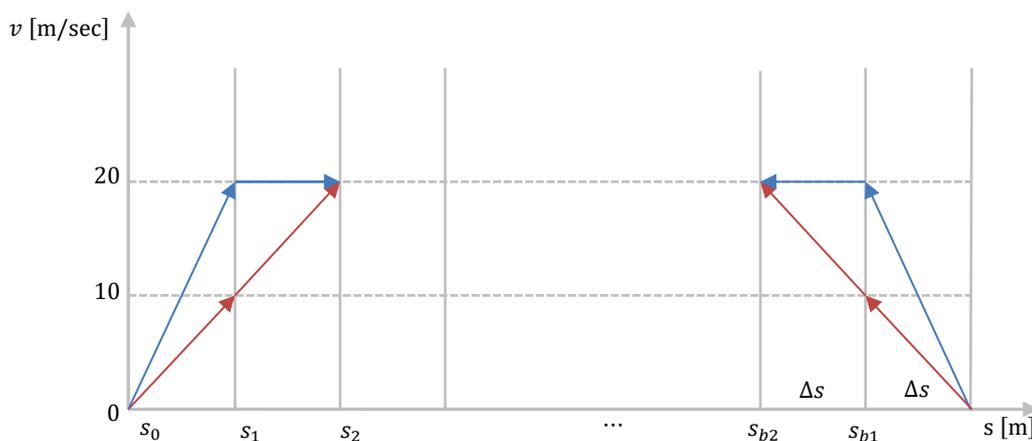


Abbildung 70: Geschwindigkeitsberechnungsprozess

Der Geschwindigkeitsberechnungsprozess ist wie folgt (Abbildung 70):

- Berechnung des Beschleunigungsvorgangs
 - Die Anfangsgeschwindigkeit ist $v_0 = 0$. Nach dem Prinzip der monotonen Erhöhung muss die Geschwindigkeit v_1 an s_1 größer als v_0 sein, damit die Geschwindigkeit v_1 am Punkt s_1 aus der Menge $v = 0, 10, 20$ [m/sec] ausgewählt werden kann. D.h.
 - $v_1 = 10$ oder 20 [m/sec]
 - Damit folgt die v_2 an s_2 . Da die Geschwindigkeit $v_1 = 10$ oder 20 [m/sec] wählbar ist, muss diese separat festgelegt werden. Wenn die Geschwindigkeit $v_1 = 10$ m/sec an s_1 ist, soll die Geschwindigkeit $v_2 = 20$ m/sec an s_2 sein (rote Linien in *Abbildung 70* links); wenn die Geschwindigkeit $v_1 = 20$ m/sec ist, bedeutet dies, dass der Zug die maximale Geschwindigkeit v_{\max} erreicht hat. Dann fährt der Zug mit einer konstanten Geschwindigkeit v_{konst} . Die Geschwindigkeit v_2 beträgt ebenfalls 20 m/sec (blaue Linien in *Abbildung 70* links). Die Geschwindigkeit v der blauen Linie steigt schneller als die der roten Linie. D.h.:
 - Die Beschleunigung a der blauen Linie ist größer als die der roten Linie.
 - Die endgültige Geschwindigkeitsfolge
 - $[v_0, v_1, v_2] = 0, 10, 20$ [m/sec] und $[v_0, v_1, v_2] = 0, 20, 20$ [m/sec]
 - wird – wie die roten und blauen Linien in *Abbildung 70* links zeigen – erhalten.
- Berechnung des Bremsvorgangs
 - Da der Bremsvorgang als Umkehrung des Beschleunigungsvorgangs berechnet wird, wird die Geschwindigkeit v gleich wie der Beschleunigungsvorgang berechnet.
 - Der Bremsanfangspunkt s_b hängt von der Verzögerung a ab (z.B. s_{b1} und s_{b2}).
 - Der optimale Bremsanfangspunkt s_b wird anhand des Mindestenergieverbrauchs $\min E_{\text{mechan}}$ über die betrachtete Strecke bestimmt.

Die Schritte der Fahrzeitberechnung können wie folgt veranschaulicht werden (Abbildung 71):

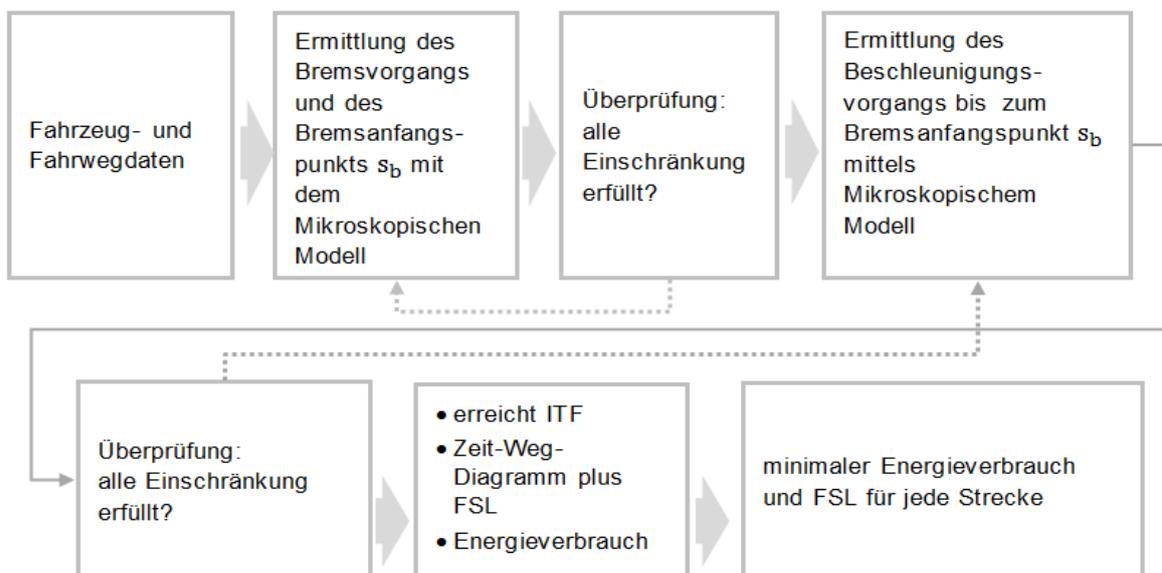


Abbildung 71: Ablauf der Fahrzeitermittlung (Eigene Darstellung)

3.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden zunächst die relevanten Grundkenntnisse über die Eisenbahnstrecke sowie die Verfahren und Werkzeuge der Streckenermittlung vorgestellt. Anhand der Geschwindigkeitsanforderungen wird eine Methode vorgeschlagen die DT, MIP und HOHNECKER kombiniert, um die Strecke zwischen den beiden Knoten zu bestimmen.

I.A. sind drei Schritte erforderlich:

- Schritt 1: Die Distanz- und Höheninformationen werden aus der digitalen topographischen Karte herausgearbeitet. Unter Berücksichtigung der vorgegebenen maximalen zulässigen Geschwindigkeit v_{\max} und der wesentlichen Trassierungs- und Gleisparameter, wird die Strecke zwischen zwei Punkten im Lage- und Höhenplan bestimmt. Insbesondere liegt der Fokus auf der Distanz im Grundriss und der Höhenänderung.
- Schritt 2: Zur Berechnung der Fahrzeit auf einer NBS hängt die Berechnung der Fahrgeschwindigkeit v des Zuges von den Trassierungs-/Gleis- und Fahrzeugparametern ab. Anhand der Einschränkungen dieser Parameter werden die Fahrzeiten T , die den Anforderungen bzw. dem ITF entsprechen, ermittelt.
- Schritt 3: Es werden die Fahrzeiten auf allen auswählbaren Linienführungen ermittelt, die im Schritt 1 erhalten bleiben. Die optimale Lösung wird aus dem Vergleich des Energieverbrauchs aller Linienführungen ermittelt, welche die ITF-Fahrzeiten einhalten.

Das Konstruktionsprinzip besteht darin, die räumliche Ausrichtung vom Start bis zum Ziel auf der Grundlage der Richtlinien und weiteren Anforderungen zu finden. Die optimale Lösung ist die Strecke, welche der ITF-Fahrzeit entspricht und dabei die geringste Energie verbraucht.

Mit dieser Methode können nicht nur neuzubauende Strecken (NBS) bestimmt werden, sondern auch die Fahrzeit T_{Takt} des Zuges nach *Tabelle 23*. Die Fahrzeit T_{Takt} , wird als theoretische Grundlage für die Formulierung des zukünftigen Fahrplankonzepts verstanden. Sie bietet eine gute Voraussetzung für die Entwicklung „vom Fahrplan zur Infrastruktur“.

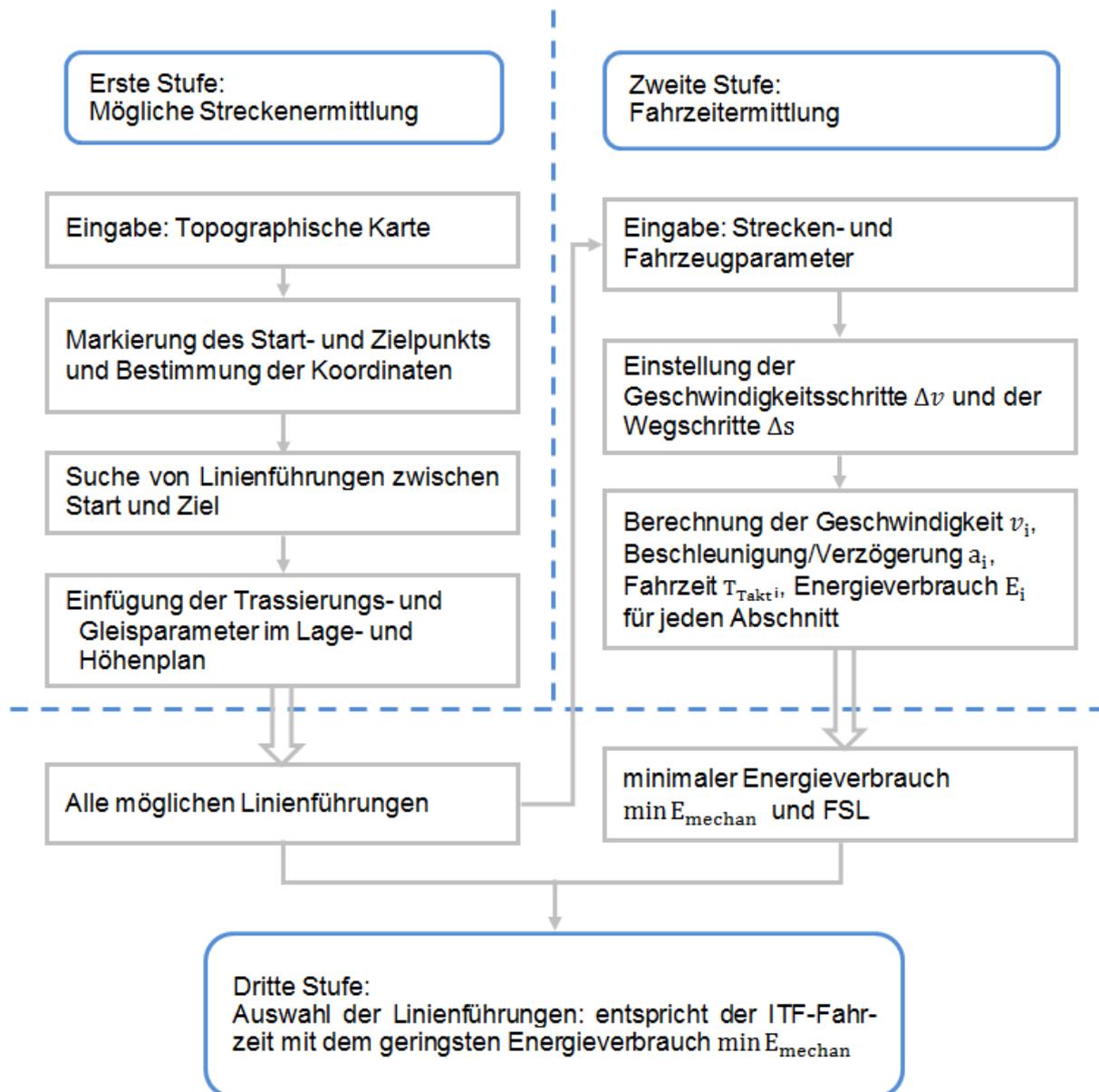


Abbildung 72: Ablauf der Ermittlung einer Linienführung zwischen zwei ITF-Knoten (Eigene Darstellung)

Der Ablauf zur Ermittlung einer neuen Strecke wird wie folgt zusammengefasst:

1. Unterteilung des Untersuchungsgebietes:
Die digitale topographische Karte des Untersuchungsgebietes wird in ein regelmäßiges Raster unterteilt.
2. Markierung der Koordinaten:
Die Koordinaten von jedem Mittelpunkt einer Zelle stammen aus einer topographischen Karte.

3. Untersuchung der Pfade:
Mit der Verbindung aller ausgewählten Punkte durch DT werden alle verfügbaren Polygonzüge zwischen Start und Ziel festgehalten.
4. Ermittlung der Trassierungselemente:
Die Linie an einem Wendepunkt soll in der horizontalen und vertikalen Ebene mit Bogen gekrümmt werden.
5. Bestimmung der FSL:
Die Distanz s , Geschwindigkeit v , Beschleunigung/Verzögerung a , Fahrzeit T_{Takt} und der Energieverbrauch E_{mechan} sowie Bremsanfangspunkt s_b werden bestimmt.
6. Auswahl der Strecken
Die FSL und der Energieverbrauch E_{mechan} des Zuges lassen sich auf jeder Einzelstrecke nachvollziehen. Mit dem Kriterium des geringsten Energieverbrauchs $\min E_{\text{mechan}}$ wird in der Abhängigkeit der berechneten ITF-Fahrzeit aus allen Linienführungen eine optimale Strecke ausgewählt.

4 Spur-/Signalplandimensionierung für eine NBS

In diesem Kapitel wird die Infrastruktur unter Zuhilfenahme von C^{-1} dimensioniert. Mit den Berechnungen aus Kapitel 3.3 wird die Linienführung inklusive der Trassierungselemente sowie die FSL ermittelt. Damit kann die Infrastruktur eines zukunftsfähigen ITF bestimmt werden.

Kapitel 4 ist in vier Abschnitte mit abschließender Zusammenfassung unterteilt:

- Kapitel 4.1: Aufgabenstellung zur Spur-/Signalplandimensionierung
 - Abgrenzung des Untersuchungsgebietes
 - Eingabedaten
- Kapitel 4.2: Wahl der Zugfolge
 - Fahren im festen Raumabstand
 - Fahren im Bremswegabstand (engl. Moving Block)
- Kapitel 4.3: Dimensionierung der Infrastruktur – Spurplan
 - Ermittlung der Belegungszeit
 - Spurplandimensionierung für die Freie Strecke
 - Ermittlung der Gleisanzahl in der Bahnhofs-Gleisgruppe (GG)
 - Bestimmung der Gleisverbindungen im Bahnhofskopf
- Kapitel 4.4: Ermittlung der Signalstandorte
 - Leit- und Sicherungstechnik (LST)
 - Aktuelle Methoden der Signalstandortermittlung
 - Problemstellung zur Ermittlung der ETCS-Level 2-Signalstandorte
 - Verfahren zur Ermittlung der ETCS-Level 2-Signalstandorte
- Kapitel 4.5: Zusammenfassung

4.1 Aufgabenstellung zur Spur-/Signalplandimensionierung

Die Hauptidee von C^{-1} besteht darin, die Infrastruktur ausgehend von einem zukunftsfähigen ITF so zu gestalten, dass sie die vom zukunftsfähigen ITF geforderte Kapazität abdecken kann.

Die Kapazität kann in „parallele Kapazität“ und „sequentielle Kapazität“ unterteilt werden [140]:

- *„Die parallele Kapazität gibt an, wie viele Zug- und Rangierbewegungen unabhängig, d.h. ohne gegenseitige Hemmung oder Ausschluß, voneinander und daher gleichzeitig möglich sind.“*
- *„Die sequentielle Kapazität gibt an, mit welchem zeitlichen Abstand Zug- und Rangierbewegungen in demselben Bedienungskanal des Netzelementes [Anm.: auf demselben Gleis] aufeinander folgen können.“*

Damit wird das Ausmaß der „parallelen Kapazität“ durch die Anzahl der Gleise bestimmt:

Je höher die Anzahl der Gleise in einem Bereich ist, desto mehr Züge dürfen zur gleichen Zeit im gleichen Bereich fahren.

Die „sequentielle Kapazität“ hängt von der Sperrzeit t_{Sperr} ab, d.h.:

Wenn die Sperrzeit t_{Sperr} kürzer wird, ist die Mindestzugfolgezeit t_{Zugfolge} auf einem Gleisabschnitt geringer, sodass die „sequentielle Kapazität“ (Anzahl der hintereinander folgenden Züge = Streckenkapazität), bzw. bei gleicher Ausgangszuganzahl die Qualität, auf diesem Gleisabschnitt höher ist.

Die Aufgabenstellung für diesen Bereich besteht darin, C^{-1} so weiterzuentwickeln, damit die Gleisinfrastruktur per EDV berechnet werden kann. Das Berechnungsergebnis soll nicht nur jederzeit die genaue Position des Zuges enthalten, sondern auch den räumlichen Standort der Infrastrukturelemente bestimmen (z.B. Anzahl der Gleise, Weichenverbindungen, Signale etc.).

4.1.1 Abgrenzung des Untersuchungsgebietes

In dieser Arbeit wird die Infrastruktur einer NBS zwischen zwei ITF-Knoten entwickelt. Die Infrastrukturermittlung wird für verschiedene Bereiche dieser NBS durchgeführt. Für jeden Bereich gelten unterschiedliche Einschränkungen. Um die Infrastruktur auf der Basis eines zukunftsfähigen ITF zu gestalten, wird zunächst das Untersuchungsgebiet begrenzt.

Bezogen auf die Fahrtrichtung – jedes Gleis wird im 1-Richtungsbetrieb befahren – liegen folgende Bereiche im Untersuchungsgebiet, die der Zug vom Abfahrts- zum Zielbahnhof durchfährt (*Abbildung 73*):

- Gleisgruppe des Abfahrtsbahnhofs
- Abfahrtsbahnhofskopf
- Freie Strecke
- Zielbahnhofskopf
- Gleisgruppe des Zielbahnhofs

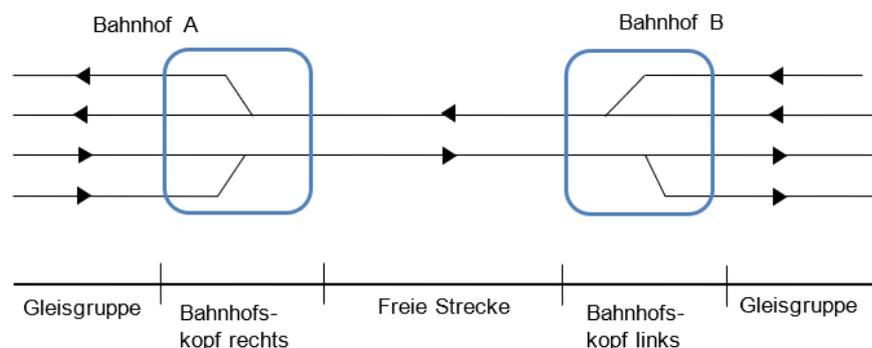


Abbildung 73: Unterteilung der Gleisinfrastruktur im abgegrenzten Untersuchungsgebiet

4.1.2 Eingabedaten

Ein zukunftsfähiger ITF besteht aus den Daten aller Zugfahrten über einen definierten Zeitraum.

Jeder Zug benötigt folgende Informationen:

- Zugnummer und -gattung,
- Zuglänge l_z , Höchstgeschwindigkeit V_{max} , Beschleunigung und Verzögerung a ,
- Zeiten für Fahrtbeginn und Fahrtende.

In Bezug auf die Infrastruktur sind folgende Informationen erforderlich:

- Streckenlänge s
- Anfangs- und Endstation
- maximal zulässige Geschwindigkeit V_{max} für die jeweiligen Streckenabschnitte

4.2 Wahl der Zugfolge

Die „sequentielle Kapazität“ bezieht sich auf die Zugfolgen auf demselben Gleis. Diese hängt von der Sperrzeit jedes Zuges ab. Um die Sperrzeiten berechnen zu können, muss die Zugfolge-technik ausgewählt werden.

Im Grundsatz gibt es zwei Zugfolge-techniken mit weiterer Unterteilung:

- Fahren im festen Raumabstand
 - Fahren im Blockabstand
 - Fahren auf „elektronische Sicht“
- Fahren im Bremswegabstand (engl. Moving Block)
 - Fahren im relativen Bremswegabstand
 - Fahren im absoluten Bremswegabstand

4.2.1 Fahren im festen Raumabstand

Seit Mitte des 19. Jahrhunderts fahren Züge im festen Raumabstand. Dies gilt als sicherer Fahrstandard für die Zugfolgen und ist heute das am weitesten verbreitete Verfahren für die Zugfolge bei Vollbahnen [84].

4.2.1.1 Fahren im Blockabstand

Beim Fahren im festen Raumabstand wird die Strecke i.d.R. in Abschnitte (Blöcke) unterteilt, die durch ortsfeste Signale gesichert sind. Ein Zug gibt die Strecke hinter sich in diskreten Schritten (ein Schritt entspricht einem Block) frei [84].

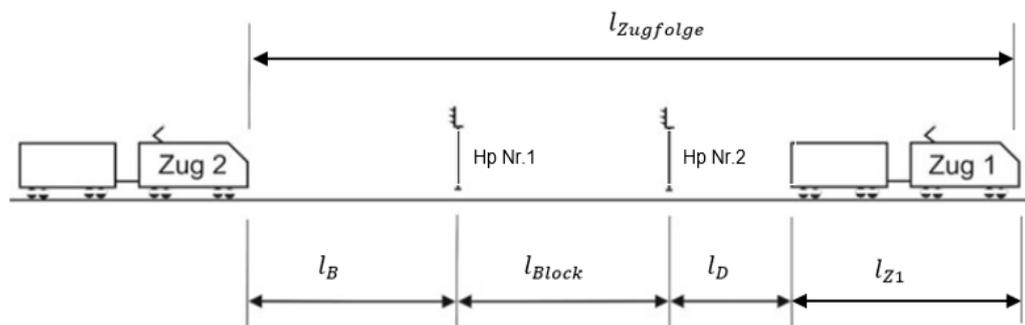


Abbildung 74: Fahren im festen Raumabstand [84]

D.h.:

Eine Zugfahrt, die mit ortsfesten Signalen (z.B. HV-System) geführt wird, erfordert immer das Fahren im festen Raumabstand, da die Zustimmung zur Zugweiterfahrt nur an diskreten Punkten (Standort der ortsfesten Signale) erteilt werden kann.

Dies bedeutet:

Ein Block wird begrenzt durch zwei Hauptsignale (Hp) und stellt somit den Hauptsignalfolgeabstand l_{Block} dar (Abbildung 75).

Der Zugfolgeabstand $l_{Zugfolge}$ ist die Distanz der Zugspitzen von zwei einander folgenden Zügen.

Aus *Abbildung 74* kann der Zugfolgeabstand l_{Zugfolge} im festen Raumabstand wie folgt berechnet werden:

$$l_{\text{Zugfolge}} = l_B + l_{\text{Block}} + l_D + l_{Z1} \quad (4-1)$$

- l_{Zugfolge} = Zugfolgeabstand zwischen zwei Zügen
- l_B = maximaler Bremswegabstand
- l_{Block} = Blocklänge
- l_D = Durchrutschweg
- l_{Z1} = Länge des Zuges 1

Um eine kontinuierliche sichere Fahrt im festen Raumabstand zu gewährleisten, muss das Signalbild vorausschauend erkennbar sein. Hierzu wird zu jedem Hp das zugehörige Vorsignal (Vr) installiert. Die Beziehung zwischen Vr und Hp ist aus *Abbildung 75* ersichtlich:

- wenn der Block frei ist (= Block zwischen Hp11 und Hp13), zeigt das Vorsignal (Vr11) für Hp11 die Information „Fahrt erwarten“. Somit kann der Zug über Hp11 in den freien Block einfahren.
- wenn der Block besetzt ist (= Block nach Hp13), zeigt das Vorsignal (Vr13) für Hp13 die Information „Halt erwarten“. Der Zug muss ab dem Erkennen von Vr13 bremsen, um vor dem Hp13 zum Stehen zu kommen.

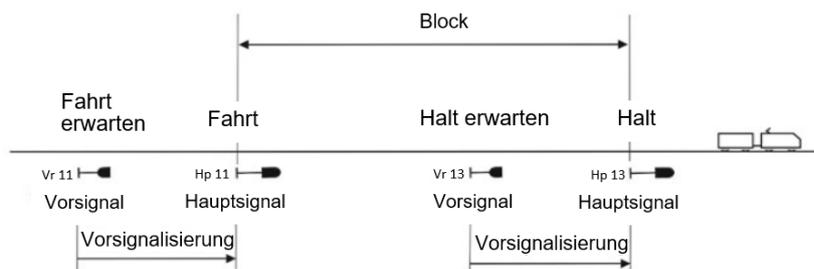


Abbildung 75: Beziehung zwischen Vr und Hp [84]

Tabelle 24 zeigt die Bezeichnung und Bedeutung der Vr und den zugehörigen Hp.

Tabelle 24: Bezeichnung und Bedeutung der Vr und den zugehörigen Hp ([78] und [96])

Vorsignal		Bedeutung	Hauptsignal		Bedeutung
Vr 0 (Zwei gelbe Lichter nach rechts steigend)		Halt erwarten	Hp 0 (Ein rotes Licht oder zwei rote Lichter nebeneinander)		Halt Fahrzeuge müssen vor dem Signal anhalten
Vr 1 (Zwei grüne Lichter nach rechts steigend)		Fahrt erwarten	Hp 1 (Ein grünes Licht)		Fahrt Fahrzeuge dürfen mit der im Fahrplan ange- gebenen Geschwindig- keit vorbeifahren
Vr 2 (Ein gelbes Licht und nach rechts steigend ein grünes Licht)		Langsamfahrt erwarten	Hp 2 (Ein grünes und senkrecht darunter ein gelbes Licht)		Langsamfahrt $V_{\text{max}} = 40 \text{ km/h}$ im an- schließenden Weichen- bereich, etc., sofern nicht eine abweichende Geschwindigkeit angegeben wird

Der Abstand zwischen dem Vr und dem zugehörigen Hp hängt vom Bremsweg ab.

Beispiel:

Bei $V_{\max} = 160 \text{ km/h}$ beträgt der Abstand zwischen Vr und dem zugehörigen Hp $l_B \geq 1.000 \text{ m}$.

Die Mindestlänge eines Blocks $\min l_{\text{Block}}$ ist gleich dem maximalen Bremsweg $\max l_B$. *Tabelle 25* zeigt die Mindestblocklänge $\min l_{\text{Block}}$ beim HV-System in Abhängigkeit der Geschwindigkeit V.

Tabelle 25: Mindestblocklänge $\min l_{\text{Block}}$ in Abhängigkeit der Geschwindigkeit V [96]

Geschwindigkeit V [km/h]	Mindestblocklänge $\min l_{\text{Block}}$ [m]
$100 \text{ km/h} < V \leq 160 \text{ km/h}$	1.000 m auf Hauptbahnen
$V \leq 100 \text{ km/h}$	700 m auf Hauptbahnen
$V \leq 80 \text{ km/h}$	400 m auf Nebenbahnen

Bei HV-Systemen kann der Abstand zwischen dem Vr und dem zugehörigen Hp um bis zu 50% der Mindestblocklänge $\min l_{\text{Block}}$ verlängert (z.B. im Gefälle) und um bis zu 5% des Mindestblocklänge $\min l_{\text{Block}}$ verkürzt (z.B. in einer Steigung) werden [96].

Im HVG bei $V \leq 300 \text{ km/h}$ beträgt der erforderliche Bremswegabstand $l_{\text{Block}} \leq 7.500 \text{ m}$ [34].

D.h.:

Bei Geschwindigkeiten $V > 160 \text{ km/h}$ ist das HV-System weder sinnvoll noch ausreichend für eine hohe Kapazität.

4.2.1.2 Fahren auf „elektronische Sicht“

Die optischen Signale (Vr und Hp) können durch die „elektronische Sicht“ ersetzt werden.

„Elektronische Sicht“ bedeutet [43]:

„... die Zustandsinformationen der Strecken- und Bahnhofselemente, insbesondere die der Signale, [werden] so verarbeitet [...], dass ein Fahrtverlauf ohne direkte Sicht auf die optische Signalisierung durch indirekte Logikinformationen ermöglicht wird.“

4.2.1.2.1 Linienförmige Zugbeeinflussung (LZB)

Je höher die Geschwindigkeit V ist, desto länger ist der Bremsweg l_B , so dass es aus betrieblicher Sicht sinnlos ist, beim Fahren im bremswegabhängigen Blockabstand über $V = 160 \text{ km/h}$ die mit HV-Signalisierung bremswegabhängigen Blöcke zu verwenden.

Um bei Geschwindigkeiten $V > 160 \text{ km/h}$ einen guten Zugfolgeabstand zu erzielen, wurde es notwendig, diese Strecken mit einer linienförmigen Zugbeeinflussung (LZB)⁸³ zur kontinuierlichen Überwachung des Tfsz und dieses mit einer FSS auszurüsten (*Abbildung 76*).

⁸³ Siehe Kapitel 4.4.1

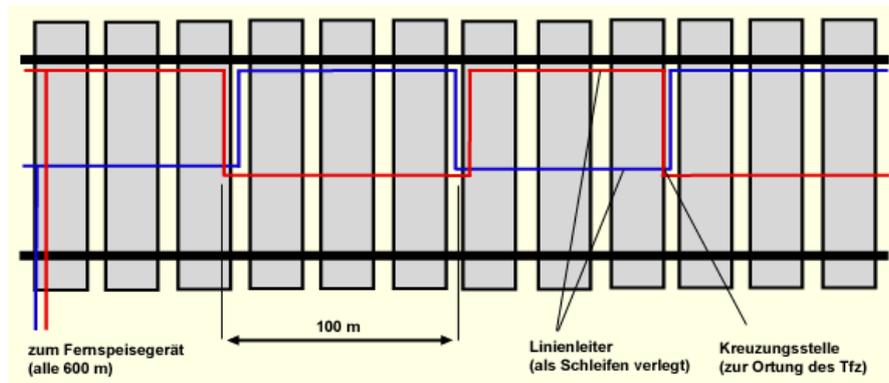


Abbildung 76: LZB-Streckeneinrichtung [145]

Abbildung 76 zeigt, dass die Information durch zwei Linienleitern (rote und blaue Linien) übertragen werden. Ein Linienleiter verläuft in der Mitte des Gleises und der andere Linienleiter befindet sich am Fuß einer Schiene entlang des Gleises. Die beiden Linienleiter kreuzen sich in regelmäßigen Abständen [84]. Neben Informationen wie Sollgeschwindigkeit V_{Soll} , Bremskraft a , Ruck c , etc. muss auch der Standort des Zuges übertragen werden. Er wird durch die sich jede 100 m kreuzenden Linienleiter bestimmt, dazwischen über Odometrie.

Für das Fahren auf „elektronische Sicht“ bei der LZB-Führung werden entsprechende Fahrzeugeinrichtungen benötigt: z.B. ein Rechner im Fahrzeug, für die FSS eine modulare Führer- raumanzeige (MFA) und ein modulares Führerraumdisplay (MFD) (Abbildung 77).



Abbildung 77: Multifunktionales Display für LZB-Führung [145]

Über eine Fahrzeugantenne werden kontinuierliche Information vom Stellwerk auf das Tfz vice versa über die Linienleiter übertragen und damit die Fahrweise des Zuges beeinflusst. Dem Tf wird z.B. die Information Soll- und Ist-Geschwindigkeit über die MFA angezeigt [43].

Tabelle 26 zeigt die Darstellung der Leuchtmelder und deren Bedeutung auf der MFA und dem MFD.

Tabelle 26: Darstellung der Leuchtmelder und deren Bedeutung auf der MFA und dem MFD [102]

Leuchtmelder		Bedeutung
MFA-Anzeige	MFD-Anzeige	
		<ul style="list-style-type: none"> LM (Leuchtmelder) "B" wird nicht angezeigt \Rightarrow Fahrzeug für LZB nicht betriebsbereit \Rightarrow (PZB betriebsbereit)
		<ul style="list-style-type: none"> LZB ist wirksam \Rightarrow LZB-Führung
		<ul style="list-style-type: none"> der Bremseninsatzpunkt ist in einer Entfernung von weniger als 1.000 m zu erwarten $V_{ist} < 30 \text{ km/h}$ unter V_{soll}
		<ul style="list-style-type: none"> Geschwindigkeitsüberschreitung: $V_{ist} > V_{soll} + 5 \text{ km/h}$

Aus Tabelle 26 ist ersichtlich:

- LM „B“: Die LZB ist bereit
- LM „Ü“: Fährt der Zug in das LZB-Gleis ein und wird von der LZB geführt, zeigt ihm das der LM „Ü“ (= Überwachung) an
- LM „G“: Geschwindigkeitswarnung/Bremseninsatzpunkt

Bei LZB-Führung ist eine kürzere Blocklänge möglich:

Mit CIR-ELKE⁸⁴ kann die technische Mindestlänge eines Blocks bis auf $\min l_{Block} = 37,5 \text{ m}$ reduziert werden [133].

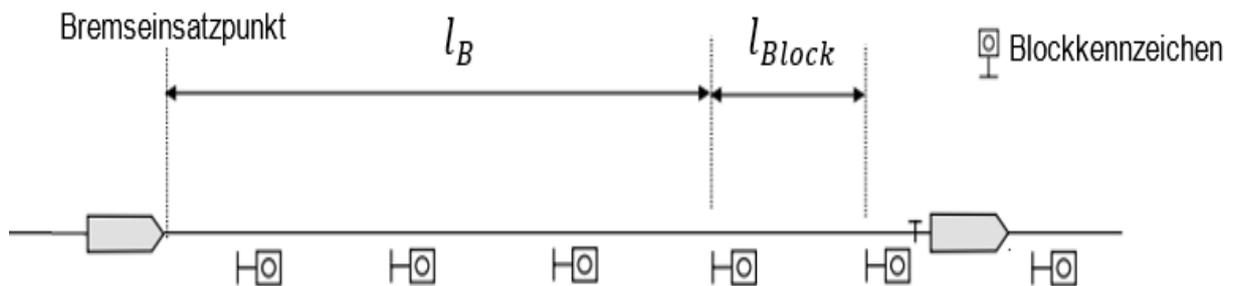


Abbildung 78: Bremswegabstand bei „elektronischer Sicht“ mit LZB-Führung (Eigene Darstellung)

84 CIR-ELKE = Computer Integrated Railroading – Erhöhung der Leistungsfähigkeit im Kernnetz. CIR-ELKE zielt darauf ab, die Kapazität durch den Einsatz moderner Computertechnologie i.V.m. einer optimierten Blocklänge zu erhöhen [43].

Aus *Abbildung 78* ist ersichtlich, dass mit der „elektronischen Sicht“ der Belegungsabstand in Abhängigkeit der vorgegeben Bremsverzögerung a über mehrere Blöcke eingesehen werden kann. Die von der DEUTSCHEN BUNDESBahn in Zusammenarbeit mit Siemens entwickelte Frühform der LZB ermöglichte zunächst eine elektronische Vorausschau über 5 km [145]. Auf dem derzeitigen Netz der DB NETZ AG beträgt die „elektronische Sicht“ [126]:

- bei $V_{\max} = 200$ km/h 7 km
- bei V_{\max} zwischen $V = 230$ und 280 km/h 10 km
- bei $V_{\max} = 300$ km/h 13 km

4.2.1.2.2 European Train Control System (ETCS)

Ende der 1980er Jahren hat der internationale Eisenbahnverband UIC (UNION INTERNATIONALE DES CHEMINS DE FER) eine Initiative zur Vereinheitlichung der europäischen Zugbeeinflussungssysteme gestartet. Das Ergebnis: European Train Control System (ETCS) [34]. *Tabelle 27* beschreibt verschiedene ETCS-Level.

Tabelle 27: ETCS Funktionsstufen ([84] und [95])

Bezeichnung	Beschreibung
Level 0	ETCS-Bordgerät ohne (ETCS-) Zugbeeinflussung: ⇒ reine Überwachung der Geschwindigkeit
Level NTC	Nationales Zugbeeinflussungssystem (National Train Control, NTC) auf ETCS-Fahrzeuggerät aktiv, z.B. PZB/LZB.
Level 1	punktförmige (diskrete) Beeinflussung i.d.R. mit Lichtsignalen und ohne Funkverbindung, meist ohne FSS
Level 2	Kontinuierliche Beeinflussung durch Funkverbindung über den Radio Block Center (RBC) mit dem Global System for Communications-Rail (GSM-R) auf die FSS ⇒ im Teilblockmodus ohne Lichtsignale. Der Zugfolgeabstand wird über die Freigabe ausreichend kurzer Blöcke geregelt (quasikontinuierliche Fahrwegfreigabe). Durch dieses Vorgehen kommt er dem Fahren im absoluten Bremswegabstand sehr nahe.
Level 3	<ul style="list-style-type: none"> • Datenaustausch wie beim Level 2 • Auf ortsfeste Einrichtungen zur Gleisfreimeldung wird verzichtet • Level 3 kann als reiner Moving Block betrieben werden.

Sollen Geschwindigkeiten $V > 160$ km/h gefahren werden, wird der ETCS-Level 2 realisiert [22]. Da die LZB den bremstechnischen Anforderungen von Zügen mit Geschwindigkeiten $V > 160$ km/h entspricht, ist in Deutschland die LZB bis zur Umsetzung des ETCS-Levels 2 noch die Regel-LST für diesen Geschwindigkeitsbereich. Allerdings werden keine NBS mehr mit LZB ausgerüstet. Langfristig wird die LZB vollständig durch das ETCS ersetzt [34].

Die Voraussetzung für die Ausrüstung mit ETCS-Level 2 ist, dass die Stellwerke für die Anbindung eines RBC geeignet sind [22]. Die kontinuierliche Übertragung von Informationen des Fahrwegs und des Fahrzeugs wird unter Nutzung des GSM-R⁸⁵ und RBC auf die FSS realisiert (Abbildung 79).

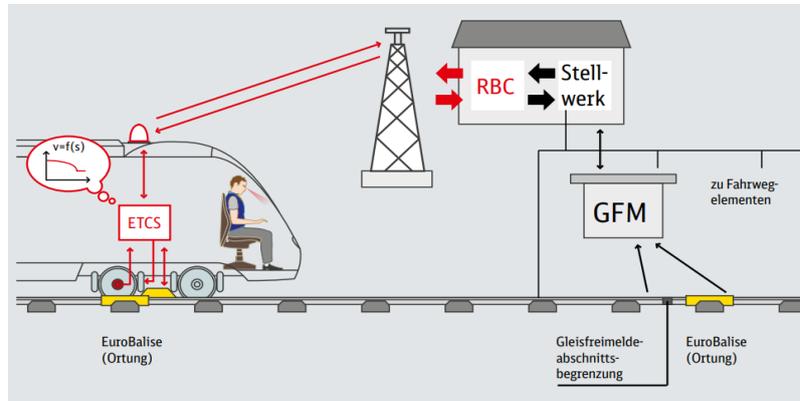


Abbildung 79: Übertragung und Überwachung beim ETCS-Level 2 [22]

Das RBC bildet die Fahrbefehle auf Basis der Fahrweginformationen des Stellwerks und den ausgetauschten Fahrzeuginformationen. Sie werden gemäß der Euroradio-Spezifikation über GSM-R an das Fahrzeug übertragen. Bevor das RBC die für einen Fahrbefehl erforderlichen Informationen berechnen kann, muss es genau wissen, wo sich der Zug befindet und in welche Richtung er fährt [33]. Informationen wie aktuelle Geschwindigkeit V , Bremsweg l_B usw. werden auf dem Führerdisplay (DMI⁸⁶, Abbildung 80) in der Tzf-Kabine angezeigt.

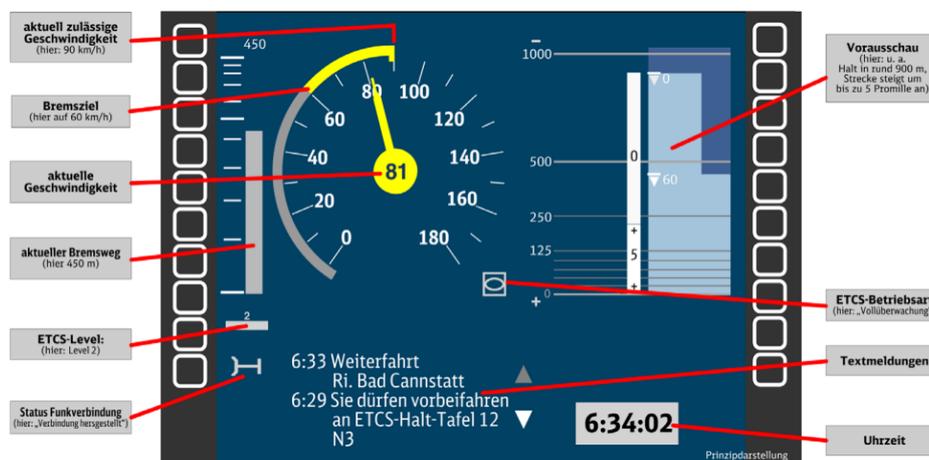


Abbildung 80: Auf dem DMI angezeigte Informationen [95]

85 Das Future Railway Mobile Communication System (FRMCS) ist das Nachfolgesystem von GSM-R für die Sprach- und Datenkommunikation zwischen den Zügen und dem RBC, das von der EU gemeinsam mit wichtigen Unternehmen der westeuropäischen Eisenbahnindustrie entwickelt wurde. Da im ETCS-Betrieb die Übertragungszeit durch das FRMCS gegenüber GSM-R kürzer sein wird, soll das FRMCS das GSM-R für den Einsatz beim ETCS ersetzen, um die Fahrwegkapazität zu erhöhen. In der Schweiz soll FRMCS bis 2035 GSM-R ablösen. Die DB plant die Einführung von FRMCS zwischen 2026 und 2035 [149].

86 DMI = Driver Maschine Interface, deutsch: Führerdisplay.

Beispiel (Abbildung 80):

Innerhalb von 450 m soll die Geschwindigkeit des Zuges auf $V = 60 \text{ km/h}$ reduziert werden und in etwa 900 m wird eine Haltestelle erreicht, ab der die Strecke bis zu 5 ‰ ansteigt.

Die NBS Erfurt - Leipzig/Halle ist bereits als zweigleisige, elektrifizierte Eisenbahnstrecke für den hochwertigen Personen- und Güterverkehr in Betrieb. Sie ist für eine Höchstgeschwindigkeit von $V_{\max} = 300 \text{ km/h}$ ausgelegt und hat eine Gesamtlänge von 123 km [33].

Das Fahren auf „elektronische Sicht“ im ETCS-Level 2 zeigt zusammenfassend folgende Vorteile ([33] und ZHAO):

- Höchstgeschwindigkeiten bis zu $V_{\max} = 300 \text{ km/h}$ sind möglich
- Verbesserung der Streckenkapazität, durch Reduzierung der Mindestzugfolgezeit
- Reduzierung der Instandhaltungskosten, da auf ortsfeste Einrichtungen zur Gleisfreimeldung verzichtet werden kann

4.2.2 Fahren im Bremswegabstand (engl. Moving Block)

Um die Leistungsfähigkeit auf hoch belasteten Strecken zu steigern, wurde als Zugfolge-technik das Fahren im Bremswegabstand l_B entwickelt. Es unterteilt sich wie folgt:

- Fahren im relativen Bremswegabstand $l_{B,rel.}$
- Fahren im absoluten Bremswegabstand $l_{B,absol.}$

Das Fahren im Bremswegabstand l_B wurde bei Vollbahnsystemen noch nicht in die Praxis umgesetzt. So gibt es bis heute z.B. keine praktikable Lösung für Güter-Wagen-Züge. Jedoch wird das Fahren im Bremswegabstand l_B bei einigen Nahverkehrssystemen⁸⁷ mit starr gekuppelten Triebwageneinheiten angewandt ([84] und [86]).

4.2.2.1 Fahren im relativen Bremswegabstand

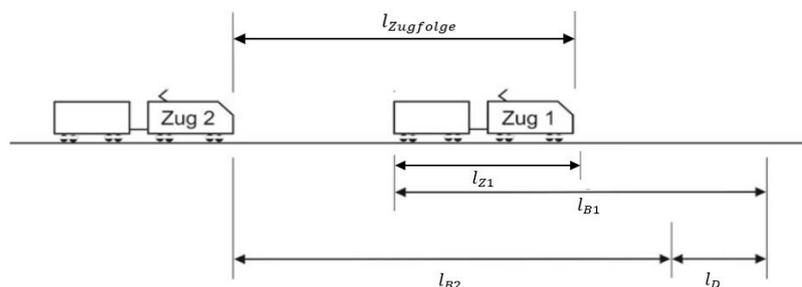


Abbildung 81: Zugfolgeabstand im relativen Bremswegabstand $l_{B,rel.}$ [84]

Der Zugfolgeabstand $l_{Zugfolge}$ wird mit Gleichung (4-2) unter Berücksichtigung des relativen Bremswegabstands $l_{B,rel.}$ wie folgt berechnet:

87 Der Moving Block wird bei den U-Bahnen von London (z.B. Jubilee Line, Victoria Line, etc.) und bei Mass Rapid Transit (MRT) in Hongkong (z.B. Tuen Ma-Linie, Disneyland Resort-Linie, etc.) angewandt ([86] und [146])

$$l_{\text{Zugfolge}} = l_{B2} + l_D + l_{B1} + l_{Z1} \quad (4-2)$$

l_{B1} = Bremsweg Zug 1

l_{B2} = Bremsweg Zug 2

Der Mindestzugfolgeabstand l_{Zugfolge} , welcher der Differenz zwischen den sich überlagernden, geschwindigkeitsabhängigen Bremswegen l_{B1} und l_{B2} sowie dem Durchrutschweg l_D von Zug 2 entspricht, muss zwischen zwei aufeinanderfolgenden Fahrzeugen eingehalten werden [84] (Abbildung 81).

Die Bremswege l_{B1} und l_{B2} hängen von der Bremsverzögerung a und der momentanen Geschwindigkeit v ab. Wenn die Bremsverzögerung a und die Geschwindigkeit v beider Züge gleich ist, wird der Abstand (= Zugschluss des Zuges 1 bis Zugspitze des Zuges 2) zum Minimum („Fahren im Nullabstand“) [84].

Obwohl die Kapazität der Strecke auf diese Weise verbessert werden kann, besteht das Risiko, dass der nachfolgende Zug [84]

- möglicherweise nicht rechtzeitig abbremst, wenn der vorausfahrende bzw. der nachfolgende Zug einen Ausfall hat.
- beim Bremsverzögern/-versagen auf den abbremsenden vorausfahrenden Zug auffährt. Z.B. der Bremsweg des 1. Zuges aufgrund Unfalls wesentlich kürzer ist als der (Not-) Bremsweg des 2. Zuges.

4.2.2.2 Fahren im absoluten Bremswegabstand

Das Fahren im absoluten Bremswegabstand $l_{B,absol.}$ optimiert das Fahren im Bremswegabstand hinsichtlich des Sicherheitsrisikos. Der Zugfolgeabstand l_{Zugfolge} zwischen den Zügen bezieht sich auf den maximalen Bremswegabstand $\max l_{B2}$ des nachfolgenden Zuges 2 plus dem Durchrutschweg l_D und der Länge des Zuges 1 l_{Z1} (Abbildung 82).

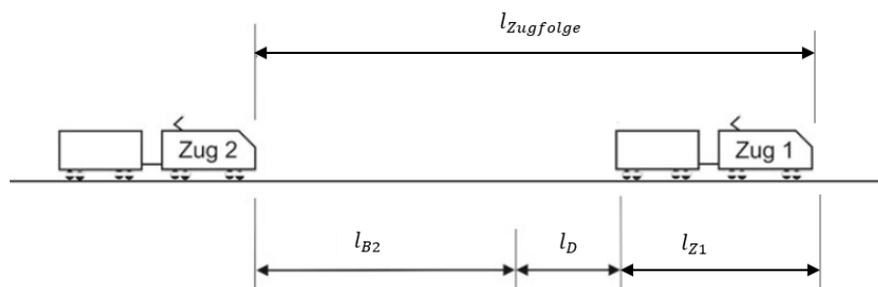


Abbildung 82: Zugfolgeabstand im absoluten Bremswegabstand $l_{B,absol.}$ [84]

Das Fahren im absoluten Bremswegabstand $l_{B,absol.}$ ist sicherer als im relativen Bremswegabstand $l_{B,rel.}$:

Wenn der vorausfahrende Zug einen Ausfall hat, kann der nachfolgende Zug rechtzeitig abbremst.

Der Zugfolgeabstand l_{Zugfolge} ergibt sich aus *Abbildung 82* mit

$$l_{\text{Zugfolge}} = l_{B2} + l_D + l_{Z1} \quad (4-3)$$

Beim Fahren im absoluten Bremswegabstand $l_{B,\text{absol.}}$ wird der Zugschluss des vorausfahrenden Zuges zu einem „wandernden“ Gefahrpunkt. Um die sichere Bewegung eines Zuges zu gewährleisten, muss nicht nur die Position des Zugschlusses mit Hilfe der LST zuverlässig bestimmt werden können, sondern auch die Integrität des Zuges selbst überwacht werden [84], was bei Güter-Wagen-Zügen erst mit der automatischen Kupplung (AK) signaltechnisch sicher umgesetzt werden kann.

Aus den im Kapitel 4.2.2 genannten Gründen werden in dieser Arbeit die nachfolgenden Berechnungen ausschließlich für das Fahren im festen Raumabstand durchgeführt. Züge mit FSS i.V.m. ETCS-Level 2 ermöglichen mit dem Fahren auf „elektronische Sicht“ eine flexible Nutzung der Blöcke l_{Block} , um den Zugfolgeabstand l_{Zugfolge} durch eine quasikontinuierliche Fahrwegfreigabe (Zug um Zug Freigabe der direkt vor dem Tzf befindlichen Blöcke = quasi wandernder fester Raumabstand) dem absoluten Bremswegabstand $l_{B,\text{absol.}}$ anzunähern [84]. Somit ist es möglich Züge – wie in dieser Arbeit vorgesehen – mit einer Höchstgeschwindigkeit bis zu $V = 500 \text{ km/h}$ mit ETCS-Level 2 in einem optimalen Zugfolgeabstand $\text{opt. } l_{\text{Zugfolge}}$ mit hoher Streckenkapazität auch im festen Raumabstand verkehren zu lassen.

4.3 Dimensionierung der Infrastruktur – Spurplan

4.3.1 Ermittlung der Belegungszeit

Aus Kapitel 2.4.1 ist ersichtlich, dass eine Sperrzeitstreppe die Belegungszeit t_{Beleg} und damit die zeitliche Verweildauer eines Zuges für einen Block angibt. Sie spielt eine erhebliche Rolle bei der Bestimmung des zeitlichen und räumlichen Zugfolgeabstands t_{Zugfolge} , l_{Zugfolge} und damit auch der Anzahl der parallelen Gleise je Abschnitt (parallele Kapazität). Für den zeitlichen Zugfolgeabstand t_{Zugfolge} ist die Blockbelegungszeit t_{Beleg} (sequentielle Kapazität) maßgebend. Die „parallele Kapazität ist nachzuweisen, wenn die Mindestzugfolgezeit t_{Zugfolge} und damit die „sequentielle Kapazität“ erreicht ist.

Um die Belegungszeiten je Block t_{Beleg} im Gleisabschnitt zwischen zwei ITF-Knoten zu ermitteln, muss zunächst die zeitliche und räumliche Beziehung eines Zuges für diesen Gleisabschnitt bestimmt werden, d.h.:

Ermittlung der FSL zwischen zwei ITF-Knoten.

Anhand der vorgegebenen Fahrzeug-, Strecken- und Fahrplandaten resultiert die FSL eines Zuges aus dem in Kapitel 3.3.2 dargestellten Fahrzeitberechnungsmodell. Daraus kann die

Geschwindigkeit v_i und die Beschleunigung a_i an jedem Positionspunkt i zwischen den beiden ITF-Knoten und die Fahrzeit der FSL eines Zuges durch die folgende Formel bestimmt werden:

$$t_i = \frac{-v_i \pm \sqrt{v_i^2 + 2a_i \cdot \Delta s}}{a_i} \quad (4-4)$$

- t_i = Zeit bis zum Punkt i
- v_i = momentane Geschwindigkeit am Punkt i
- a_i = momentane Beschleunigung am Punkt i
- Δs = Wegschrittabstand

Wenn die FSL und die Blockbelegungszeiten t_{Beleg} aller Züge zwischen den ITF-Knoten bekannt sind, kann die benötigte Gleisinfrastruktur des zukunftsfähigen ITF ermittelt und der Spurplan entworfen werden.

Die Berechnung der Belegungszeit t_{Beleg} im ITF-Knoten unterscheidet sich von der auf der Freien Strecke, sodass die Gesamtbelegungszeit $\sum t_{\text{Beleg}}$ zwischen zwei ITF-Knoten für die nachstehenden Bereiche jeweils separat ermittelt werden müssen:

- Freie Strecke $t_{\text{Beleg,FS}}$
- Bahnhofs-Gleisgruppe $t_{\text{Beleg,GG}}$
- Bahnhofskopf $t_{\text{Beleg,Bhfskopf}}$

$$\sum t_{\text{Beleg}} = t_{\text{Beleg,FS}} + t_{\text{Beleg,GG}} + t_{\text{Beleg,Bhfskopf}} \quad (4-5)$$

$\sum t_{\text{Beleg}} = \text{Gesamtbelegungszeit}$

4.3.2 Spurplandimensionierung für die Freie Strecke

Bei Fahrten im ETCS-Level 2 Teilblockmodus⁸⁸ unterscheidet sich die Berechnung der Belegungszeit $t_{\text{Beleg,FS}}$ von der traditionellen Berechnung im festen Raumabstand, da die virtuellen ortfesten Signale je nach Geschwindigkeit V bis zu 13 km vorausschauend auf dem DMI der FSS angezeigt werden (vgl. Kapitel 4.2.1.2.1).

Tabelle 28 zeigt die Elemente für die spezifische Blockbelegungszeit auf der Freien Strecke

$t_{\text{Beleg,FS}}$

⁸⁸ Siehe Kapitel 4.4.3

Tabelle 28: Belegungszeit je Block auf der Freien Strecke $t_{Beleg,FS}$ für ETCS-Level 2 [70]

Teil	Elemente der Sperrzeit je Block auf der Freien Strecke	ETCS-Level 2
Teil 1	Fahrstraßenbildzeit t_{Fb}	konstanter Wert für digitale Stellwerke ⁸⁹
	Signalsichtzeit t_{Sicht}	vernachlässigbar, da mit FSS auf DMI
	Annäherungsfahrzeit t_{An}	geschwindigkeitsabhängig, über FSL ermittelbar
Teil 2	Fahrzeit im Blockabschnitt t_{Block}	geschwindigkeitsabhängig, über FSL ermittelbar
Teil 3	Räumfahrzeit t_R	geschwindigkeitsabhängig, über FSL ermittelbar
	Fahrstraßenauflösezeit t_{Fa}	konstanter Wert für digitale Stellwerke ⁹⁰

Aus Tabelle 28 ergibt sich die Belegungszeit $t_{Beleg,FS}$ für einen Zug in einem Block bei Verwendung des LST ETCS-Level 2 für die Freie Strecke aus Abbildung 83

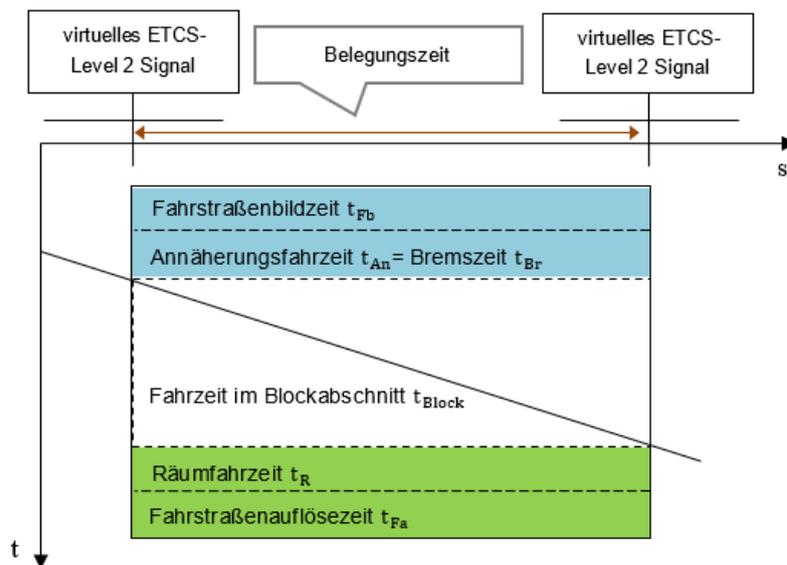


Abbildung 83: Belegungszeit eines Zuges je Block auf der Freien Strecke $t_{Beleg,FS}$ für ETCS-Level 2 ([70], Ergänzung ZHAO)

mit

$$t_{Beleg,FS} = t_{Fb} + t_{An} + t_{Block} + t_R + t_{Fa} \quad (4-6)$$

$t_{Beleg,FS}$ = Belegungszeit eines Zuges in einem Block

t_{Fb} = Fahrstraßenbildzeit

t_{An} = Annäherungsfahrzeit

t_{Block} = Fahrzeit im Blockabschnitt

t_R = Räumfahrzeit

t_{Fa} = Fahrstraßenauflösezeit

89 Die durchschnittliche Fahrstraßenbildzeit beträgt $t_{Fb} = 6 \text{ sec}$ bis $\max t_{Fb} = 12 \text{ sec}$ [23]

90 Die Fahrstraßenauflösezeit beträgt $t_{Fa} = 3 \text{ sec}$ [23]

wobei die Annäherungsfahrzeit t_{An} aus dem Bremswegabstand l_B berechnet werden kann:

$$l_B = \frac{v^2}{2a} \quad (4-7)$$

$$t_{An} = \frac{l_B}{v} = \frac{v}{2a} \quad (4-8)$$

Wie Abbildung 83 zeigt, wird die Belegungszeit eines Zuges je Block auf der Freien Strecke $t_{Beleg,FS}$ am Punkt i für den ETCS-Level 2 durch folgende Aspekte verbreitert:

- vorauseilende Sperrzeit $t_{vor.Sperrzeit}$ (blauer Bereich)
 - Fahrstraßenbildezeit t_{Fb}
 - Annäherungsfahrzeit t_{An} = Bremszeit t_{Br} aus der momentanen Geschwindigkeit v mit der gewählten Bremsverzögerung a
- nacheilende Sperrzeit $t_{nach.Sperrzeit}$ (grüner Bereich)
 - Räumfahrzeit t_R = Zeit um die Distanz der Zuglänge l_Z inklusive dem Durchrutschweg l_D mit der momentanen Geschwindigkeit v zu passieren
 - Fahrstraßenauflösezeit t_{Fa}

Die vorauseilende Sperrzeit berechnet sich mit

$$t_{vor.Sperrzeit} = t_{Fb} + t_{An} \quad (4-9)$$

Die vorauseilende FSL am Punkt i kann durch die tatsächliche Sperrzeit ermittelt werden

$$t_{vor.FSL} = T_i - (t_{Fb} + t_{An}) \quad (4-10)$$

T_i = Uhrzeit eines Zuges am Punkt i

Die nacheilende Sperrzeit berechnet sich mit

$$t_{nach.Sperrzeit} = t_R + t_{Fa} \quad (4-11)$$

Die nacheilende FSL am Punkt i kann durch die tatsächliche Fahrzeit ermittelt werden

$$t_{nach.FSL} = T_i + t_R + t_{Fa} \quad (4-12)$$

Abbildung 84 zeigt die tatsächliche Belegungszeit begrenzt durch die:

- blaue Linie = vorauseilende FSL
- grüne Linie = nacheilende FSL

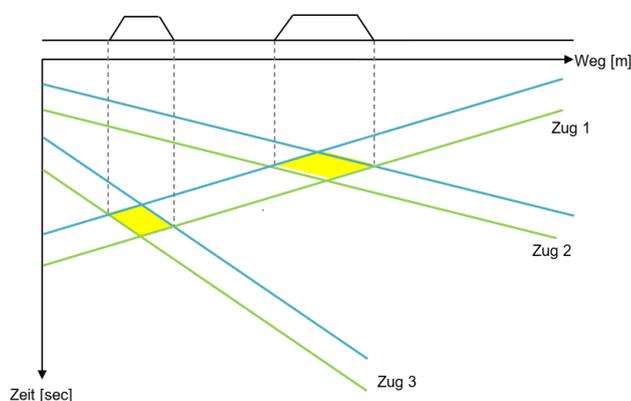


Abbildung 84: FSL-Belegungsbander mit Überlappung (gelb) von zwei Zügen ([42] und [122])

Wenn sich in einem Belegungsband verschiedene Züge auf einem Abschnitt des gesamten Zeit-Weg-Diagramms überlappen, bedeutet dies:

Mehrere Züge befinden sich gleichzeitig im gleichen Wegabschnitt.

Damit die Züge diesen Abschnitt befahren können, ohne sich gegenseitig zu beeinflussen, müssen zur Erreichung der notwendigen „partiellen Kapazität“ Gleise hinzugefügt werden. Die Untergrenze der Anzahl der Gleise hängt davon ab, wie viele Züge gleichzeitig denselben Abschnitt belegen.

Beispiel zu *Abbildung 84*: Wenn sich zwei Züge gleichzeitig im gelben Bereich befinden, benötigt dieser Bereich mindestens zwei in die gleiche Richtung befahrbare Gleise (siehe Kapitel 2.4.3, *Abbildung 53*).

4.3.3 Ermittlung der Gleisanzahl in der Bahnhofs-Gleisgruppe (GG)

Anhand eines zukunftsfähigen ITF zeigt sich, dass die Belegungszeit $t_{\text{Beleg,GG}}$ eines Zuges von der Ankunft bis zum Verlassen eines Bahnhofs hauptsächlich die Zeit darstellt, in welcher der Zug am Bahnsteig verbleibt. Die Ankunftszeit eines Zuges $T_{\text{an,GG}}$ ist der Zeitpunkt, in dem der Zug am Bahnsteig zum Stillstand kommt (= Stillstand, siehe *Abbildung 85*) um dann die Türen zu öffnen. Abschließend folgt der Zeitpunkt $T_{\text{ab,GG}}$, in dem der Zug vom Bahnsteig abfährt (Betriebs-Abfahrzeit $T_{\text{ab,GG}}$, siehe *Abbildung 85*). Während dieses Vorgangs hält der Zug immer in der GG und die Wegbewegung ist immer 0.

Die Belegungszeit eines Zuges in der GG $t_{\text{Beleg,GG}}$ (= Regelhaltezeit, siehe *Abbildung 85*) wird unter zu Hilfenahme der Stillstands- und Betriebsabfahrzeit am Bahnsteig nach [140] berechnet:

$$t_{\text{Beleg,GG}} = T_{\text{ab,GG}} - T_{\text{an,GG}} + t_{\text{puffer,GG}} \quad (4-13)$$

$t_{\text{Beleg,GG}}$ = Belegungszeit in der GG

$T_{\text{an,GG}}$ = Uhrzeit des Stillstandes

$T_{\text{ab,GG}}$ = Uhrzeit der Betriebsabfahrzeit

$t_{\text{puffer,GG}}$ = Pufferzeit in der GG

Die DB-Richtlinie 405 [98] definiert die Bahnhofsgleissperrzeit wie folgt (*Abbildung 85*):

- Einfahrtsperrzeit $t_{\text{Ein,GG}}$: = die Fahrzeit eines Zuges vom Bahnhofseinfahrtssignal bis zu dem Stillstand plus der Fahrstraßenauflösezeit t_{Fa}
- Regelhaltezeit $t_{\text{halt,GG}}$: = Zug verbleibt am Bahnsteig
sie unterteilt sich in die
 - Verkehrs-Haltezeit $t_{\text{H,GG}}$ = Türöffnungszeit und Fahrgastwechselzeit
 - Abfertigungszeit $t_{\text{Ab,GG}}$ = Türschließzeit, Prüf- und Fertigmeldezeit sowie Reaktionszeit
- Ausfahrtsperrzeit $t_{\text{Aus,GG}}$: = die Zeit von der veröffentlichte Verkehrs-Abfahrt eines Zuges vom Bahnsteig bis zur Zugschlussstelle des Ausfahrtsignals plus der Fahrstraßenbildezeit t_{Fb}

WIECZOREK erläutert in [140] die Pufferzeit in der GG:

- $t_{\text{puffer,GG}}$: = der Belegungspuffer zur Koordinierung der unterschiedlichen Zugfolgefälle. $t_{\text{puffer,GG}}$ ist ein Teil der Ausfahrsperrzeit t_{Aus} in *Abbildung 85*

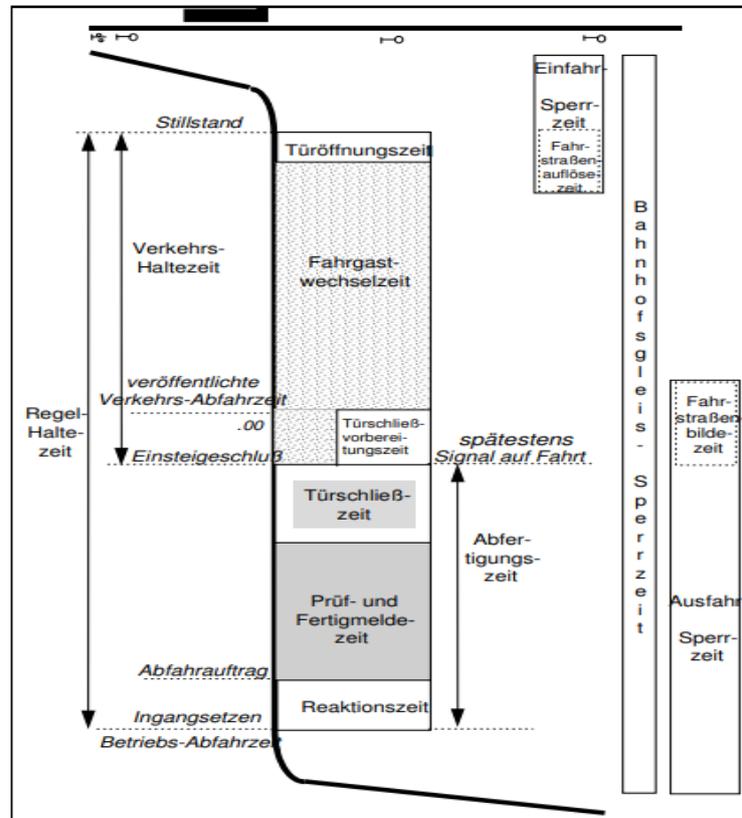


Abbildung 85: Bahnhofsgleissperrzeit [98]

Da sich die Fahrstraßenauflösezeit t_{Fa} der Einfahrsperrzeit $t_{\text{Ein,GG}}$ mit einem Teil der Haltezeit $t_{\text{H,GG}}$ überlagert und die Ausfahrsperrzeit $t_{\text{Aus,GG}}$ die Türschließvorbereitungszeit samt der Abfertigungszeit $t_{\text{Ab,GG}}$ sowie die Fahrstraßenbildezeit t_{Fb} ab dem Ausfahrtsignal vollständig abdeckt (*Abbildung 85*), kann die Belegungszeit wie folgend berechnet werden:

$$t_{\text{Beleg,GG}} = t_{\text{Ein,GG}} + t_{\text{H,GG}} + t_{\text{Aus,GG}} \quad (4-14)$$

$t_{\text{Beleg,GG}}$ = Belegungszeit in der GG

$t_{\text{Ein,GG}}$ = Fahrzeit bis zum Stillstand am Bahnsteig

$t_{\text{H,GG}}$ = Haltezeit am Bahnsteig = $T_{\text{ab,GG}} - T_{\text{an,GG}}$

$t_{\text{Aus,GG}}$ = Fahrzeit von der Abfahrt des Zuges bis zum Überfahren der Zugschlussstelle des Ausfahrtsignals

Abbildung 86 zeigt die Belegungen der Zugfahrten in der GG. Sie werden analog [140] (*Abbildung 51*) als Geraden dargestellt, die auf der Achse der Zugfahrten liegen. Vom Beginn bis zum Ende der Belegung erstrecken sich diese Geraden parallel zur Zeitachse, wobei die blau-gestrichelten Linien – wie zuvor erläutert – die Fahrzeiten bis zum Stillstand am Bahnsteig $t_{\text{Ein,GG}}$ und die Ausfahrsperrzeiten $t_{\text{Aus,GG}}$ darstellen.

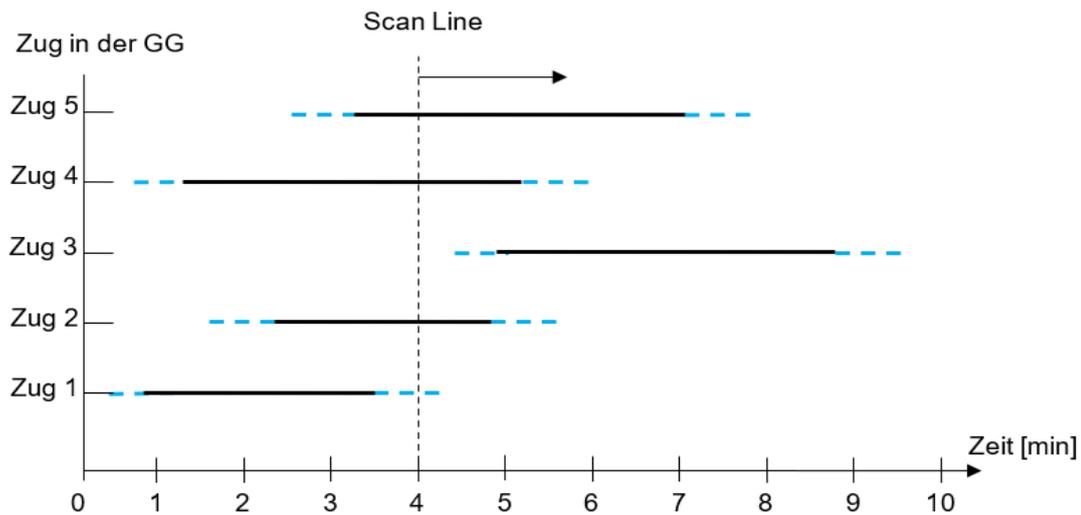


Abbildung 86: Belegungszeiten in der Bahnhofs-Gleisgruppe (analog [140], Abbildung 51)

Mithilfe des Scan-Linien-Verfahrens nach [140] wird zunächst die Anzahl der Gleise in der GG („parallele Kapazität“) bestimmt (siehe z.B. Abbildung 86):

Es überlappen sich die FSL aller Züge, so dass 5 Gleise in der GG zur Verfügung stehen müssen.

Anmerkung: Die FSL von Zug 1 und Zug 3 liegen so knapp auseinander, dass im Verspätungsfall für einen zukunfts-fähigen ITF auch für Zug 3 ein separates Gleis zur Verfügung gestellt werden muss.

4.3.4 Bestimmung der Gleisverbindungen im Bahnhofskopf

4.3.4.1.1 Belegungszeiten im Bahnhofskopf

Die Belegungszeit eines Zuges im Bahnhofskopf $t_{\text{Beleg,Bhfskopf}}$ wird auf die Zugspitze bezogen.

Wenn ein Zug aus der GG ausfährt (Betriebsabfahrzeit $T_{\text{ab,GG}}$, Abbildung 85) und sich Richtung Zielbahnhof bewegt, hängt das Belegungsband $t_{\text{Beleg,Bhfskopf}}$ – im Gegensatz zur GG – von der Beschleunigung a bzw. der Geschwindigkeit v ab. Die Belegungszeit $t_{\text{Beleg,Bhfskopf}}$ bei der Ausfahrt aus einer GG über den Abfahrtsbahnhofskopf zum Zielbahnhof wird mit der Abfertigungszeit t_{Ab} (Abbildung 85) nach der folgenden Formel berechnet:

$$t_{\text{Beleg,Bhfskopf}} = t_{\text{Fb}} + t_{\text{Ab}} + t_{\text{Bahnhofskopf}} + t_{\text{R}} + t_{\text{Fa}} \quad (4-15)$$

$t_{\text{Beleg,Bhfskopf}}$ = Belegungszeit im Bahnhofskopf
 t_{Ab} = Abfertigungszeit
 $t_{\text{Bahnhofskopf}}$ = Fahrzeit durch den Bahnhofskopf

Wenn – siehe Abbildung 85 – ein Zug nach der Freien Strecke über den Bahnhofskopf bis zur GG im Zielbahnhof fährt, wird die Belegungszeit $t_{\text{Beleg,Bhfskopf}}$ mit der Fahrzeit bis zum Stillstand am Bahnsteig $t_{\text{Ein,GG}}$ wie folgt berechnet:

$$t_{\text{Beleg,Bhfskopf}} = t_{\text{Fb}} + t_{\text{An}} + t_{\text{Bahnhofskopf}} + t_{\text{Ein,GG}} + t_{\text{Fa}} \quad (4-16)$$

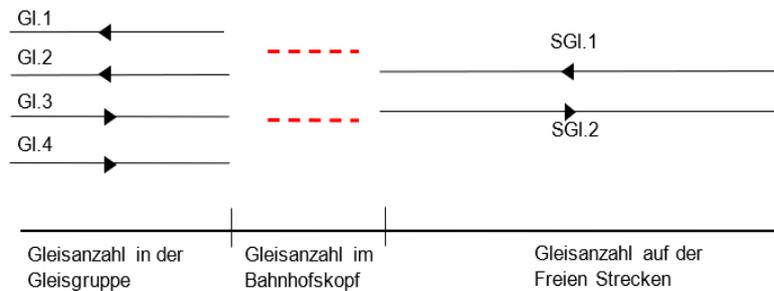


Abbildung 87: Erforderliche Fahrstraßen im Bahnhofskopf für einen zukunftsfähigen ITF

Beispiel:

Wie in *Abbildung 87* zu erkennen ist, stellen die schwarzen Linien links die Anzahl der benötigten parallelen Gleise gemäß dem zukunftsfähigen ITF in der Bahnhofs-Gleisgruppe dar. Die schwarzen Linien rechts zeigen die Gleise der Freien Strecke. Die rot-gestrichelten Linien weisen darauf hin, dass zwei Züge gleichzeitig über den Bahnhofskopf fahren.

Wenn sich die Belegungsbänder zweier Züge am Bahnhofskopf überlappen, bedeutet das, dass zwei Züge im Bahnhofskopf gleichzeitig dieselbe Fahrstraße benutzen wollen. Hier kommt es zu einem Fahrstraßenausschluss. Um diesen zu beseitigen lässt sich nach [140] mit dem Scan-Verfahren die Anzahl der benötigten Gleise und damit die „partielle Kapazität“ für einen zukunftsfähigen ITF bestimmen. Es müssen mindestens zwei gleichzeitig verfügbare parallele Fahrstraßen in diesem Bereich vorhanden sein.

Die Bestimmung der Weichenverbindung wird in Kapitel 4.3.4.1.2 beschrieben.

4.3.4.1.2 Bestimmung der Weichenverbindungen im Bahnhofskopf

Um die Weichenverbindungen zu bestimmen, müssen die gleichzeitig erforderlichen Fahrstraßen dargestellt werden, damit sie den Anforderungen der Gleisbelegungen entsprechen. Darüber hinaus besteht das Ziel, mit möglichst wenigen Infrastrukturelementen (z.B. Weichen) auszukommen [29]. Daher ist es zunächst erforderlich

- die genaue Begrenzung des Bahnhofskopfs zu ermitteln.
Die Weiche, die am weitesten vom Bahnsteig entfernt ist, wird als Bahnhofskopfsende betrachtet.
- alle verfügbare Fahrmöglichkeiten aufzuzeigen.
Für jeden Zug z_m gibt es mehr als eine verfügbare Fahrmöglichkeit.

Bei der Zuordnung der Zugfahrten zu den Fahrstraßen werden die einzelnen Zugfahrten betrachtet. Sie müssen folgende Regeln berücksichtigen:

- Die Priorität einer Zugfahrt hängt von der Höchstgeschwindigkeit v_{\max} des Zuges ab.
- Die höher priorisierten Zugfahrten sind anfänglich so weit wie möglich den Durchfahrtsgleisen zuzuordnen, in denen keine Weichenverbindung benutzt werden müssen.
- Solange keine Konflikte mit einer priorisierten Zugfahrt bestehen, sind die weiteren Zugfahrten auf die benachbarten Gleise zu legen.

Zur besseren Beschreibung der Fahrmöglichkeiten jedes Zuges werden nach [140] die Weichenverbindungen nach dem Prinzip der Graphentheorie konstruiert. Danach wird mit LP

das „globale Optimum“ gefunden. Die Zielfunktion und die Nebenbedingungen werden wie folgt beschrieben:

Zielfunktion:

$$\min \sum c_m \cdot X_m \quad (4-17)$$

$$X_m = \sum x_i \quad (4-18)$$

- c_m = Prioritätsgewicht eines Zuges z_m
- X_m = Anzahl der Weichen, über die der Zug z_m fährt
- x_i = die Weiche über die der Zug z_m fährt, wird als Knoten x_i bezeichnet

Die Zielfunktion stellt die Minimierung der Weichenanzahl im Untersuchungsgebiet bei konfliktfreiem zukunftsfähigen ITF-Betrieb der Züge dar. Das Prioritätsgewicht eines Zuges c_m richtet sich nach der maximalen Geschwindigkeit $\max v$ des Zuges. Je höher $\max v$ ist, desto größer ist das Prioritätsgewicht. Die Zielfunktion kann den Minimalwert erreichen, wenn die priorisierten Hochgeschwindigkeitszüge weniger Weichen als die langsameren Züge durchfahren.

Nebenbedingungen:

$$x_i + x_j \leq 1 \quad (4-19)$$

$$\sum_1^m x_{m,i} \leq 1 \quad (4-20)$$

$$x_i \in \{0, 1\} \quad (4-21)$$

$x_{m,i}$ = Knoten i , besetzt mit dem Zug z_m

Die erste Nebenbedingung (Gleichung (4-19)) besagt:

Für jede Kante $k = \{x_i, x_j\}$ kann maximal einer der beiden mit der Kante inzidenten Knoten ausgewählt werden.

Die zweite Nebenbedingung (Gleichung (4-20)) bedeutet:

An einem bestimmten Knoten kann nur ein Zug den Knoten belegen.

Die dritte Nebenbedingung (Gleichung (4-21)) zeigt:

Alle Variablen x_i sind binär.

Abbildung 88 zeigt den Prozessablauf zum Erhalt einer „optimalen Lösung“.

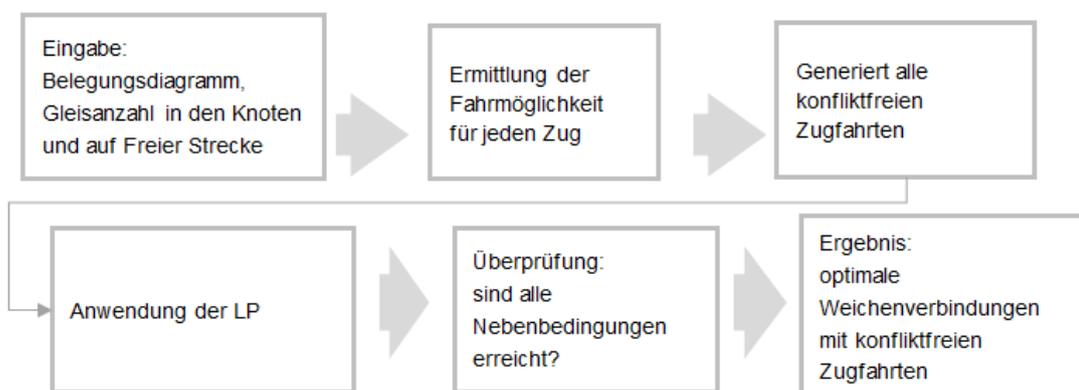


Abbildung 88: Ermittlung der optimalen Weichenverbindungen im Bahnhofskopf (Eigene Darstellung)

4.4 Ermittlung der Signalstandorte

4.4.1 Leit- und Sicherungstechnik (LST)

Die DB-Richtlinie 301 [96] definiert:

„Ein Signal ist ein sichtbares oder hörbares Zeichen mit einer festgelegten Information zur Gewährleistung des sicheren Bewegens von Eisenbahnfahrzeugen.“

D.h. (Abbildung 89):

Wenn im Signalsystem kein anderes Hauptsignal zwischen dem Ausfahrtsignal von Bhf A und dem Einfahrtsignal von Bhf B eingerichtet ist, kann innerhalb dieses Blocks nur ein Zug fahren.

Aus Bhf A kann der nächste Zug dem vorausfahrenden Zug erst folgen, wenn der vorausfahrende Zug die Strecke A–B geräumt hat, die Fahrstraße A–B aufgelöst sowie die neue Fahrstraße A–B gebildet und freigegeben ist. Die „sequentielle Kapazität“ erreicht hierbei i.d.R. kein Optimum.

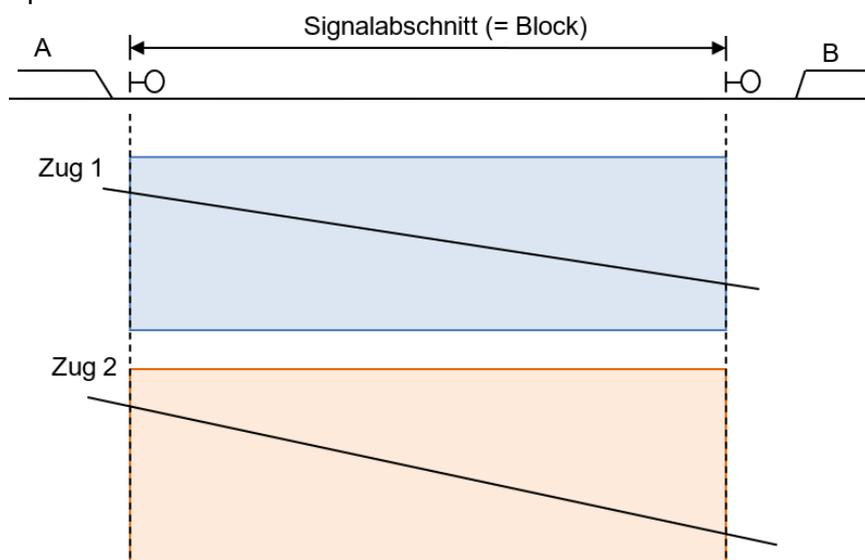


Abbildung 89: Zugfolge basierend auf einem Block zwischen Bhf A und B

Daraus folgt [96],

Es ist sinnvoll, die entsprechenden Positionen für die Signale – und damit die Blocklänge – so zu wählen, dass eine optimale Zugfolge möglich ist und damit eine optimale „sequentielle Kapazität“ erreicht wird.

Nach [84] hängt die Blocklänge l_{Block} (= Länge des Hauptsignalabstands, siehe Kapitel 4.2.1) mit der Zugbeeinflussung zusammen. Mithilfe der Zugbeeinflussung werden LST-Informationen dem Tf übermittelt und/oder auf das Fahrzeug übertragen. Zusätzlich wird die zulässige Geschwindigkeit $z_{ul} V$ durch die Zugbeeinflussungsanlagen überwacht, sodass die Geschwindigkeit V angepasst wird, wenn das Fahrzeug davon abweicht [84].

Nach der Art der Informationsübertragung können die Zugbeeinflussungsanlagen wie folgt unterteilt werden:

- **punktförmige Zugbeeinflussung (PZB):** mit der PZB werden Informationen nur punktuell an ausgewählten Signalstandorten an den Tf und/oder das Fahrzeug übertragen [84]

- **linienförmige Zugbeeinflussung (LZB):** die LZB nutzt die kontinuierliche induktive Datenübertragung zwischen Fahrzeug und Fahrweg mittels im Gleis verlegter Antennenkabel (= Linienleiter, [34] und [145]) mittels FSS über die MFA auf die MFD
- **kontinuierliche Zugbeeinflussung bei ETCS-Level 2:** „Bei ETCS Level 2 findet eine kontinuierliche Kommunikation zwischen Fahrzeug und Strecke mittels Funk (GSM-R bzw. zukünftig FRMCS) statt“ [22]

Die PZB übernimmt die Zugsicherung z.B. beim HV-System. Der Signalabstand beträgt z.B. bei $\max V = 160 \text{ km/h}$ mindestens 1.000 m (vgl. *Tabelle 25*).

Für Geschwindigkeiten $V > 160 \text{ km/h}$ ist es sinnvoll, wegen des verlängerten Bremsweges, eine kontinuierliche Zugüberwachung einzusetzen.

Bei der künftigen Entwicklung der DSD wird als LST ETCS-Level 2 als Basis verwendet [95].

4.4.2 Aktuelle Methoden der Signalstandortermittlung

4.4.2.1 Ermittlung ortsfester Lichtsignalstandorte

Multi-Aspekt-Signalsystem

In [39] wurde eine computergestützte mathematische Methode zur Signalstandortermittlung des Multi-Aspekt-Signalsystems⁹¹ vorgestellt, um die optimale Länge der Blöcke $opt. l_{\text{Block}}$ auf der Freien Strecke zu ermitteln. Die idealen Geschwindigkeiten v wurden unter Berücksichtigung der Ansprechverzögerungen a , der Reaktionszeit der ATO-Ausrüstung und der Ruckbegrenzung $\max c$ so ausgewählt, um das Signalsystem für die Mindestzugfolgezeit $\min t_{\text{Zugfolge}}$ zu optimieren.

Im Rahmen von [39] wurde ein alternativer Suchansatz mit GA [12] vorgeschlagen, um eine robustere und globalere Konvergenz bei der Suche in komplexen Suchräumen zu erreichen. Die Methode zielt darauf ab, die Zugfolgezeit t_{Zugfolge} zu minimieren, um sicherzustellen, dass die Blocklänge l_{Block} nicht kleiner als der Zwangs-/Schnellbremsweg $l_{\text{Bzwang}} / l_{\text{Bschnell}}$ ist.

91 Das Multi-Aspekt-Signalsystem ist ein Signalsystem, das verschiedene Farben und Anzahl von Lichtern verwendet, um mehr als zwei Fahrhinweis zu zeigen. I.d.R. zeigen diese Signale 4 Aspekte:

- Rot – Gefahr/Halt
- Einfach gelb – der Tf muss sich darauf vorbereiten, den Zug am nächsten Signal anzuhalten
- Doppelgelb – das nächste Signal zeigt ein einfaches Gelb an
- Grün – der Zug darf mit Streckengeschwindigkeit diesen Abschnitt befahren

Durch das „Doppelgelb“ wird ein erster Signalisierungsansatz über 2 Blöcke wahrgenommen (eingeschränkte quasikontinuierliche Fahrwegfreigabe). Bei LZB und ETCS-Level 2 wird die quasikontinuierliche Fahrwegfreigabe mittels der FSS über viele Blöcke durchgeführt.

Mithilfe von GA ist es möglich, den Anwendungsbereich für die Zielfunktion oder das Signalisierungsschema zu erweitern. Gleichzeitig sind keine Nachoptimierungsverfahren zum Anpassen der Grenzen der Blöcke erforderlich.

Multi-Aspekt-Signalsystem und Equi-Block

Anhand von [12] wurde die Lösungszeit zur Ermittlung eines optimalen Equi-Blocks⁹² (= fester Raumabstand) des Multi-Aspekt-Signalsystems durch die Verwendung von Differential-Evolution-Algorithmen⁹³ weiter reduziert [13]. Dieses Verfahren hat die drei untergeordneten Zielfunktionen der GA in eine zusammengesetzte Zielfunktion für nur eine Suche kombiniert.

„Fixed-block“ Signalsystem

Ein Ansatz für den Entwurf eines „Fixed-block“ Signalsystems für Nahverkehrssysteme wird in [60] vorgeschlagen. Mit diesem Signalsystem kann die Blockeinteilung inkl. der Signalanordnung und die Fahrgeschwindigkeit v zwischen zwei benachbarten Stationen optimiert werden.

Ziel ist es, einen minimalen Energieverbrauch bei maximaler (sequentieller) Kapazität zu erreichen. Dabei berücksichtigt der GA die Auswirkungen der Längsneigung I , die minimale Zugfolgezeit $\min t_{\text{Zugfolge}}$ des ATO-Systems sowie die durchschnittliche Geschwindigkeit v . Daraus resultiert die minimale Länge der Blöcke $\min l_{\text{Block}}$ und die Position der Signale.

Die beschriebenen Ansätze neigen dazu, die Länge der Blöcke l_{Block} zu minimieren, um die Zugfolgezeit t_{Zugfolge} zu verringern. Jedoch entsteht dadurch eine Kosten-Nutzen-Abwägung, denn infolge der Reduktion der Länge der Blöcke l_{Block} nimmt die Anzahl der Blöcke i_{Block} zu, sodass die Kosten steigen [41].

Automatic-Block Signalsystem

Durch die Anwendung eines GA wird in [73] und [75] nach einer optimalen Anordnung der Signalstandorte gesucht. Basierend auf einer Analyse der Ziele wird ein Optimierungsmodell mit zwei Zielen vorgestellt – hohe Effizienz und geringe Kosten.

92 Bei einem Equi-Block wird eine Strecke zwischen zwei Bahnhöfen (A-B) in drei Abschnitte unterteilt [13]:

- „*constraint section*“: der Abschnitt kann wegen des Gleisfreimeldeanlage nicht gestreckt werden (1. bis 6. Block nach Bhf A)
- „*stretchable section*“: der restliche Abschnitt der Freien Strecke außer der „*constraint section*“ und „*critical section*“, in dem die Längen der Blöcke je nach Zielsetzung (z.B. minimale Kosten oder maximale Kapazität) angepasst werden kann
- „*critical section*“: der Abschnitt kann nicht gestreckt werden und die Blocklängen nähert sich dem Mindestzugfolgeabstand (n_{i-5} bis n_i , Blöcke bis Bhf B)

93 Differentielle Evolution (DE) ist eine Optimierungsmethode, die durch iterative Berechnung die möglichen Lösungen verbessert. Diese Methode trifft wenige oder keine Annahmen über das zu optimierende Problem und kann eine große Menge von Lösungsmöglichkeiten durchsuchen.

Für die Feststellung der Signalstandorte wurden zwei Optimierungsverfahren mit festen Blöcken durchgeführt. Die Fallstudie zeigt, dass das Effizienzziel eine geringere Zugfolgezeit t_{Zugfolge} erreicht und somit die Leistungsfähigkeit L erhöht werden kann. Das Kostenziel beinhaltet die Anzahl der Signale.

Chinese Train Control System (CTCS-2)⁹⁴

In [72] wurde unter Berücksichtigung der Fahrdynamik und des Signalsystems ein heuristischer Simulationsalgorithmus für die Signalstandorte verwendet. Mithilfe dieses heuristischen Simulationsalgorithmus wurde zunächst die Position der Ein-/Ausfahrtsignale am Startbahnhof und den Folgebahnhöfen bestimmt. Anschließend wurden die weiteren Signalpositionen zwischen den Bahnhöfen anhand der Fahrzeugeigenschaften (Geschwindigkeit v , Beschleunigung a , usw.) und der Mindestzugfolgezeit $\min t_{\text{Zugfolge}}$ ermittelt. Der Algorithmus implementiert eine automatische Signalanordnung mit dem Ziel, die Anzahl der Signale auf den optimalen Mindestzugfolgeabstand $\text{opt. } t_{\text{Zugfolge}}$ zu minimieren.

4.4.2.2 Signalstandortermittlung für ETCS-Level 2

In [129] wurde die Länge der Blöcke l_{Block} beim ETCS-Level 2 in Abhängigkeit der Zeit definiert, in der die Anforderung der Zugfolgezeit t_{Zugfolge} die maximale Belegungszeit t_{Beleg} bestimmt. Dabei wurden zunächst die verschiedenen Zugfolgeszenarien von zwei Zügen definiert und deren Sperrzeiten berechnet.

Anhand der bestehenden Infrastruktur und Zugfolgezeitbeschränkung wurde das Signallayout der Zugfolgebewertung mit OpenTrack⁹⁵ durchgeführt. Wenn das Signallayout alle Zugfolgeszenarien erfüllte, wurde es als Möglichkeit für die endgültige Lösung betrachtet. Wenn nicht, wurden die Sperrzeiten erneut berechnet und die Bewertung der Zugfolge dafür durchgeführt bis die Anforderungen aller Zugfolgeszenarien erfüllt wurden. Diese Vorgehensweise wurde beim Projekt „*Danish Fjernbane Infrastructure East*“ angewandt, bei dem das bestehende Signalsystem durch das neue Signallayout ETCS Level 2 ersetzt wurde. Mithilfe von OpenTrack wurde durch eine einfache Berechnung die Position der LST (z.B. virtuelle Signale, Balisen, Achszähler) bestimmt.

94 Beim CTCS-2 wird die Datenübertragung bei $\max V = 250 \text{ km/h}$ mittels Gleisstromkreis und Balisen realisiert. CTCS-3 entspricht ETCS-Level 2.

95 OpenTrack ist eine etablierte Bahnplanungssoftware. Sie ermöglicht die Modellierung, Simulation und Analyse von verschiedenen Bahnsystemarten und kann die gewonnenen Daten in Form von verschiedenen Diagrammen (Zugdiagrammen, Belegungsdiagrammen und Statistiken) darstellen.

In der Zusammenfassung kann ausgehend von den Anforderungen an die Zugfolge, den infrastrukturellen, betrieblichen und technologischen Bedingungen das gesamte Signalisierungslayout für ETCS-Level 2 ermittelt werden, wobei die Kapazität der Eisenbahnstrecken ein implizites Ergebnis ist.

In [134] wurde die optimale Blocklänge $opt.l_{Block}$ durch eine iterative Berechnung ermittelt. Zunächst wird für einen vorausfahrenden Zug die optimale FSL ohne Blockunterteilung ermittelt. Danach wird die FSL auf die Weg-/Zeitachse als optimale FSL eines nachfolgenden Zuges übertragen. Um die Anzahl der Signale zu minimieren, wurde die optimale Zugfolgezeit $opt.t_{Zugfolge}$ anhand der Fahrzeugeigenschaften und der zulässigen, örtlichen Streckengeschwindigkeit V bestimmt. Die maximale Blocklänge $max.l_{Block}$ in [134] kann 2.700 m für $V_{max} = 115 \text{ km/h}$ erreichen.

Kapitel 4.4.2.2 zeigt, wie auf der Basis des ETCS-Levels 2 die Signalstandorte entworfen werden können. Hierbei wird der GA für die Signalstandortermittlung unter Berücksichtigung der Zugfolgezeit $t_{Zugfolge}$ verwendet, um das Ziel – minimale Kosten – zu erreichen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Ermittlung der Signalstandorte aufgrund von unterschiedlichen Zielen und Einschränkungen kompliziert ist. Die Hauptziele sind Sicherheit, hohe Effizienz und niedrige Kosten. Aus diesem komplexen Zusammenhang ist ersichtlich, dass frühere Wissenschaftler vor allem Signalstandorte in festen Abständen untersucht haben und die Lösungen des Signallayouts durch Optimierungsverfahren ermittelt wurden, in denen der GA eine gut etablierte und praktische Berechnungsmethode darstellt.

4.4.3 Problemstellung zur Ermittlung der ETCS-Level 2-Signalstandorte

4.4.3.1 Wahl des Blockmodus für ETCS-Level 2

Obwohl ETCS-Level 2-geführte Züge, entgegen [96], kein ortsfestes Signal mehr benötigen, da auch virtuelle Signale über die FSS optisch übertragen werden, werden die ortsfesten Signale auf deutschen ETCS-Level 2-Strecken nicht vollständig aufgegeben. Dafür gibt es zwei Arten von Blockmodi für ETCS-Level 2-Strecken [84]:

- Ganzblockmodus: hier werden ortsfeste Signale für den ETCS-Level 2-Block verwendet. Dadurch können auch Züge ohne ETCS-Level 2-Führung auf den ETCS-Level 2-Strecke fahren. Jedoch sind die Kosten für die Einrichtung und Unterhaltung von Signalen sehr hoch.

- Teilblockmodus: hier werden ortsfeste Signale nur dort verwendet, „wo Weichen zu decken sind, also in Bahnhöfen und an Abzweig- und Überleitstellen“ [84]. Ansonsten werden virtuelle Signale – gekennzeichnet auf der Strecke durch Signaltafeln – verwendet.

Abbildung 90 zeigt die Sperrzeit je Block eines ETCS-Levels 2-geführten Zuges im Teilblockmodus und eines Zuges ohne ETCS-Level 2 auf der gleichen Strecke. Für den Zug ohne ETCS-Level 2-Führung gibt es nur 2 Blöcke wegen der vorgenannten Reduzierung der physischen Signale. Dies ist betrieblich sinnlos. Um eine hohe Kapazität zu erreichen, wären für Züge ohne ETCS-Level 2-Führung mehrere ortsfeste, physische Signale erforderlich. Dies ist jedoch – auch als Rückfallebene – bei der Ausrüstung neuer NBS redundant und daher nicht vorgesehen.

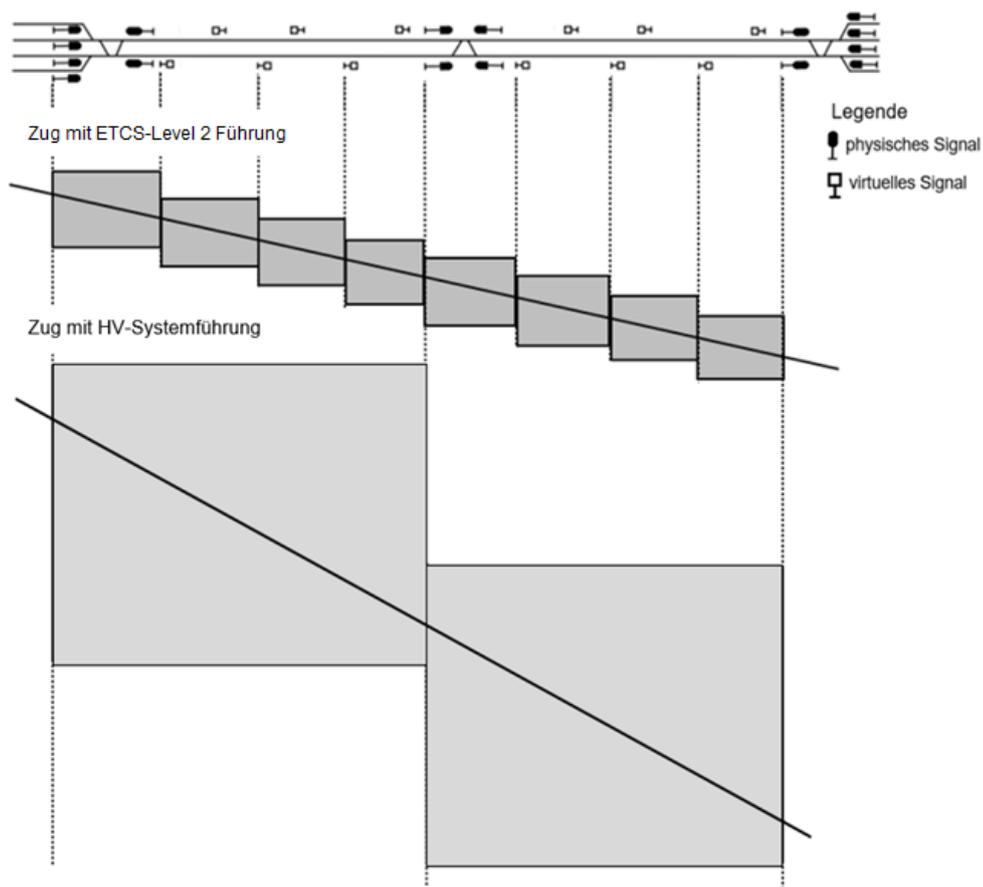


Abbildung 90: Sperrzeitentreppe auf einer ETCS-Level 2-Strecke mit reduziertem ortsfestem Signalsystem im Vergleich zur HV-Systemführung mit PZB [84]

4.4.3.2 Verdichtung der Blöcke für hohe Streckenkapazität

Da ETCS-Bremskurven restriktiver und dadurch flacher als Bremskurven bisheriger nationaler Zugbeeinflussungssysteme sein können [148], wurde aus wirtschaftlichen Gründen bei den Verfahren in Kapitel 4.4.2.2 versucht, die maximale Blocklänge $\max l_{\text{Block}}$ – mit dem Ziel Mindestkosten – zu optimieren.

Im ETCS-Level 2 ist bei hohen Geschwindigkeiten eine große Blockteilung wegen des langen Bremsweges nicht mehr für hohe Kapazitäten geeignet. Hierzu zeigt *Abbildung 91* verschiedene ETCS-Bremskurven vom „Indication Point“ (IP). Am IP wird dem Tf gemeldet eine Bremsung einzuleiten [32]. Dies entspricht der Funktion des Leuchtmelders G^{96} der LZB (siehe *Tabelle 26*, [148]).

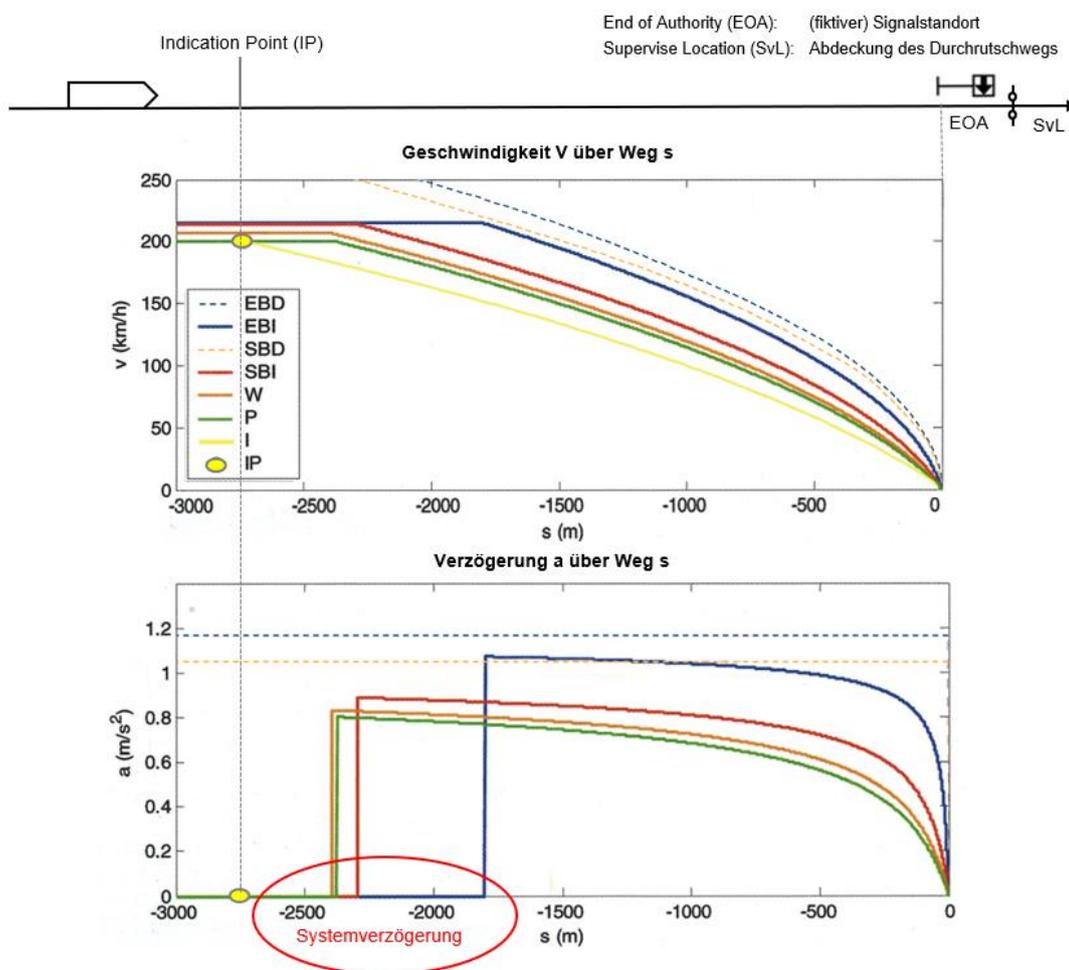


Abbildung 91: ETCS-Bremskurven aus Geschwindigkeit V mit Verzögerung a ([32], Art und Bedeutung der ETCS-Bremskurven siehe *Tabelle 29*, Ergänzung ZHAO)

Bei $V = 220$ km/h ist der Bremsweg l_B bei einer Schnell- bzw. Zwangsbremmung⁹⁷ mit $a = 1.05$ m/sec² ohne Systemverzögerung (Geraden im roten Kreis in *Abbildung 91* unten) noch ca. $s = 1.800$ m. Daher muss der nachfolgende Zug einen dieses Maß übersteigenden größeren Abstand zum vorausfahrenden Zug einhalten.

96 Siehe Kapitel 4.2.1.2

97 Die SCHWEIZERISCHEN BUNDESBAHNEN (SBB) bezeichnen SBI und EBI auch als System- und Zwangsbremmung. Eine ausgelöste System- oder Zwangsbremmung muss vom Tf unterstützt werden, damit das Lösen der Bremsung nach dem Stillstand kontrolliert durch den Tf erfolgen kann [105]. Trip (TR, vom english "to trip") ist der in ETCS verwendete Begriff für eine Zwangsbremmung, bei der eine sofortige Zwangsbremmung ausgelöst wird, die erst wieder gelöst werden kann, wenn der Zug stillsteht. Bei der DB wurde die Betriebsart ab 2010 als ETCS-Zwangsbremmung bezeichnet [150].

Tabelle 29: Arten und Bedeutung von ETCS-Bremskurven ([32] und [148])

Bremskurven		Bedeutung
Schnellbremsablaufkurve	Emergency Brake Deceleration Curve (EBD)	die EBD wird durch eine Schnellbremsung definiert, d.h. sichere Verzögerung (automatic Emergency Brake (aEB)) bis zur Supervised Location (SvL). Die Berechnung der aEB enthält Sicherheitsmargen ⁹⁸ und berücksichtigt die Längsneigung <i>I</i> der Strecke.
Schnellbremseinsatzkurve	Emergency Brake Intervention Curve (EBI)	die EBI geht der EBD um die äquivalente Bremsaufbauzeit voraus. Das Überfahren der EBI löst eine lösbare Schnellbremsung aus.
optionale Betriebsbremsablaufkurve	Service Brake Deceleration Curve (SBD)	die SBD definiert eine Vollbremsung (= maximale Betriebsbremsung), die wieder gelöst werden kann. „Die SBD muss nicht sicher sein.“ [32]
optionale Betriebsbremseinsatzkurve	Service Brake Intervention Curve (SBI)	die SBI geht der SBD um die äquivalente Bremsaufbauzeit voraus. Das Überfahren der SBI löst eine Vollbremsung aus.
Warnkurve	Warning Curve (W)	W ist die Warnung, die der Tf bei Überfahren von P akustisch erhält um die Betriebsbremsung durchzuführen.
Sollkurve	Permitted Speed (P)	P leitet eine Betriebsbremsung auf die Sollgeschwindigkeit ohne Bremsentwicklungszeit ein.
Information	Indication Curve (I)	I ist die Bremskurve, bei welcher der Tf die Zugkraft abschalten und eine Betriebsbremsung einleiten sollte, um P zu folgen.

Tabelle 29 zeigt die Arten und Bedeutung von ETCS-Bremskurven. Als eine optionale Bremsung darf die SBD als nicht sichere maximale Betriebsbremsung (= Vollbremsung) angerechnet werden. Sie kann eine größere Verzögerung als die EBD aufweisen [32]. Somit kann auf beide Betriebsbremskurven (SBD/SBI) verzichtet werden, um die Nutzung der EBI zu erhöhen [148].

Zusammenfassend werden die verschiedenen Bremskurven nach der Funktion in drei Typen unterteilt (Tabelle 30)

98 Die Sicherheitsmargen dienen dazu, Abweichungen der Bremskraft, der Masse und des Kraftschlussbeiwerts von den Nominalwerten auszugleichen [148].

Tabelle 30: Funktion der ETCS-Bremskurven [148]

Funktion	Bedeutung	ETCS-Bremskurven
Ablaufkurven	Der Zug sollte oder wird den Ablaufkurven folgen, wenn eine Intervention vom System durchgeführt wird	P, SBD, EBD
Interventionskurven	Wenn die Geschwindigkeit des Zuges größer ist als die von diesen Kurven beschriebene Geschwindigkeit, wird eine Systemintervention vom ETCS durchgeführt.	SBI, EBI
Informationskurven	haben rein informellen Charakter. Wenn die Geschwindigkeit des Zuges größer ist als die von diesen Kurven beschriebene Geschwindigkeit, wird ein optisches Signal auf dem DMI ausgegeben	I, W

Zum Vergleich der Bremsverzögerungen innerhalb der betrachteten LST-Systeme weist [138] eine mittlere Bremsverzögerung für den Nahverkehr (PZB/LZB) von $a = 0,6 \text{ m/sec}^2$ auf. Die mittlere Betriebsbremsverzögerung beträgt damit etwa 67% bis 75% der mittleren Schnellbremsverzögerung. Damit liegt bei gleichem Ansatz die LZB-Betriebsbremsung, bei einer LZB-Schnellbremsverzögerung von $a = 0,85 \text{ m/sec}^2$ für $V \leq 160 \text{ km/h}$, zwischen $a = 0,57 \text{ m/sec}^2$ und $a = 0,65 \text{ m/sec}^2$.

Für den ETCS-Level 2 in Deutschland beträgt die übliche Schnellbremsverzögerung (EBI) $a = 1,15 \text{ m/sec}^2$. Im Digitalen Knoten Stuttgart (DKS) wurden eine Schnellbremsverzögerung (EBI) von mindestens $a = 1,00 \text{ m/sec}^2$ unterstellt [148].

Tabelle 31 zeigt den maximalen Bremsweg $\max l_B$ in Abhängigkeit verschiedenen Geschwindigkeiten V mit den Ablaufkurven (P, SBI) und der Interventionskurve (EBI).

Tabelle 31: Bremswege der betrachteten LST-Systeme in Abhängigkeit verschiedener Geschwindigkeiten V und Bremsverzögerungen a ([145] und [147], Ergänzung ZHAO)

maximale Geschwindigkeit [km/h]	maßgebender Bremsweg bei PZB/LZB	theoretischer Bremsweg ⁹⁹ bei ETCS		
		bei P $a = 0.65 \text{ [m/sec}^2]$	bei SBI $a = 0.85 \text{ [m/sec}^2]$	bei EBI $a = 1.05 \text{ [m/sec}^2]$
160	1.000m ¹⁰⁰	1.520 m	1.162 m	941 m
200	1.600 - 2.740 m ¹⁰¹	2.375 m	1.816 m	1.470 m
250	2.790 - 5.190 m ¹⁰¹	3.710 m	2.837 m	2.296 m
300	4.320 - 7.550 m ¹⁰¹	5.342 m	4.085 m	3.307 m
400	-	9.497 m	7.262m	5.879 m
500	-	14.839 m	11.347m	9.186 m

99 Der Bremsweg wird von V_{\max} bis zum Stillstand $V = 0$ mit den vorgegebenen Bremsverzögerungen a berechnet.

100 Bei $V_{\max} = 160 \text{ km/h}$ mit dem LST PZB-90 entspricht der Bremswegabstand $l_B = 1.000 \text{ m}$ einer Bremsverzögerung von $a = 0,97 \text{ m/sec}^2$ [145]

101 Die LZB-Bremstafeln zeigen 240 BrH bzw. 140 BrH [145]

In dieser Arbeit beträgt die zulässige maximale Geschwindigkeit zu $V_{\max} = 500 \text{ km/h}$. Aus *Abbildung 91* und *Tabelle 31* ist ersichtlich, dass die konventionellen Blocklängen wegen der sehr lange Bremswegabstände groß sind.

In [155] wurden die Zugfolgefälle für fünf verschiedene Fahrzeuge¹⁰² im Fahrplanjahr 2019 mit OpenTrack unter der LST PZB und ETCS-Level 2¹⁰³ sowie Level 3¹⁰⁴ auf der Wiener S-Bahn-Stammstrecke simuliert. *Tabelle 32* zeigt die Ergebnisse der Mindestzugfolgezeiten $\min t_{\text{Zugfolge}}$ der fünf verschiedenen Fahrzeuge bei PZB und ETCS-Level 2 sowie Level 3 für verschiedene Zugfolgefälle.

Tabelle 32: Vergleich der Mindestzugfolgezeiten $\min t_{\text{Zugfolge}}$ beim Einsatz der LST-Systeme PZB und ETCS-Level 2 sowie Level 3 [155]

Nach Vor	BR 1144 + „Wiesel“ [sec]			BR 4020 [sec]			BR 4024 [sec]			BR 4746 [sec]			„KISS“ [sec]		
	PZB	ETCS		PZB	ETCS		PZB	ETCS		PZB	ETCS		PZB	ETCS	
		L2	L3		L2	L3		L2	L3		L2	L3		L2	L3
BR 1144 + „Wiesel“	162	170	114	145	152	110	144	151	109	177	185	148	163	169	125
BR 4020	181	189	143	164	171	117	163	170	116	206	216	178	167	173	133
BR 4024	183	191	156	166	173	129	165	172	116	217	228	194	172	180	138
BR 4746	141	148	106	132	140	102	131	139	101	156	163	108	158	164	106
„KISS“	150	158	101	148	155	96	147	154	96	149	156	102	150	157	96

Aus *Tabelle 32* ist ersichtlich, dass die Mindestzugfolgezeit $\min t_{\text{Zugfolge}}$ bei ETCS-Level 2 größer als bei der PZB ist. Das liegt

- zum Einem an der konventionellen Blockteilung wie bei der Verwendung von PZB
- zum Anderen an den restriktiveren ETCS-Bremskurven, die im Vergleich zur PZB flacher verlaufen.

Im Gegensatz zu ETCS-Level 2 unter den vorgenannten Bedingungen ist die Mindestzugfolgezeit $\min t_{\text{Zugfolge}}$ in der Simulation von ETCS-Level 3 beim Fahren im „Moving Block“ wesentlich reduziert.

102 Simulation für die folgenden fünf Fahrzeuge [155]:

- ÖBB BR 4020
- ÖBB BR 4024
- ÖBB BR 4746
- ÖBB Doppelstock-Wendezuggarnitur, angetrieben mit der ÖBB BR 1144
- Doppelstockgarnitur „KISS“ von Stadler

103 In diesem Szenario wurde die konventionelle Blockteilung (= maximaler Bremswegabstand) bei ETCS-Level 2 verwendet [155].

104 Szenario 2 geht davon aus, dass die Strecke mit ETCS-Level 3 ausgestattet ist und mit „Moving Block“ betrieben werden kann [155].

Um die Mindestzugfolgezeit $\min t_{\text{Zugfolge}}$ beim ETCS-Level 2 gegenüber der Verwendung der konventionellen Blockteilung wie vor zu verbessern, wurde die Blockteilung unter ETCS-Level 2 in [155], auf Basis der FSS mit virtuellen Blöcken, verdichtet.

Abbildung 92 zeigt die Mindestzugfolgezeit $\min t_{\text{Zugfolge}}$ in Abhängigkeit unterschiedlicher Zugbeeinflussungssysteme.

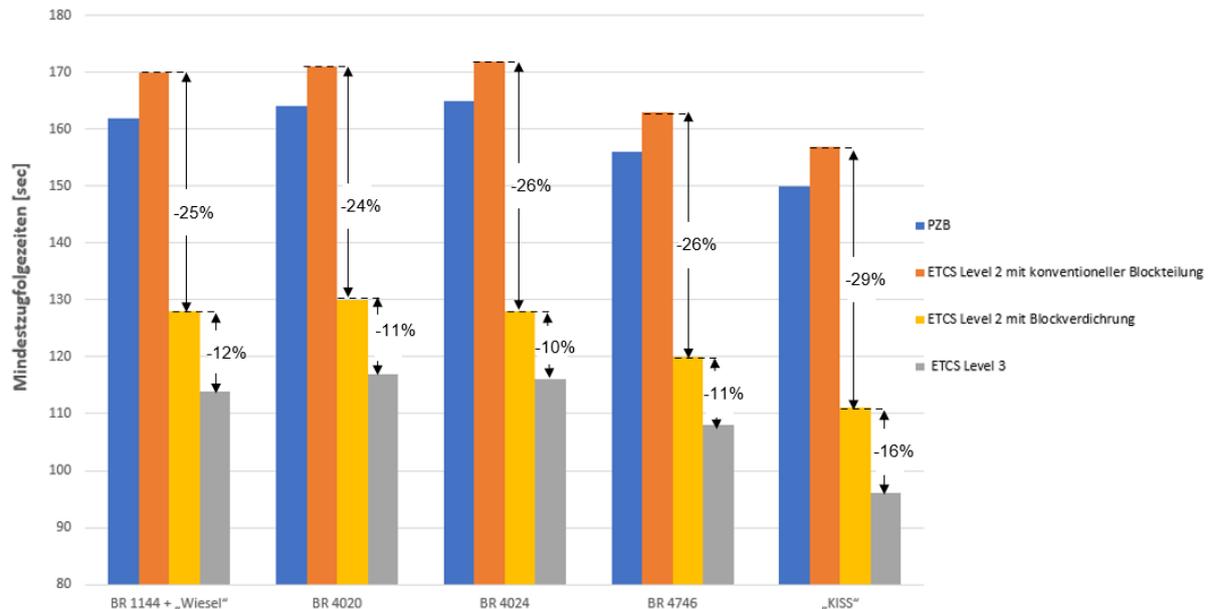


Abbildung 92: Mindestzugfolgezeiten $\min t_{\text{Zugfolge}}$ in Abhängigkeit unterschiedlicher Zugbeeinflussungssysteme [155]

Aus Abbildung 92 ist ersichtlich, dass die Mindestzugfolgezeit $\min t_{\text{Zugfolge}}$ beim ([155])

- ETCS-Level 2 mit Blockverdichtung um bis zu ca. 29% gegenüber dem ETCS-Level 2 mit konventioneller Blockteilung reduziert werden kann
- ETCS-Level 2 mit Blockverdichtung um bis auf 10% und an das Szenario "Moving Block" angenähert werden kann

Die Verdichtung der Blöcke für höhere Streckenkapazität lässt sich nach [66] beim ETCS-Level 2 in die folgenden zwei Typen weiter unterteilen:

- ETCS L2oS: Betrieb im ETCS-Level 2 ohne Streckensignale, in diesem Fall muss der Tf die Bremsung auf Basis der FSS manuelle einleiten
- ETCS L2oS mit ATO⁶⁷: Betrieb mit ATO over ETCS mit ETCS-Level 2 ohne Streckensignale

ATO ermittelt die optimale Geschwindigkeit V_{opt} auf der Grundlage der zulässigen Geschwindigkeit V und des Fahrplans. Mit ATO liegt die erreichbare Fahrkurve nahe der Schnellbremskurve (EBI). Auf alle anderen Betriebsbremskurven wird verzichtet [80]. Für die Überwachung der Sollgeschwindigkeit V_{soll} ist nur die Einhaltung der EBI maßgebend [148].

Abbildung 93 zeigt den Vergleich der Mindestzugfolgezeiten $\min t_{\text{Zugfolge}}$ in Abhängigkeit der Ausrüstungsvarianten am Beispiel der S-Bahn im DKS [66].

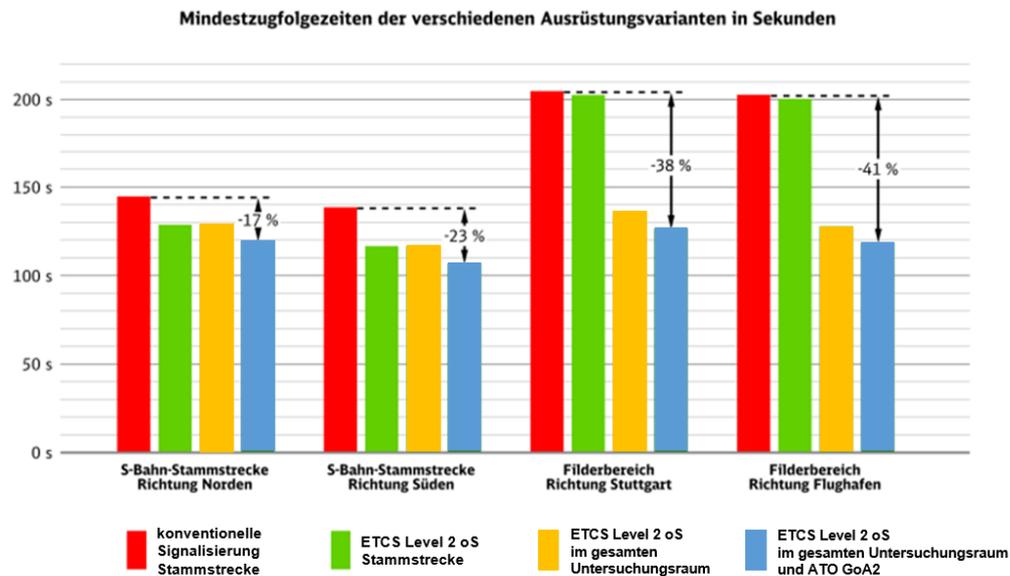


Abbildung 93: Mindestzugfolgezeit verschiedener Ausrüstungsvarianten am Beispiel der S-Bahn im DKS [66]

Aus dem Beispiel im DKS (Abbildung 93) ist ersichtlich:

Die Mindestzugfolgezeit im Untersuchungsraum wurde gegenüber der heutigen konventionellen Signalisierung

- für ETCS L2oS um bis zu ca. 35%
- für ETCS L2oS mit ATO um bis zu 41% reduziert

Bei ETCS-Level 2 und $V > 160$ km/h entstehen bei einer flacheren Bremskurve (siehe Tabelle 32) längere Mindestzugfolgezeiten als mit konventioneller LST mit $V \leq 160$ km/h. Dem kann nicht nur wie beschrieben mit einer geänderten Blockteilung, sondern zusätzlich mit ATO entgegengewirkt werden ([66] und [148]).

Fazit:

Um eine extrem niedrige Streckenkapazität aufgrund zu langer bis hin zu konventionellen Blöcken zu vermeiden, kann die Mindestzugfolgezeit $\min t_{\text{Zugfolge}}$ beim ETCS-Level 2 wie folgt verbessert werden [155]

- durch eine Blockverdichtung mit kurzen virtuellen Blöcken¹⁰⁵ und quasikontinuierlicher Fahrwegfreigabe
- sowie
- ATO

¹⁰⁵ Da beim ECTS-System der Bremsvorgang entsprechend der Echtzeitüberwachung des Abstands zum „End of Authority (EOA)“ (siehe Abbildung 95, i.V.m. Abbildung 80) automatisch und rechtzeitig eingeleitet werden kann, können die Blocklängen deutlich verkürzt werden ([32] und [155], siehe Tabelle 31).

4.4.4 Verfahren zur Ermittlung der ETCS-Level 2-Signalstandorte

Um die optimale Blocklänge l_{Block} zu ermitteln, soll zuerst die Mindestzugfolgezeit $\min t_{\text{Zugfolge}}$ beim ETCS-Level 2 bestimmt werden.

Für einen ETCS-geführten-Zug werden die physischen Signale beim Teilblockmodus nur dort gesetzt, „wo Weichen zu decken sind, also in Bahnhöfen und an Abzweig- und Überleitstellen“ [84]. Infolge der Übertragung über die FSS auf das DMI sind – außer den vorgenannten – keine ortsfesten Signale auf der Freien Strecke notwendig. Somit kann die Blockteilung und der Signalstandort auf folgende Abschnitte unterteilt werden:

- Bahnhöfe (Abbildung 94)
- Freie Strecke (Abbildung 95)

Blockteilung im Bahnhof

Abbildung 94 zeigt, dass für einen Hochleistungsblock (HBL) am Bahnsteig die Blocklänge l_{Block} nach [18] 55 m beträgt.

Die physischen Ein- und Ausfahrtsignale des Bahnhofs müssen aus technischen Gründen in beiden Richtungen in einem Abstand zwischen 0 m und 80 m vom Bahnsteigende entfernt platziert werden [129].

Im DKS werden die Ein- und Ausfahrtsignale mit einem Abstand von 90 m und 0 m vom Bahnsteigende errichtet ([18], Abbildung 94).

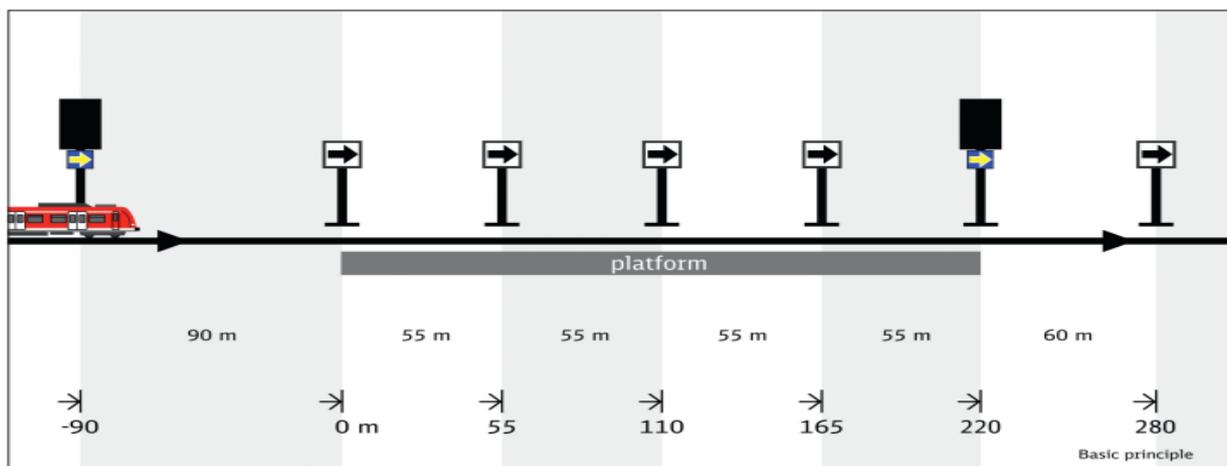


Abbildung 94: Blockabstand l_{Block} im DKS mit 55 m am Bahnsteig [18]

Um die optimale Kapazität im HBL zu erreichen, beträgt die Mindestblocklänge im Bahnhofsbereich in dieser Arbeit $\min l_{\text{Block}} = 37,5 \text{ m}$ (= technische Mindestlänge mit CIR-ELKE, siehe Kapitel 4.2.1.2.1).

Blockteilung auf Freier Strecke

Abbildung 95 zeigt den Zugfolgeabstand l_{Zugfolge} auf Freier Strecke bei einer LST-Ausstattung mit ETCS-Level 2.

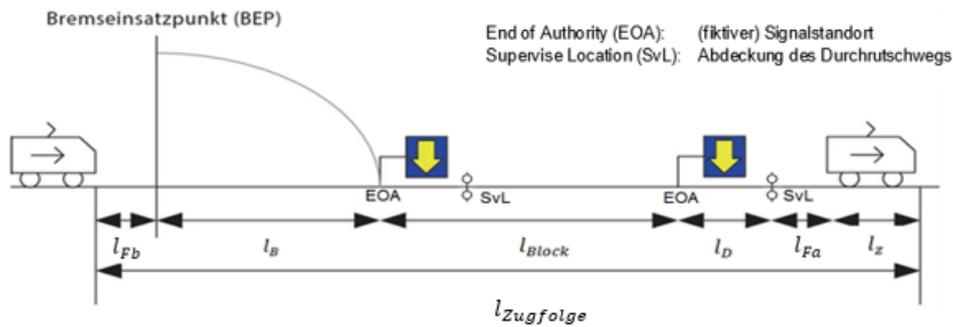


Abbildung 95: Zugfolgeabstand l_{Zugfolge} bei virtuellen Blöcken ([108], Ergänzung ZHAO)

Der Zugfolgeabstand l_{Zugfolge} berechnet sich nach [108]

$$l_{\text{Zugfolge}} = l_{\text{Fb}} + l_{\text{B}} + l_{\text{Block}} + l_{\text{D}} + l_{\text{Fa}} + l_{\text{z}} \quad (4-22)$$

Abbildung 96 zeigt die Grundannahme für die minimale Zugfolgezeit $\min t_{\text{Zugfolge}}$ bei ETCS-Level 2.

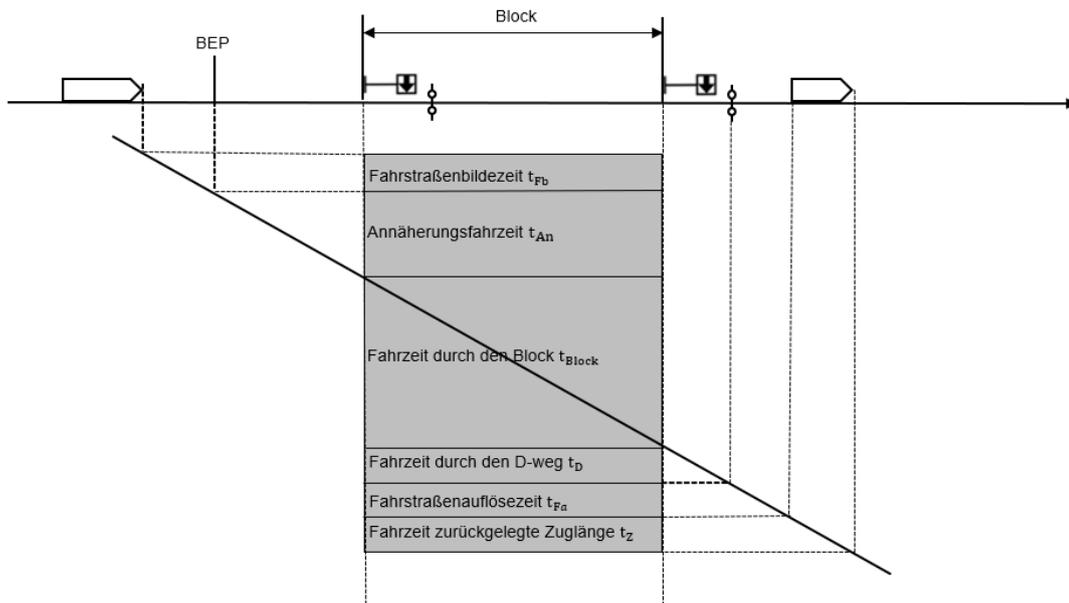


Abbildung 96: Minimale Zugfolgezeit $\min t_{\text{Zugfolge}}$ bei ETCS-Level 2 ([66], Ergänzung ZHAO)

Die Zugfolgezeit t_{Zugfolge} wird bei der Geschwindigkeit v wie folgt berechnet:

$$t_{\text{Zugfolge}} = t_{\text{Fb}} + t_{\text{An}} + t_{\text{Block}} + t_{\text{D}} + t_{\text{Fa}} + t_{\text{z}} \quad (4-23)$$

$$t_{\text{Zugfolge}} = t_{\text{Fb}} + t_{\text{Fa}} + \frac{v}{2a} + \frac{l_{\text{Block}} + l_{\text{D}} + l_{\text{z}}}{v} \quad (4-24)$$

t_{D} = Fahrzeit durch den Durchrutschweg

t_{z} = Fahrzeit für die zurückgelegte Zuglänge

Nach [108] werden die Systemzeiten mit folgenden typischen Werten angenommen:

$$t_{Fb} = 6 \text{ sec} \quad (4-25)$$

$$t_{Fa} = 3 \text{ sec} \quad (4-26)$$

Daraus ergibt sich die Blocklänge l_{Block} aus Gleichung (4-23) mit:

$$t_{\text{Block}} = t_{\text{Zugfolge}} - t_{Fb} - t_{An} - t_D - t_{Fa} - t_Z \quad (4-27)$$

$$l_{\text{Block}} = t_{\text{Block}} \times v \quad (4-28)$$

Um die Blöcke zu verkürzen, ist die minimale Blocklänge $\min l_{\text{Block}}$ aus der Mindestzugfolgezeit $\min t_{\text{Zugfolge}}$ zu ermitteln. Durch die Verkürzung der Blocklängen l_{Block} und der kontinuierlichen Weitergabe der Züge über mehrere Blöcke (quasikontinuierliche Fahrwegfreigabe) im ETCS-Level 2 kann der Zugfolgeabstand l_{Zugfolge} beim ETCS-Level 2 nahe an das Szenario „Moving Block“ herangeführt werden ([155] und *Abbildung 92*).

Je kürzer der Block ist und damit die Signalführung über viele Blöcke im Voraus erfolgt, desto mehr nähert sich der ETCS-Level 2 einem „Moving Block System“. Jedoch wird technisch immer noch der feste Raumabstand mit diskreten Blöcken verwendet.

Um hohe Kapazitäten beim ETCS-Level 2 zu erreichen, muss die Zielfunktion mit minimaler Zugfolgezeit $\min t_{\text{Zugfolge}}$ durchgeführt werden:

$$\min t_{\text{Zugfolge}} = (t_{\text{Zugfolge},1}, t_{\text{Zugfolge},2}, t_{\text{Zugfolge},3}, \dots, t_{\text{Zugfolge},n}) \quad (4-29)$$

Die Blöcke mit virtuellen Signalen zwischen dem physischen Ausfahrtsignal am Startbahnhof und dem physischen Einfahrtsignal am Zielbahnhof werden mit GA generiert.

Um einen Fahrplan fahrbar zu machen, können die Mindestzugfolgezeiten $\min t_{\text{Zugfolge}}$ nicht unmittelbar aufeinander folgen, da *„die mittlere Verspätung [...] im Untersuchungsbereich (Auswerteraum) möglichst nicht ansteigen [soll]“* [98]. Zur Sicherung der Fahrplanqualität dient z.B. die Pufferzeit t_{puffer} zur Reduzierung von Folgeverspätungen und führt somit zur Verbesserung der Betriebsqualität ([52] und [84]). Gemäß *Abbildung 92* und *Abbildung 93* kann zwar die Mindestzugfolgezeit $\min t_{\text{Zugfolge}}$ bis zu $\min t_{\text{Zugfolge}} = 120 \text{ sec}$ betragen, jedoch wird dabei keine Pufferzeit t_{puffer} zwischen die Sperrzeitenkästen berücksichtigt. Dieser Qualitätseinschnitt kann nur kurzfristig aufrechterhalten werden und muss in den benachbarten Netzelementen abgebaut werden [98].

Grundsätzlich unterteilt sich die Pufferzeit in zwei Typen [98]:

- Zugfolge-Pufferzeit: Sie wird als Zeitanteil zwischen den aufeinander folgenden Zugtrassen eingefügt, um die Übertragung der Verspätung vom vorausfahrenden Zug auf den nachfolgenden Zug zu vermeiden und somit die Qualität des Fahrplans zu sichern.

- Übergangs-Pufferzeit: Sie wird nach der Mindestübergangszeit zwischen zwei Zugtrassen für den Verkehrs-Übergang oder den Betriebs-Übergang eingefügt, um die Übertragung kleiner Verspätungen von Zubringerzügen auf Abbringerzug zu vermeiden. Im Falle der Verspätung eines Zuges kann die Verspätung damit reduziert werden.

Damit die Betriebsqualität gewährleistet ist, beträgt die Mindestpufferzeit bei DB zwischen 1 min und 3 min¹⁰⁶ ((Abbildung 97), [97]).

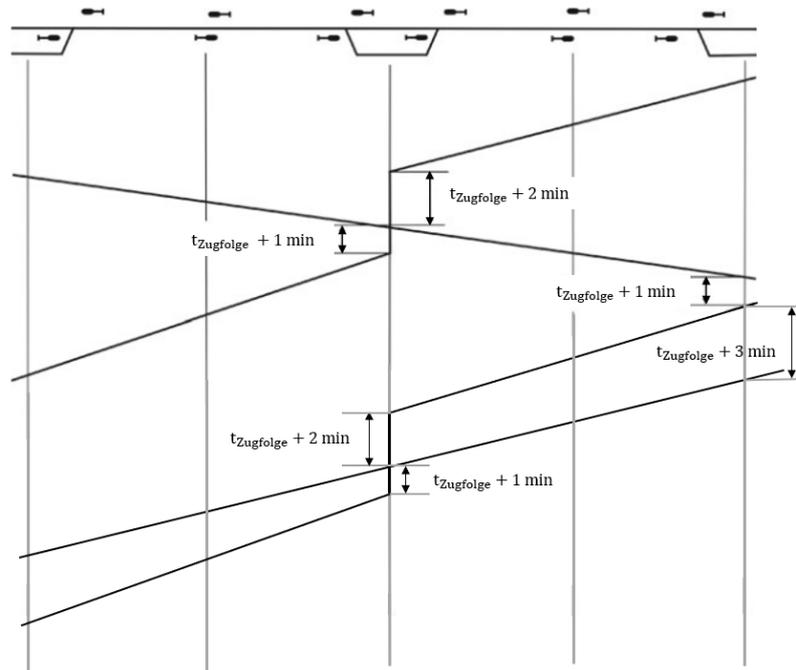


Abbildung 97: Darstellung der Pufferzeiten ([97], Ergänzung ZHAO)

Zur Betriebsqualitätssicherung wird die Mindestzugfolgezeit $\min t_{\text{Zugfolge}}$ bei ETCS-L2oS mit ATO wie folgt festgelegt:

$$\min t_{\text{Zugfolge}} + \min t_{\text{puffer}} = 120 \text{ sec} + 60 \text{ sec} = 180 \text{ sec} \quad (4-30)$$

Daraus ergibt sich eine anfängliche Blocklänge l_{Block}^0 mit:

$$l_{\text{Block}}^0 = t_{\text{Block}} \times \text{zul } v_{\text{max}} = (t_{\text{Zugfolge}} - t_{\text{Fb}} - t_{\text{Fa}} - \frac{l_{\text{B}} + l_{\text{D}} + l_{\text{Z}}}{\text{zul } v_{\text{max}}}) \times \text{zul } v_{\text{max}} \quad (4-31)$$

$$l_{\text{Block}}^0 = (180 - 6 - 3 - \frac{l_{\text{B}} + l_{\text{D}} + l_{\text{Z}}}{\text{zul } v_{\text{max}}}) \times \text{zul } v_{\text{max}} \quad (4-32)$$

106 Die Werte der Pufferzeit sind wie folgt ([52], [84] und [97], Abbildung 97):

- 1 min:
 - wenn der nachfolgende Zug anfährt
 - wenn der nachfolgende Zug etwa gleich schnell oder langsamer als der vorausgefahrne Zug fährt
 - bei Kreuzungen, wenn beide Züge halten
- 2 min:
 - wenn der nachfolgende Zug durchfährt und seine momentane Geschwindigkeit mindestens 40 km/h höher ist als die Geschwindigkeit des vorausfahrenden Zuges
 - bei Kreuzung, wenn ein Zug durchfährt oder einer der beiden durchfahrenden Züge abzweigt
- 3 min:
 - wenn der nachfolgende Zug durchfährt oder schneller fährt als der vorausgefahrne Zug

$$l_{\text{Block}}^0 = 171 \times \text{zul } v_{\text{max}} - (l_{\text{B}} + l_{\text{D}} + l_{\text{Z}}) \quad (4-33)$$

Die Blocklänge l_{Block} muss weder die Mindestlänge $\min l_{\text{Block}} = 37,5 \text{ m}$ (= Blocklänge am Bahnsteig und technische Mindestblocklänge $\min l_{\text{Block}}$ bei CIR ELKE) einnehmen, noch die maximale Länge $\max l_{\text{Block}}$ überschreiten:

$$\min l_{\text{Block}} \leq l_{\text{Block}} \leq \max l_{\text{Block}} \quad (4-34)$$

$\max l_{\text{Block}}$ = maximale Bremswegabstand z.B. bei $V = 500 \text{ km/h}$ (s. *Tabelle 31*)

Die Summe aller Blöcke muss gleich dem Abstand zwischen dem Ausfahrtsignal am Startbahnhof und dem physischen Einfahrtsignal am Zielbahnhof [97]

$$\sum_1^n l_{\text{Block}} \stackrel{!}{=} s_{\text{strecke}} \quad (4-35)$$

s_{strecke} = Abstand zwischen dem Ausfahrtsignal am Startbahnhof und dem Einfahrtsignal am Zielbahnhof

Aus den Gleichungen (4-29) bis (4-35) ergeben sich die virtuellen Blocklängen für eine hohe Kapazität. Anschließend werden die physischen Signale „wo Weichen zu decken sind, also in Bahnhöfen und an Abzweig- und Überleitstellen“ [84] für einen ohne ETCS-geführte Zug eingefügt. Um die physische Signalstandorte mit dem virtuellen Block übereinzustimmen ergibt sich der physische Signalabstand l_{Sig} mit:

$$l_{\text{Sig}} \geq n \times l_{\text{Block}} \quad (4-36)$$

n = Ganzzahlen

Physische Signale werden u.a. vor Überleitstellen aufgestellt. Der Überleitstellenabstand $l_{\text{Üst}}$ hat Auswirkungen auf die Infrastrukturkosten (Investition und Instandhaltung) und ist maßgebend z.B. für die Sperrzeiten-/Tagesleistungen von Unterhaltungsfahrzeugen. Deshalb soll der Überleitstellenabstand $l_{\text{Üst}}$ nach [91] und [126] wie folgt begrenzt werden:

$$\max l_{\text{Üst}} = 10,0 \text{ km} \quad (4-37)$$

Abschließend wird der physische Signalabstand l_{Sig} anhand der virtuellen Blöcke gesucht, um ein Minimum an Signalen – und somit minimale Kosten – zu erreichen.

Abbildung 98 zeigt den Suchablauf zur Ermittlung der Blocklängen und der Signalstandorte.

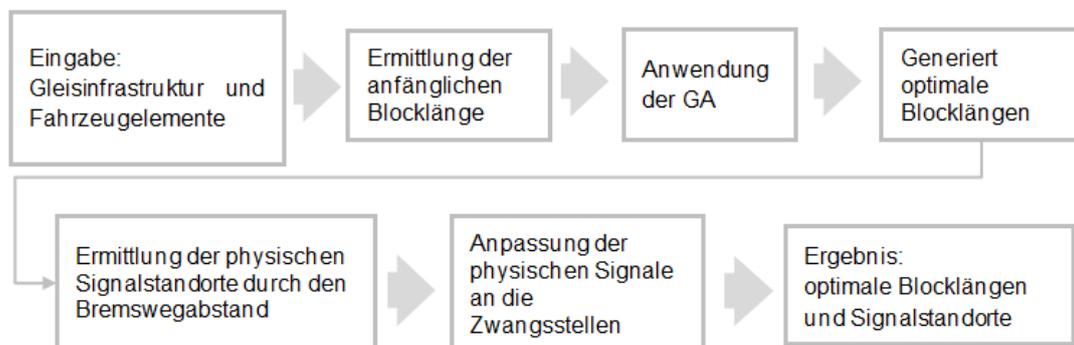


Abbildung 98: Suchablauf für die Ermittlung der optimalen Blocklängen und Signalstandorte (Eigene Darstellung)

4.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde eine detaillierte Beschreibung der Verfahren zur Bestimmung der Infrastruktur anhand eines zukunftsfähigen ITF vorgestellt. Als Basis dienten die in Kapitel 3 erhaltenen Daten von Zugfahrten. Damit wurde zunächst die Gesamtbelegung der Gleise in verschiedenen Bereichen (GG, Bahnhofskopf und Freie Strecke) bestimmt. Anschließend wurde der Spurplan zwischen den ITF-Knoten entwickelt. Darauf folgend wurden die ETCS-Level 2-Blocklängen mit ihren Signalstandorten ermittelt, um die Sicherheitsanforderungen zu erfüllen.

Der Berechnungsprozess wird wie folgt zusammengefasst:

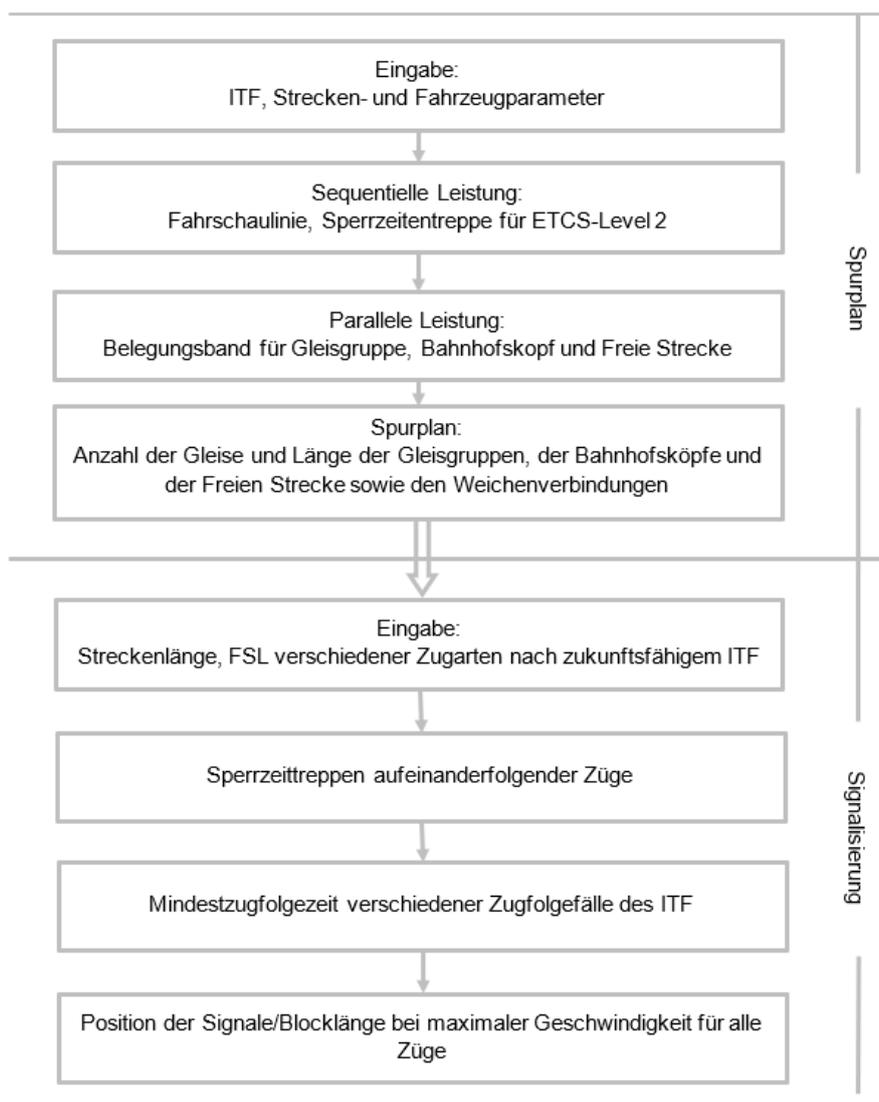


Abbildung 99: Ablauf der Ermittlung der Infrastruktur (Eigene Darstellung)

5 Anwendungsbeispiel: NBS Karlsruhe – Stuttgart

In den Kapiteln 3 und 4 wurden Verfahren zur Bestimmung der Linienführung einer Eisenbahnstrecke und zur Gestaltung von deren Infrastruktur vorgestellt. Um die Wirksamkeit der vorgeschlagenen Verfahren zu demonstrieren, wird in diesem Kapitel eine Fallstudie am Beispiel der Verbindung Karlsruhe Hbf - Stuttgart Hbf skizziert.

Kapitel 5 ist in zwei Abschnitte unterteilt:

- Kapitel 5.1: Ermittlung einer optimalen Linienführung
 - Importierte Daten für die Linienführung
 - „Optimale Lösung“ der Linienführung
- Kapitel 5.2: Spur-/Signalplandimensionierung
 - Importierte Daten für die Spur-/Signalplandimensionierung
 - Ermittlung des Spurplans
 - Ermittlung der Signalstandorte

5.1 Ermittlung einer optimalen Linienführung

In diesem Abschnitt wird die Wirksamkeit der in Kapitel 3 und 4 vorgeschlagenen Verfahren zur Ermittlung von Linienführungen für die im Untersuchungsgebiet (*Abbildung 100*) zu findende Strecke zwischen Karlsruhe Hbf - Stuttgart Hbf überprüft.

5.1.1 Importierte Daten für die Linienführung

Topographische Daten des Untersuchungsgebiets

Abbildung 100 zeigt die Karte des Untersuchungsgebietes als Digitales Höhenmodell (DHM)¹⁰⁷ der UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS)¹⁰⁸. Die Karte enthält die geografischen Koordinaten. Die Höhendaten stellen sich wie folgt dar:

- blaue bis grüne Gebiete sind niedriger gelegen als gelbe bis orangene Gebiete.
 - je dunkler die gelbe bis orangene Farbe ist, desto höher ist die Lage
 - je dunkler die grüne bis blaue Farbe ist, desto niedriger ist die Lage

Es ist offensichtlich, dass das Gebiet von Karlsruhe bis Stuttgart je nach Linienführung erhebliche Höhenunterschiede aufweist.

107 Ein DHM ist eine 3D-Computergrafikdarstellung von Höhendaten, die zur Darstellung des Geländes verwendet wird. Sie wird auch als „Height Map“ bezeichnet, wenn die Elevation dargestellt wird [151]. Normalerweise wird ein DHM als Raster oder Triangulated Irregular Network (TIN) dargestellt [152].

108 Der USGS ist eine wissenschaftliche Einrichtung der Regierung der Vereinigten Staaten. Ende 2014 veröffentlichte die US-Regierung ein globales digitales Höhenmodell mit einer Messgenauigkeit von 1 Bogensekunde (ca. 30 m) für die Öffentlichkeit, das direkt von der USGS-Website abgerufen werden kann [125].

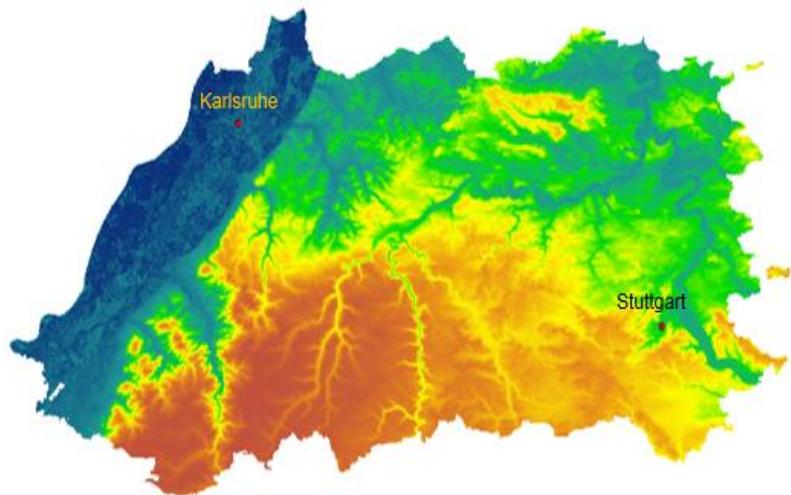


Abbildung 100: Topographische Karte des Untersuchungsgebiets auf USGS-Basis [125]

Das ArcGIS-Tool¹⁰⁹ wird zum Extrahieren von Daten aus der DHM-Karte verwendet. Für das Anwendungsbeispiel wurde zuerst das Untersuchungsgebiet bestimmt und in ein $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ Raster unterteilt.

Da die DHM-Karte alle geographischen Koordinaten und Höhendaten enthält, kann über die Koordinaten x , y , z jeder Punkt bestimmt werden. Unter diesen Angaben repräsentiert der Rasterwert die Höhe z (= Rastervalue, *Abbildung 101*) des ausgewählten gelben Punkts in der *Abbildung 101*. x und y sind die Lage-Positionskoordinaten des Punktes. Mit diesen Koordinaten kann die in Kapitel 3.3.1.2 vorgeschlagene Methode für die Berechnung der Pfaderzeugung angewendet werden.

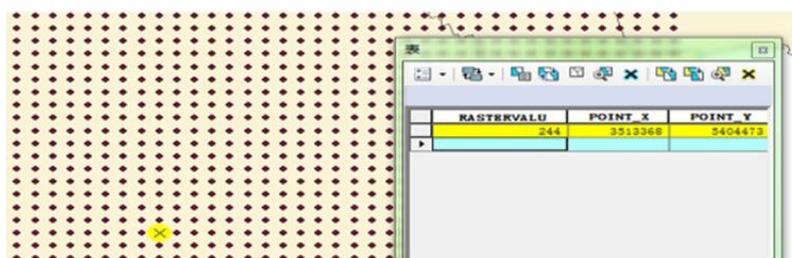


Abbildung 101: Koordinaten für den ausgewählten Punkt (gelb) in der DHM-Karte

Einschränkungen bei der Linienführung

Gemäß den Linienführungs-, Trassierungs- und Gleisparametern, die sich auf die Pfadauswahl nach Kapitel 3 auswirken, müssen bei der Berechnung der Pfade die Limitierungen der Parameter erfüllt werden (*Tabelle 33*).

109 ArcGIS ist der Produktname eines GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM's (GIS) für die Arbeit mit Karten und Geoinformationen, das vom ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE (ESRI) verwaltet wird. Es wird hauptsächlich zum Erstellen und Verwenden von Karten, zum Zusammenstellen von geographischen Daten, zum Analysieren von zugeordneten Informationen, zum Teilen und Erkennen von geographischen Informationen sowie bei der Anwendung von Karten und geographischen Informationen benutzt [153].

Tabelle 33: Einschränkungs- und Vorgabenwerte

Parameter	Limit
Entwurfsgeschwindigkeit V [km/h]	500
Umfwegfaktor U_F	1,2 ¹¹⁰
minimaler Bogenradius $\min r$ [m]	180
maximale Seitenbeschleunigung $\max a_q$ [m/sec ²]	1,5 ¹¹¹
minimale Geradenlänge $\min l_g$ [m]	100
minimale Bogenlänge $\min l_b$ [m]	100
maximale Überhöhung $\max u$ [mm]	200 ¹¹²
maximaler Überhöhungsfehlbetrag $\max u_f$ [mm]	160 ¹¹²
maximale Neigung $\max I$ [‰]	40
maximale Neigungslänge $\max l_N$ [km] für $\max I$ [‰]	2,50 ¹¹³
minimaler vertikaler Ausrundungsradius $\min r_a$ [m]	2.000

Jedes Trassierungs- und Gleiselement wird auf der Basis der Entwurfsgeschwindigkeit V bestimmt. Bei Längenangaben sollte das Element ausreichend lang sein, damit das Fahrzeug $\geq 1,5 - 2$ sec darauf fahren kann [78].

- Die Mindestlänge der Trassierungselemente $\min l_g$ und $\min l_b$ ergeben sich daraus mit 100 m (siehe *Tabelle 6*).
- Der Mindestbogenradius für NBS wird mit $\min r = 180$ m nach [31] angesetzt. Bei Gleisen an der Bahnsteig-Bogen-Innenseite beträgt der Mindestradius $\min r \geq 500$ m [103].
- Bei der SOCIÉTÉ NATIONALE DES CHEMINS DE FER FRANÇAIS (SNCF, Nationale Gesellschaft der französischen Eisenbahnen) werden die NBS mit SchO geplant/ausgeführt. In Deutschland wird für SFS und HGV-Strecken i.d.R. eine FF zugrunde gelegt. Für alle anderen Strecken SchO.

Fahrzeugdaten für die Fahrzeitermittlung

Die Ermittlung der Fahrzeit T eines Zuges erfordert die Kenntnis der Fahrzeug-, Trassierungs- und Gleisparameter. Die Berechnungsergebnisse innerhalb der Linienführungen für die Trassierungs- und Gleisparameter können direkt als Trassierungseingabedaten verwendet werden. Die fahrdynamische Eigenschaft des hier unterstellten zukünftigen sechsteiligen HVG-

110 Nach [154] kann der mittlere Umwegfaktor mit $U_F = 1,2$ angesetzt werden

111 Gemäß [48] beträgt die maximale Seitenbeschleunigung $\max a_q = 1,5$ m/sec²

112 Nach [48] beträgt die maximale Überhöhung u

- für Fahrzeuge ohne GSt $\max u = 200$ mm und der maximale Überhöhungsfehlbetrag $\max u_f = 160$ mm
- für Fahrzeuge mit GSt $\max u = 240$ mm und der maximale Überhöhungsfehlbetrag $\max u_f = 240$ mm

113 Bei NBS kann die maximale Neigung $\max I = 40$ ‰ mit einer maximalen Neigungslänge von $\max l_N = 2,50$ km festgelegt werden ([48] und [119]). In der Praxis wurde die maximale Neigung $\max I = 40$ ‰ auf der HVG-Strecke Köln–Rhein/Main eingebaut. Die SNCF verwendet für HVG-Strecken eine Neigung ≤ 35 ‰.

Fahrzeuges sind nach [48] in *Tabelle 34* dargestellt.

Tabelle 34: Technische Fahrzeugdaten einer ICE-Einheit [48]

Gesamtmasse [t]	130
Gesamtleistung [MW]	10
Betriebsanfahrbeschleunigung [m/sec ²]	0,85
Betriebsbremsverzögerung [m/sec ²]	0,85
V_{max} [km/h]	500

Aus den ermittelten Streckendaten (Kapitel 3.3.1.2: Ermittlung möglicher Linienführungen) und den gegebenen Fahrzeugdaten kann die Fahrzeit mit dem Δs -Schrittverfahren erhalten werden.

5.1.2 „Optimale Lösung“ der Linienführung

Durch DT werden mögliche Linienführungen bestimmt, die alle Einschränkungen und Vorgaben nach *Tabelle 33* berücksichtigen.

Die Grenzwerte der Trassierungs- und Gleisparameter, unter dem Einfluss der Fahrzeugparameter für die Linienführung einer NBS aus den Darstellungen in Kapitel 3.3.1.2, sind in *Tabelle 35* zusammengefasst.

Tabelle 35: Grenzwerte der Trassierungs- und Gleisparameter für die Linienführung einer NBS für $\max V = 270 \text{ km/h}$ ¹¹⁴

Parameter	Grenzwerte
Umfangfaktor U_F	1,2 ¹¹⁵
minimaler Bogenradius $\min r$ [m]	2.400 ¹¹⁶
maximale Seitenbeschleunigung a_q [m/sec ²]	1,05
maximale Überhöhung $\max u$ [mm]	200
maximaler Überhöhungsfehlbetrag $\max u_f$ [mm]	160
maximaler Unzufriedenheitsgrad $U_{R_{x,y}}$ [%]	15 ^{117 118}
maximaler Unzufriedenheitsgrad $U_{\ddot{u}_{x,y}}$ [%]	15 ^{119 118}
maximale Neigung $\max I$ [%]	40
minimaler Ausrundungsradius $\min r_a$ [m]	3.750 ¹²⁰
maximaler Unzufriedenheitsgrad U_{R_z} [%]	15 ^{121 118}

114 Die Grenzwerte für $\max V = 500 \text{ km/h}$ zeigt *Tabelle 46* (siehe Anhang)

115 Die Rechenwerte der Umfangfaktoren U_F für alle ermittelten Linienführungen zeigt *Tabelle 36*

116 Exakt ermittelter Rechenwert $\min r = 2.390 \text{ m}$

117 Exakt ermittelter Rechenwert $U_{R_{x,y}} = 12,12\%$, gewählte Grenze 15%

118 Annahme: Der Unzufriedenheitsgrad teilt sich auf in Fahrgäste welche die Trassierung

- für sportlich betrachten (ca. 10%)
- als unzufrieden empfinden (ca. 5%)

119 Exakt ermittelter Rechenwert $U_{\ddot{u}_{x,y}} = 11,42\%$, gewählte Grenze 15%

120 Exakt ermittelter Rechenwert $\min r_a = 3.750 \text{ m}$

121 Exakt ermittelter Rechenwert $U_{R_z} = 14,6\%$, gewählte Grenze 15%

Aus *Tabelle 35* ist ersichtlich,

- dass der minimale Bogenradius $\min r$ von der Überhöhung u , dem Überhöhungsfehlbetrag u_f sowie dem Unzufriedenheitsgrad $U_{R_{x,y}}$ abhängt.

Gemäß dem Gleisparameter-Grenzwert $\max(u + u_f) = 360 \text{ mm}$ (*Tabelle 33*) kann die zulässige Höchstgeschwindigkeit für das Anwendungsbeispiel auf $V_{\max} = 270 \text{ km/h}$ erreicht werden, wenn der Mindestradius $\min r \geq 2.400 \text{ m}$ unterstellt wird. Mit dieser Geschwindigkeit wird die erforderliche Fahrzeit für den ITF erreicht (*Tabelle 36*).

D.h.: Wenn der Unzufriedenheitsgrad $U_{R_{x,y}}$ den Maximalwert erreicht, muss die Grenze des Radius wie folgt sein:

$$r_{U_{R_{x,y}}} \geq \min r \quad (5-1)$$

$r_{U_{R_{x,y}}}$ = Radius aus dem maximalen Unzufriedenheitsgrad $\max U_{R_{x,y}}$

- dass die maximale Seitenbeschleunigung $\max a_q$ von dem Überhöhungsfehlbetrag u_f und dem Unzufriedenheitsgrad $U_{\ddot{u}_{x,y}}$ abhängig ist.
 - Wenn der maximalen Unzufriedenheitsgrad $U_{\ddot{u}_{x,y}} = 15\%$ aufweist, kann die maximalen Seitenbeschleunigung $\max a_q = 1,5 \text{ m/sec}^2$ erreichen.

$$a_{q,\max U_{R_{x,y}}} = 1,5 \text{ m/sec}^2 = \max a_q \quad (5-2)$$

$a_{q,\max U_{R_{x,y}}}$ = Seitenbeschleunigung beim maximalen Unzufriedenheitsgrad $\max U_{\ddot{u}_{x,y}}$

- Die maximale Seitenbeschleunigung $\max a_q$ sollte nicht größer als die Seitenbeschleunigung $a_{q,U_{\ddot{u}_{x,y}}}$ sein, die dem maximalen Unzufriedenheitsgrad $U_{\ddot{u}_{x,y}}$ entspricht. Somit kann die Grenze der Seitenbeschleunigung $\max a_q$ aus dem Unzufriedenheitsgrad $U_{\ddot{u}_{x,y}}$ wie folgt festgelegt werden:

$$a_{q,U_{\ddot{u}_{x,y}}} \geq \max a_q \quad (5-3)$$

$a_{q,U_{\ddot{u}_{x,y}}}$ = Seitenbeschleunigung aus dem maximalen Unzufriedenheitsgrad $\max U_{\ddot{u}_{x,y}}$

- Wenn die Seitenbeschleunigung $a_q = 1,5 \text{ m/sec}^2$ ist, ergibt sich nach Gleichung (2-98) ein maximaler Überhöhungsfehlbetrag von $\max u_f = 229,5 \text{ mm}$. Da der maximale Überhöhungsfehlbetrag $\max u_f = 160 \text{ mm}$ nicht überschritten werden darf (*Tabelle 33*), ergibt sich mit $\max u_f = 160 \text{ mm}$ daraus eine maximale Seitenbeschleunigung von $\max a_q = 1,046 \text{ m/sec}^2$. Für zukünftige NBS wird der Grenzwert deshalb auf $\max a_q = 1,05 \text{ m/sec}^2$ festgelegt.
- dass sich bei $\text{dyn } a_y = 0,99 \text{ m/sec}^2$ ([48]) der Unzufriedenheitsgrad $U_{R_{x,y}}$ für Kreisbogen mit $U_{R_{x,y}} = 12,12 \%$ bei einem maximalen Überhöhungsfehlbetrag von $\max u_f = 160 \text{ mm}$ aus Gleichung (3-26) berechnet. Zum Vergleich: in [48] beträgt die maximale Unzufriedenheit bei GSt-Fahrzeugen und dem maximalen Überhöhungsfehlbetrag $\max u_f = 240 \text{ mm}$ $U_{R_{x,y}} = 15,2 \%$. Daher wird in dieser Arbeit der maximale Unzufriedenheitsgrad $U_{R_{x,y}}$ für zukünftige NBS auf $U_{R_{x,y}} = 15 \%$ festgelegt, wobei 12% durch die Bewegung erzeugt werden, während die restlichen 3% tolerierbare Abweichungen darstellen [48].
- dass sich der Unzufriedenheitsgrad $U_{\ddot{u}_{x,y}}$ im Übergangsbogen mit der Änderungsgeschwindigkeit in der Steigung des Überhöhungsfehlbetrags $\frac{\Delta u_f}{\Delta t}$ verändert. Wenn ein Zug aus dem Übergangsbogen ausfährt, ändert sich der Überhöhungsfehlbetrag u_f je nach Krümmungsverlauf vom Maximalwert $\max u_f$ bis i.d.R. $u_f = 0 \text{ mm}$. Er wird von der maximalen Änderungsgeschwindigkeit c_{u_f} in der Steigung des Überhöhungsfehlbetrags bestimmt. Der Ruck c_{u_f} wird mit Gleichung (2-97) i.V.m. Gleichung (2-99) ermittelt (siehe

Kapitel 2.3.3). Daraus ergibt sich der Ruck c_{u_f} ausschließlich aus dem Überhöhungsfehlerbetrag u_f mit:

$$c_{u_f} = \frac{\Delta u_f}{153 \cdot \Delta t} \quad (5-4)$$

- Da der Ruck c auch den Unzufriedenheitsgrad U beeinflusst, wird mit Gleichung (3-27) der Unzufriedenheitsgrad $U_{\ddot{u}_{x,y}}$ im Übergangsbogen mit $U_{\ddot{u}_{x,y}} = 11,41\%$ bestimmt. Hier wird der maximale Unzufriedenheitsgrad $U_{\ddot{u}_{x,y}}$ im Übergangsbogen auch auf $U_{\ddot{u}_{x,y}} = 15\%$ festgelegt (wie der Unzufriedenheitsgrad $U_{R_{x,y}}$ für Kreisbogen mit Verweis auf die Ergebnisse von [48])
- dass aus Gleichung (3-18) die mit Schwungfahrt aus der kinetischen Energie E_{kin} des Fahrzeugs zu überwindende Höhendifferenz Δh bei einer Steigung von $I = 40\%$ unter Berücksichtigung des spezifischen Fahrzeugwiderstandes f_{WZ} und des spezifischen Neigungswiderstandes f_N bestimmt werden kann. Mit den in *Tabelle 34* dargestellten Fahrzeugdaten kann bei einer Steigung von $I = 40\%$ eine Erhebung bis zu 289 m allein mit Schwungfahrt überwunden werden.
- dass der Ausrundungsradius r_a von der vertikalen Beschleunigung a_z und dem Unzufriedenheitsgrad U_{R_z} abhängt. Die maximale vertikale Beschleunigung $\max a_z$ sollte \leq der Vertikalbeschleunigung $a_{z,U_{R_z}}$ sein, die dem maximalen Unzufriedenheitsgrad U_{R_z} in z-Richtung entspricht.

$$a_{z,U_{R_z}} \geq \max a_z \quad (5-5)$$

$a_{z,U_{R_z}}$ = vertikalen Beschleunigung aus dem maximalen Unzufriedenheitsgrad $\max U_{R_z}$

$$r_{a,U_{R_z}} \geq \min r_a \quad (5-6)$$

$r_{a,U_{R_z}}$ = Ausrundungsradius aus dem maximalen Unzufriedenheitsgrad $\max U_{R_z}$

- Bei $\max V = 270$ km/h ergibt sich der minimale vertikale Ausrundungsradius zu $\min r_a = 3.750$ m und die vertikale Beschleunigung mit $\max a_z = 1,5$ m/sec². Der Unzufriedenheitsgrad U_{R_z} in z-Richtung errechnet sich aus Gleichung (3-34) dann zu $U_{R_z} = 14,6\%$, $< \max U_{R_z} = 15\%$ (*Tabelle 35*).
- Bei $\max V = 500$ km/h und einem minimalen Ausrundungsradius von $\min r_a = 12.700$ m (siehe Anhang *Tabelle 46*) erreicht der Unzufriedenheitsgrad U_{R_z} in z-Richtung bei $\max a_z = 1,5$ m/sec² ebenfalls einen Unzufriedenheitsgrad U_{R_z} von $U_{R_z} = 14,6\%$. Daher wird der Grenzwert für den Unzufriedenheitsgrad U_{R_z} in z-Richtung auf $U_{R_z} = 15\%$ festgelegt.

Mit den ermittelten Zwischenwerten und den Grenzwerten aus *Tabelle 35* werden die dynamischen Berechnungen mit den Fahrzeugen durchgeführten. Je nach Geländecharakteristik weisen die möglichen Linienführungen bei den vorgegebenen Zwangspunkten im gleichen Abschnitt unterschiedliche Linienführungen auf (*Abbildung 102*).

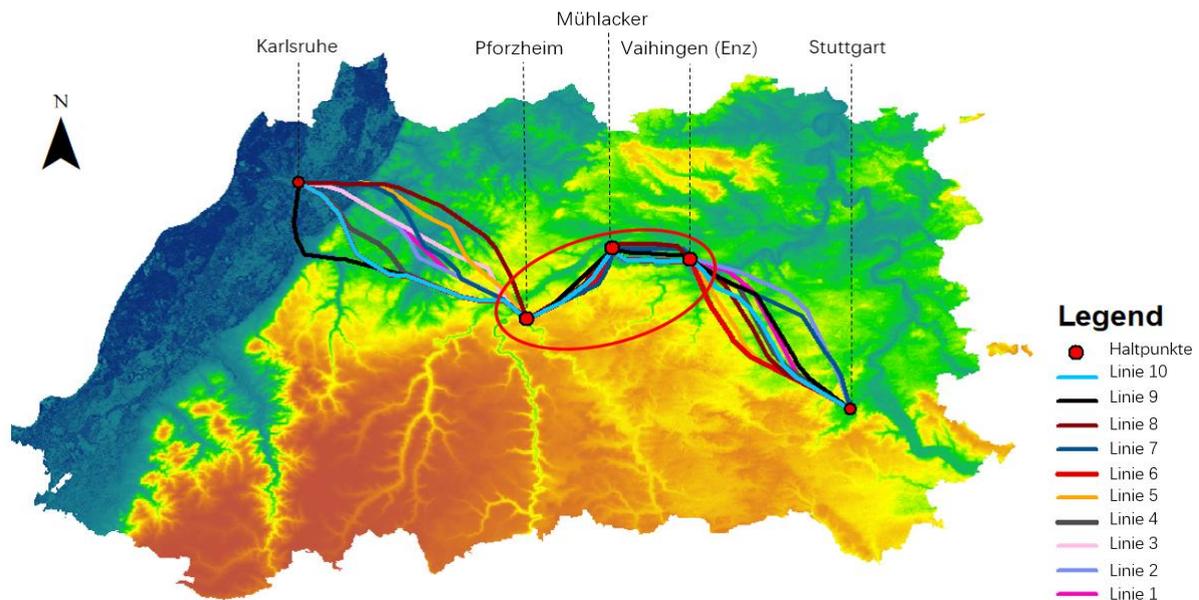


Abbildung 102: mögliche Linienführungen zwischen Karlsruhe und Stuttgart unter Berücksichtigung der Zwischenhalte (Zwangspunkte) von IC und RE

Aus *Abbildung 102* ist ersichtlich, dass bei einer Betrachtungsrichtung von Karlsruhe nach Stuttgart

- im ersten Abschnitt zwischen Karlsruhe und Pforzheim die möglichen Linienführungen aufgrund der wenige Höhendifferenzen aufweisenden Geländes sich stärker unterscheiden.
- der zweite Abschnitt (Pforzheim – Mühlacker) und der dritte Abschnitt (Mühlacker – Vaihingen (Enz)) nur kleine Linienführungsunterschiede aufweisen, die entlang der Geländeoberfläche angeordnet sind.
- durch den Suchalgorithmus vermieden wird, dass mögliche Linienführungen des vierten Abschnitts (Vaihingen (Enz) – Stuttgart), durch das hohe Terrain (orangene Farbe) führen.

Unter Berücksichtigung der Zwischenhalte von IC und RE, der Grenzwerte aus *Tabelle 35* (für $\max V = 500 \text{ km/h}$ siehe Anhang *Tabelle 46*) sowie der Hinzuziehung des jeweiligen linienführungsabhängigen Energieverbrauchs E , kann die „optimale Linienführung“ aus allen möglichen Linienführungen ausgewählt werden.

Um den Energieverbrauch E der Linienführungen zu vergleichen, wird in dieser Arbeit die reine Fahrzeit T der ICE für den 30-Minuten-Takt auf ca. $T = 24 \text{ min}$ (1.440 sec) plus den Fahrzeitzuschlägen nach *Tabelle 23* mit ca. $T_{\text{Zuschläge}} = 195 \text{ sec}$ (5% Regelzuschlag + ca.120 sec Bauzuschlag) auf ca. $T_{\text{ges}} = 1635 \text{ sec}$, gewählt $T_{\text{ges}} = 27,5 \text{ min} = 1650 \text{ sec}$ Gesamtfahrzeit zunächst grob festgelegt. Der Rundungsbereich beträgt ± 30 Sekunden. Die maximale Geschwindigkeit V für diese Fahrzeit beträgt $V = 270 \text{ km/h}$.

Tabelle 36 zeigt die „optimalen Ergebnisse“ aus dem MIP für 10 ermittelte Linienführungen sowohl in Richtung als auch in Gegenrichtung.

Tabelle 36: „Optimale Fahrzeiten“ für 10 Linienführungen zwischen Karlsruhe Hbf und Stuttgart Hbf, vice versa als Netto-Fahrzeit (ohne Regel- und Bauzuschlag)

Linie Nr.	Umfangfaktor U_F	Länge s [m]	max. v [m/sec]		Zeit t [sec]		Energieverbrauch E [kWh]	
			Ka-Stgt	Stgt-Ka	Ka-Stgt	Stgt-Ka	Ka-Stgt	Stgt-Ka
1	1.16	75.494	72	73	1438,45	1432,26	1163,90	1157,65
2	1.17	76.459	75	73	1425,24	1427,37	1197,31	1165,24
3	1.15	75.352	72	71	1431,27	1425,28	1161,78	1158,82
4	1.16	75.759	72	72	1422,78	1421,86	1159,86	1151,75
5	1.16	75.990	70	70	1421,65	1421,37	1148,76	1137,89
6	1.19	77.385	74	73	1423,70	1426,25	1198,50	1174,60
7	1.19	77.466	75	74	1438,34	1440,26	1189,32	1169,50
8	1.18	77.293	74	73	1429,27	1435,15	1933,21	1157,96
9	1.20	78.336	75	74	1447,56	1452,70	1186,60	1173,20
10	1.18	76.863	73	72	1430,65	1437,48	1174,68	1168,91

Abbildung 103 zeigt den Energieverbrauch E je Richtung sowie den Gesamtenergieverbrauch E_{ges} für die 10 ermittelten Linienführungen.

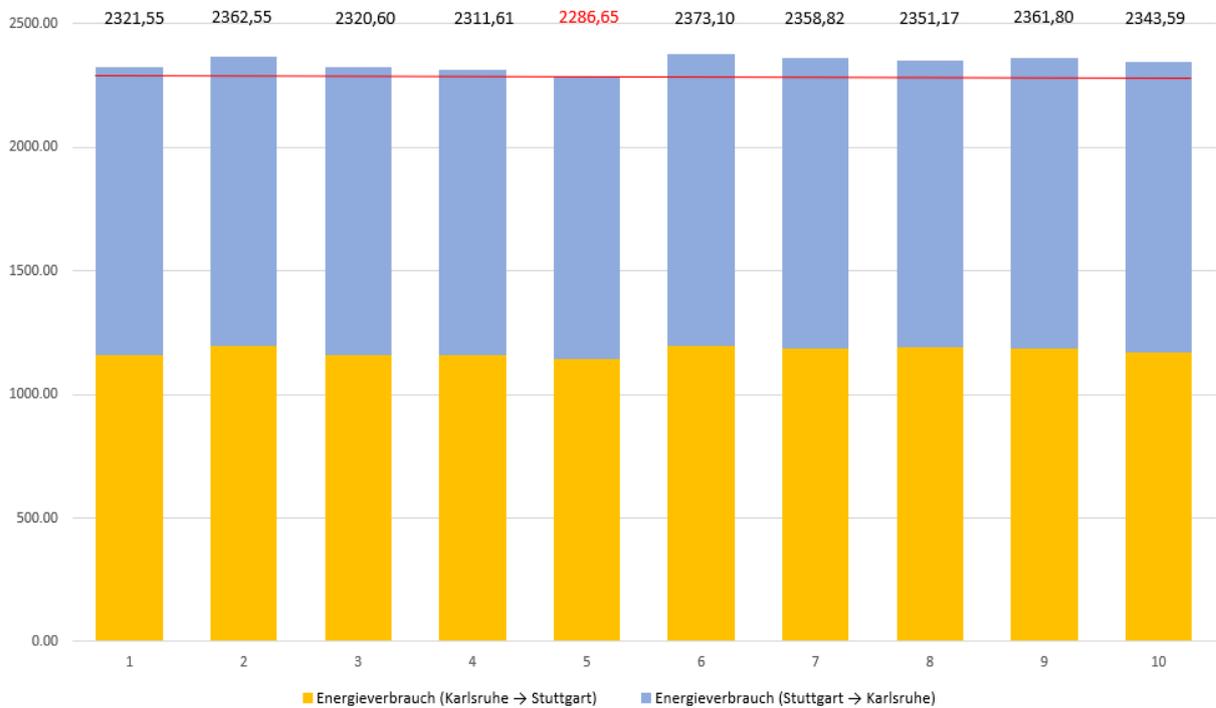


Abbildung 103: Vergleich des Energieverbrauchs E je Richtung sowie des Gesamtenergieverbrauchs E_{ges} für die 10 Linienführungen

Aus *Tabelle 36* und *Abbildung 103* ist ersichtlich:

- außer der Linie 9, erfüllen alle Fahrzeiten die Anforderungen der reinen Fahrzeit ohne Zuschläge für den 30-Minuten-ITF-Takt $T \leq 1.440$ sec
- die Linienführung der Linie 5 und die kürzeste Linienführung, Linie 3, unterscheiden sich nur um 638 m
- in Richtung und Gegenrichtung ist die Geschwindigkeit V bei der Linienführung 5 am gleichmäßigsten (*Abbildung 104*)
- der Gesamtenergieverbrauch E_{ges} für beide Richtungen ist auf der Linie 5 am niedrigsten

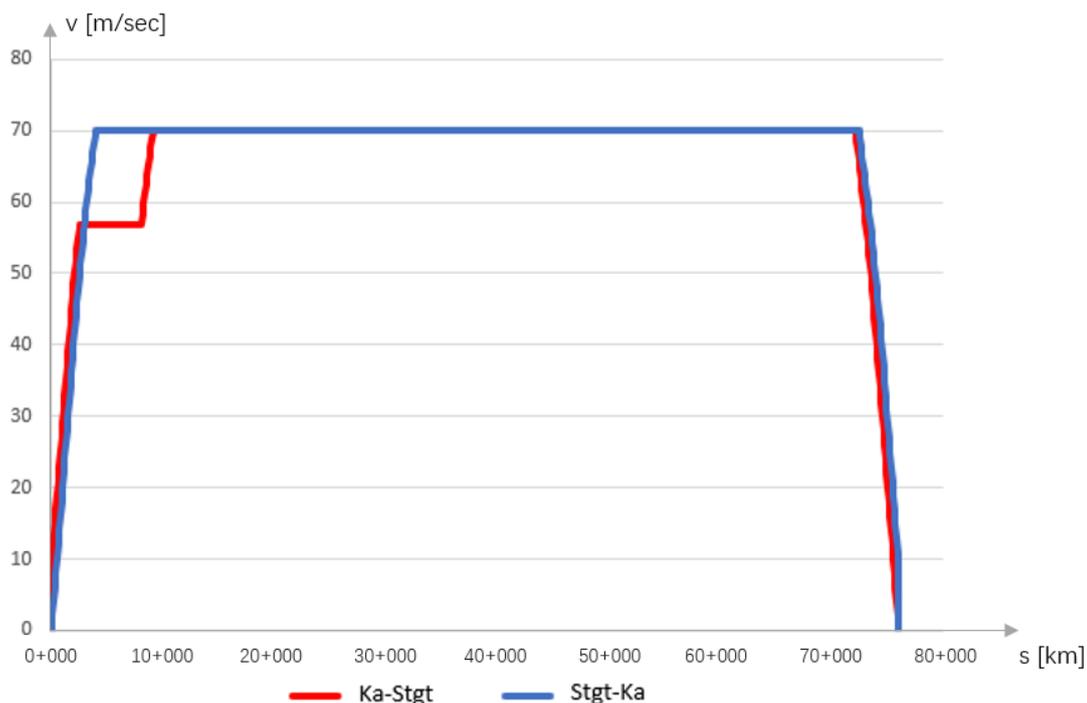


Abbildung 104: Geschwindigkeit-Weg-Diagramm der ausgewählten „optimale Linienführung“ der Linie 5

Die Linie 5 wird mit ein Gesamtfahrzeit von $T_{ges} \sim 27,5$ min von Karlsruhe Hbf nach Stuttgart Hbf und in die Gegenrichtung mit ebenfalls $T_{ges} \sim 27,5$ min als „optimale Linienführung“ ausgewählt.

5.2 Spur-/Signalplandimensionierung

5.2.1 Importierte Daten für die Spur-/Signalplandimensionierung

In diesem Kapitel wird die Infrastruktur (hier: Trassierungs- und Gleisparameter sowie die Signalstandorte) für die neue Eisenbahnstrecke ermittelt. Zunächst werden die erforderlichen Eingabedaten in die Verfahrensdateien und Algorithmen, einschließlich Strecken-, Fahrzeug- und Fahrplandaten eingepflegt.

In Kapitel 5.1 wurde die Linienführung ermittelt, so dass die Streckeneingabedaten für die Ermittlung des Berechnungsergebnisses direkt verwendet werden können.

Fahrzeug

Tabelle 37 zeigt die technischen Daten für die drei unterstellten Personenzüge.

Tabelle 37: Fahrzeugdaten

Zuggattung	Beschleunigung a [m/sec ²]	Verzögerung b [m/sec ²]	V_{\max} [km/h]	Zuglänge l_z [m]
ICE	0,85	0,85	500	≤ 400
IC	0,7	0,7	250	≤ 300
RE	0,65	0,65	160	≤ 200

Die Zugzusammenstellungen sind aus Tabelle 38 ersichtlich.

Tabelle 38: Zugzusammenstellung der Personenzüge

Zuggattung	Zuglänge	Wagen	Antrieb
ICE	400 m ¹²²	12	Triebzug
IC	275 m ¹²³	11	Triebwagen
RE	105 m ¹²⁴	4	Triebzug

Fahrplan

Auf die Fahrzeugdaten wird das MIP angewendet, um die Fahrzeit T der drei Zuggattungen zu berechnen, welche die Kriterien für ihre ITF-Taktzeiten erfüllen.

In dieser Arbeit wird Stuttgart Hbf als Hauptsystemknoten unterstellt, d.h. alle Züge aus Karlsruhe (auch in/aus Richtung Nürnberg, München) treffen sich in Stuttgart Hbf und müssen dort die ITF-Anschlusskriterien erfüllen.

Zwischen dem Karlsruher Hbf und dem Stuttgarter Hbf verkehren die höherrangigen ICE-Züge ohne Halt alle 30 min. Die niederrangigeren Züge (IC und RE) erhalten den ITF-Anschluss von/zu den höherrangigen Zügen (ICE) in Stuttgart Hbf. Um den Reisenden in Stuttgart Hbf zu/von den höherrangigen Zügen den ITF-Anschluss zu gewährleisten, müssen die niederrangigeren Züge die Reisenden auch aus den Anschlussstrecken wie folgt aufnehmen:

- IC-Halte in Pforzheim und Vaihingen (Enz)
- RE-Halte in Pforzheim, Mühlacker und Vaihingen (Enz)

In den Zielstationen werden nach dem ITF-Schema die Ankunfts- und Abfahrzeiten festgelegt (Tabelle 39 und Tabelle 40 sowie Abbildung 105 und Abbildung 106). Die Fahrzeiten der IC und RE zwischen den Haltestellen zeigt Tabelle 47 und Tabelle 48 (Anhang).

122 Nach UIC 505-1 ist der ICE 3 für eine maximale statische Achslast von 17 t und eine maximale Zuglänge von 400 m ausgelegt ([16] und [124]). Die Zuglänge des 13-teiligen ICE 4 ist 374 m [54]. In dieser Arbeit wird der ICE als 2-teiliger Triebzug mit 50% angetriebenen Achsen und einer Länge von 400 m betrachtet.

123 Die Zuglänge der IC2 Stadler-KISS mit 4-Triebwagen beträgt 100 m [25]

124 4-teilig Triebzug Desiro HC RRX mit Singledeckmotor- und Doppelstockwagen [116]

Tabelle 39: 30 min-ITF zwischen Karlsruhe Hbf und Stuttgart Hbf

Karlsruhe Hbf → Stuttgart Hbf				
Zug-Nr.	Karlsruhe Hbf		Stuttgart Hbf	
	an	ab	an	ab
ICE1A	7:29	7:31	7:59	8:01
ICE2A	7:59	8:01	8:29	8:31
IC1A	7:13	7:17	7:56	8:04
IC2A	7:43	7:47	8:26	8:34
RE1A	6:57	7:03	7:53	8:07
RE2A	7:27	7:33	8:23	8:37

Die Ankunfts- und Abfahrzeiten inkl. den Übergangszeiten zum/vom höherrangigen zum/vom niederrangigen Zug zeigen die ITF-Uhren in *Abbildung 105* und *Abbildung 106*.

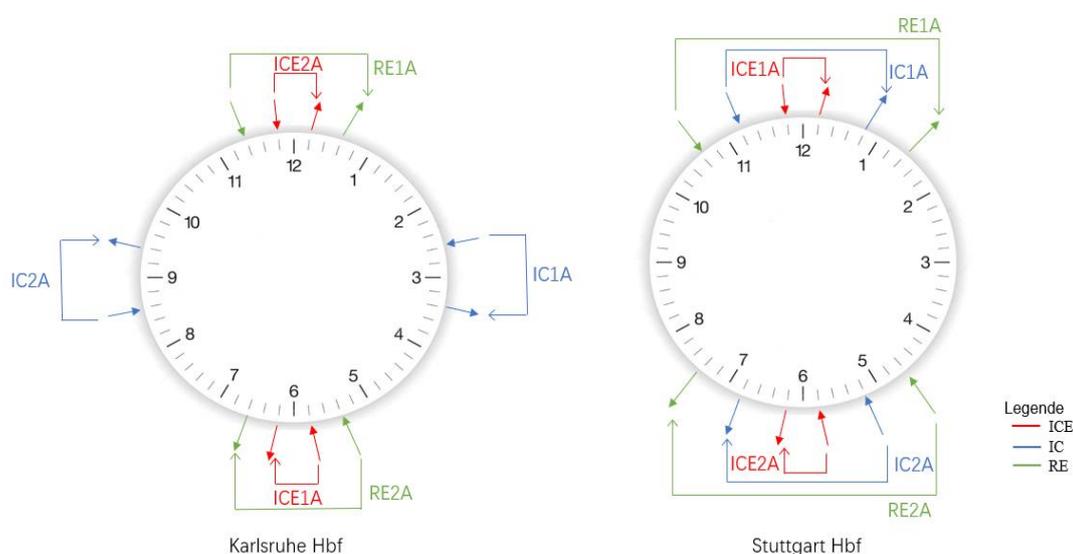


Abbildung 105: ITF-Uhr für Karlsruhe Hbf und Stuttgart Hbf, Fahrtrichtung Karlsruhe - Stuttgart

Abbildung 105 zeigt die ITF-Uhren von Karlsruhe Hbf und Stuttgart Hbf, Fahrtrichtung Karlsruhe – Stuttgart. Die jeweils gleiche Zuggattung fährt jede halbe Stunde.

Tabelle 40: 30 min-ITF von Stuttgart Hbf nach Karlsruhe Hbf

Stuttgart Hbf → Karlsruhe Hbf				
Zug-Nr.	Stuttgart Hbf		Karlsruhe Hbf	
	an	ab	an	ab
ICE1B	7:29	7:31	7:59	8:01
ICE2B	7:59	8:01	8:29	8:31
IC1B	7:26	7:34	8:13	8:17
IC2B	7:56	8:04	8:43	8:47
RE1B	7:23	7:37	8:27	8:33
RE2B	7:53	8:07	8:57	9:03

Abbildung 106 zeigt die ITF-Uhren von Karlsruhe Hbf und Stuttgart Hbf, Fahrtrichtung Stuttgart - Karlsruhe. Wie bei *Abbildung 105* fahren die gleichen Zuggattungen jede halbe Stunde. Da der

Stuttgarter Hbf der Hauptsystemknoten im vorliegenden ITF-System ist, treffen alle Züge – aufgrund ihrer Zwischenhalte und unterschiedlichen Abfahrts- und Ankunftszeiten der IC und RE im Karlsruhe Hbf – gegenüber dem Stuttgarter Hbf, als Zubringer-/Anschlusszüge in Stuttgart Hbf ein.

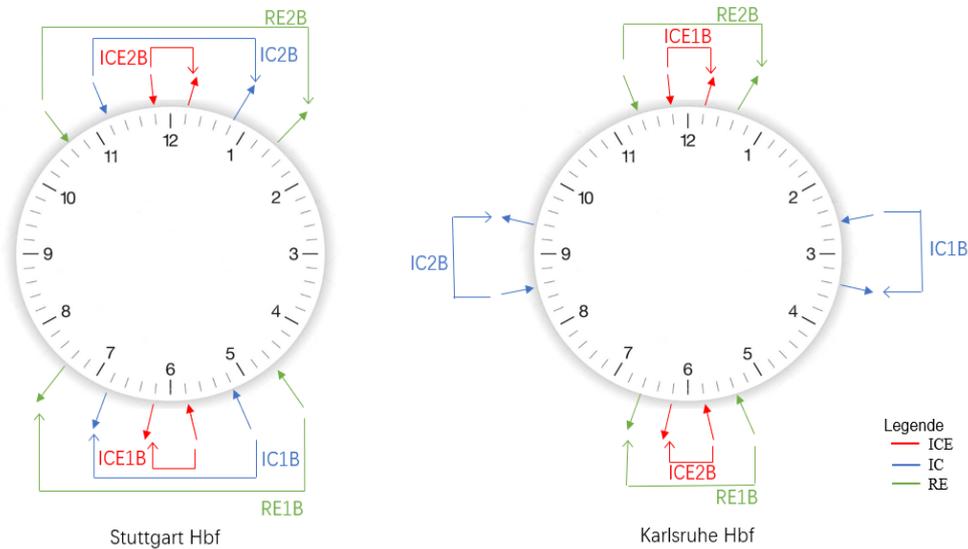


Abbildung 106: ITF-Uhr für Stuttgart Hbf und Karlsruhe Hbf, Fahrrichtung Stuttgart - Karlsruhe

5.2.2 Ermittlung des Spurplans

Gleisanzahl in den Bahnhofs-Gleisgruppen

Basierend auf den ITF-Fahrplänen der Tabelle 39 und Tabelle 40 bzw. der Abbildung 105 und Abbildung 106 wurden die Belegungen der Züge in den Bahnhofs-GG mit der Gleichung (4-14) ermittelt.

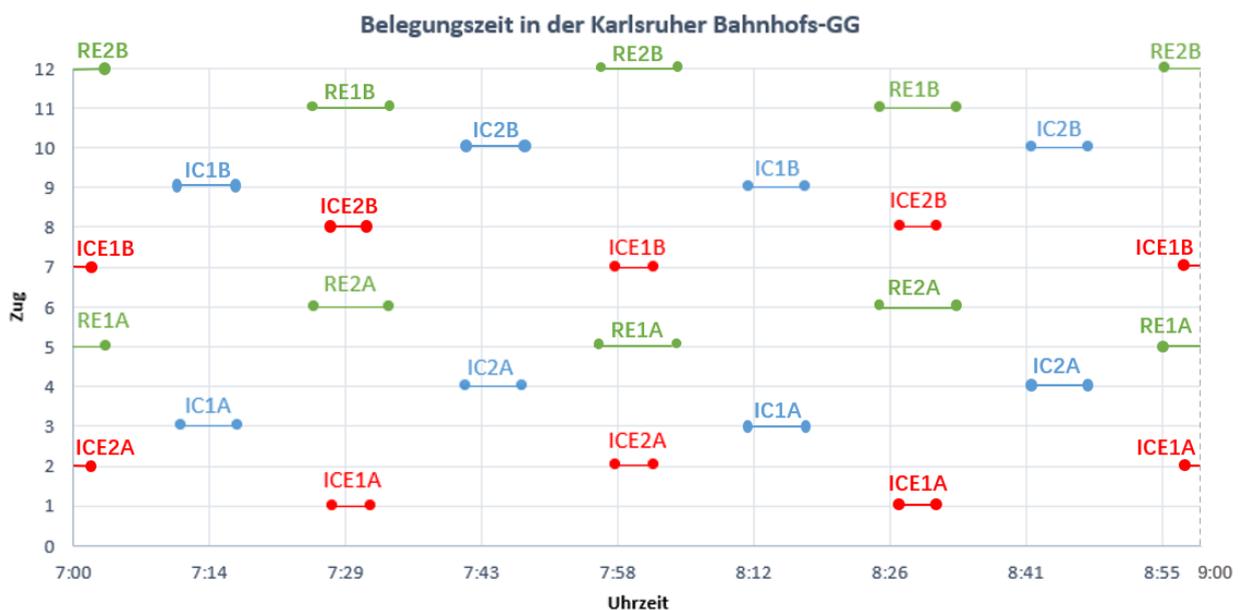


Abbildung 107: Belegungsdiagramm-Auszug der Bahnhofs-GG Karlsruhe

Aus *Abbildung 107* ergibt sich, dass 4 Bahnsteiggleise der GG im Karlsruher Hbf benötigt werden.

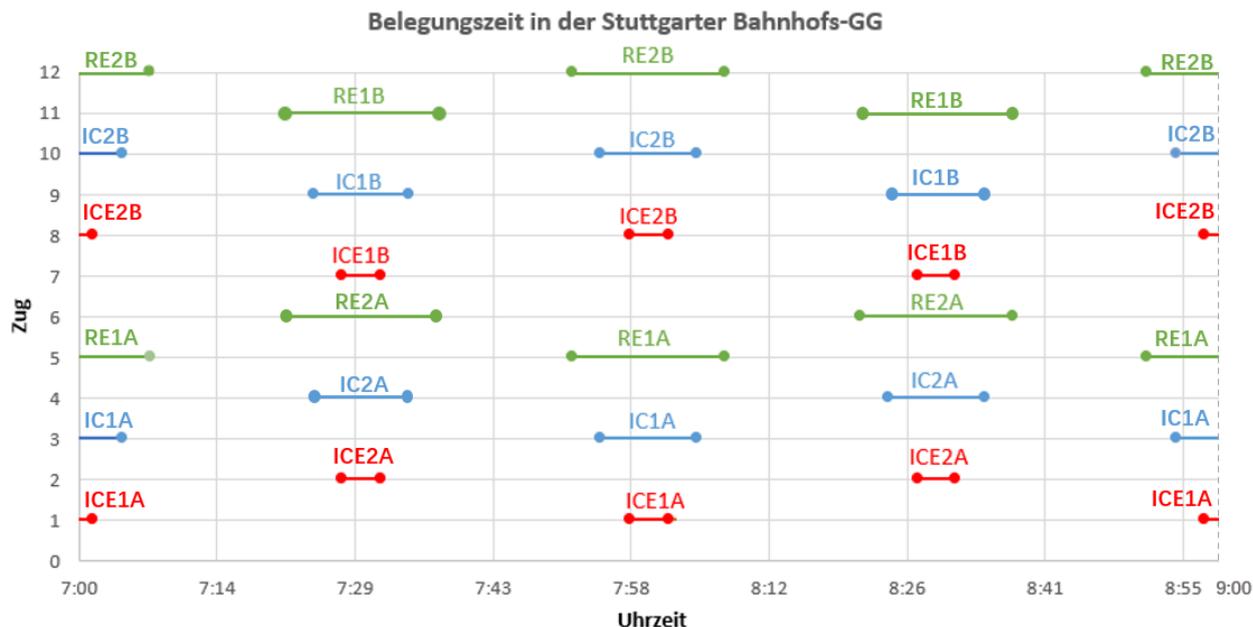


Abbildung 108: Belegungsdiagramm-Auszug der Bahnhofs-GG Stuttgart

Aus *Abbildung 108* ergibt sich, dass 6 Bahnsteiggleise der GG im Stuttgarter Hbf benötigt werden.

Die Länge eines ICE-Zuges beträgt nach *Tabelle 37* und *Tabelle 38* maximal 400 m, so dass die Bahnsteiglänge der Bahnhofsgleise in der GG auf 405 m (ICE 400 m + 5 m Spielraum für ungenaues Halten) festzulegen ist, damit der gesamte Zug am Bahnsteig halten kann.

Gleisanzahl für die Freie Strecke

Die Zugbelegung auf der Freien Strecke wird nach Kapitel 4.3.2 berechnet.

Abbildung 109 zeigt das Belegungsdiagramm aller Züge zwischen den Hauptbahnhöfen Karlsruhe und Stuttgart für eine Zeiteinheit (siehe ITF-Uhren *Abbildung 105* und *Abbildung 106*). Diese Zeiteinheit wiederholt sich während der gesamten Personenzug-Betriebszeit/Tag. Die Position der Züge hängt von den zeitlichen Änderungen ab. Jedes Belegungsband ist auf 0,1 sec genau berechnet.

Grundsätzlich kann die Anzahl der Gleise auf der Freien Strecke hier in zwei Fälle unterschieden werden:

- für eine 2-gleisige Strecke werden keine zusätzlichen Gleise nach dem Belegungsdiagramm (*Abbildung 109*) i.V.m. der Bemessung (*Tabelle 41*) benötigt.
- sollte die Strecke vom Grundsatz hier 1-gleisige ausgeführt werden, werden zusätzliche Gleisabschnitte – wie in *Tabelle 42* aufgeführt – mit einem partiellen zweiten Gleis benötigt.

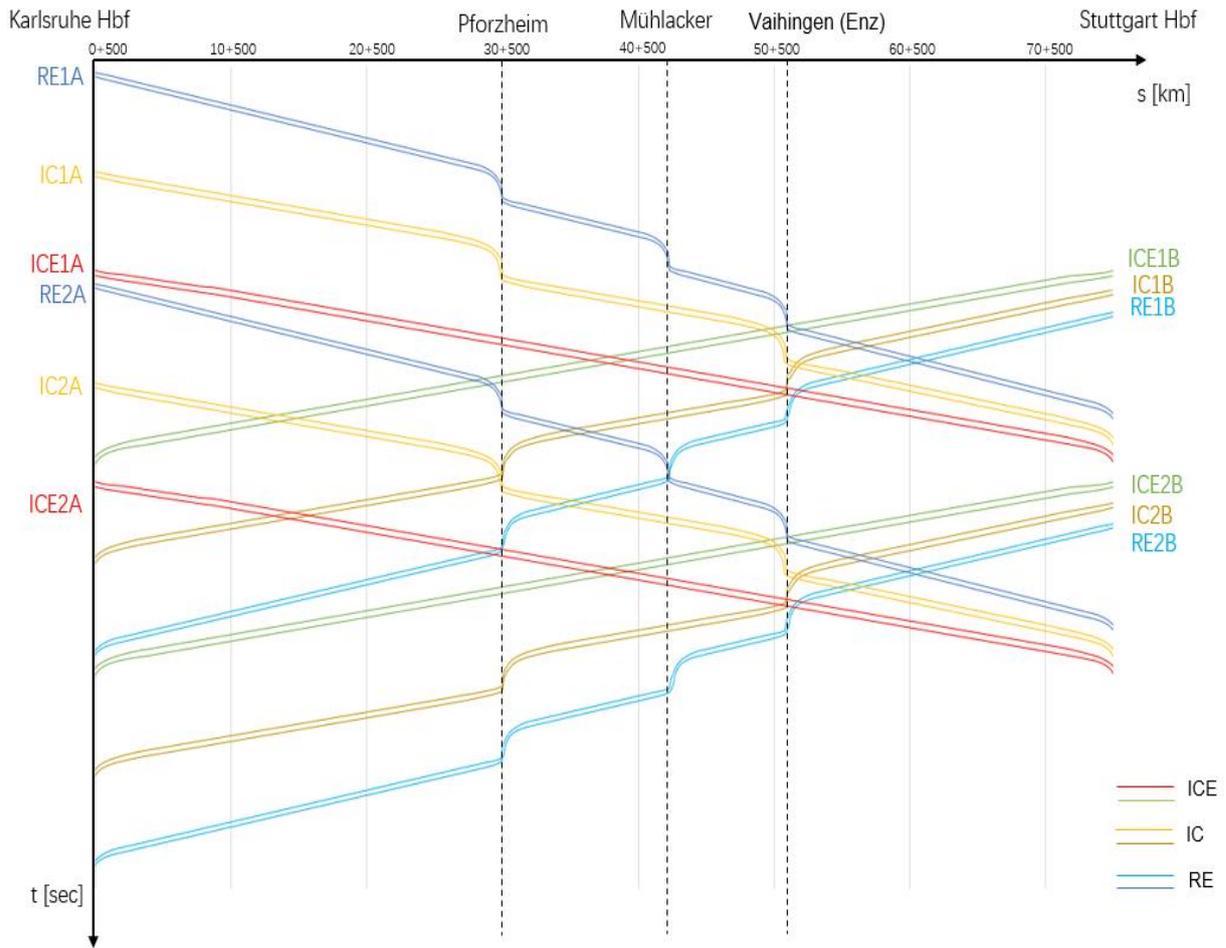


Abbildung 109: Belegungsdiagramm auf der Freien Strecke zwischen Karlsruhe und Stuttgart

Tabelle 41: Erforderliche Anzahl und Lage der Gleise auf der Freien Strecke nach Abbildung 109

Zug-Nr.		Start [km]	End [km]	Anzahl der Gleise	Zug-Nr.		Start [km]	End [km]	Anzahl der Gleise
IC2A	ICE1B	12+600	15+500	2	ICE2A	IC2B	50+700	51+500	2
ICE2A	IC1B	13+600	16+400	2	RE1A	ICE1B	51+500	52+700	2
RE2A	ICE1B	28+500	29+700	2	RE2A	ICE2B	51+500	52+700	2
IC2A	IC1B	28+600	30+300	2	ICE1A	RE1B	51+800	52+600	2
ICE2A	RE1B	29+200	30+400	2	ICE2A	RE2B	51+800	52+600	2
IC2A	RE1B	34+600	36+600	2	IC1A	IC1B	52+100	52+700	2
RE2A	IC1B	35+200	37+200	2	IC2A	IC2B	52+100	52+700	2
ICE1A	ICE2B	37+100	39+800	2	IC1A	RE1B	55+300	57+200	2
ICE2A	ICE2B	37+100	39+800	2	IC2A	RE2B	55+300	57+200	2
RE2A	RE1B	42+500	42+800	2	IC1A	RE1B	55+900	57+800	2
IC1A	ICE1B	49+800	50+800	2	IC2A	RE2B	55+900	57+800	2
IC2A	ICE2B	49+800	50+800	2	RE1A	RE1B	60+200	61+700	2
ICE1A	IC1B	50+700	51+500	2	RE2A	RE2B	60+200	61+700	2

Aus Tabelle 41 ergibt sich die Anzahl und Lage (Start-km bis Ziel-km) der benötigten Gleise je Zeiteinheit zwischen den Stationen, die mit den Gleichungen (4-10) und (4-12) ermittelt wurden.

Abbildung 109 i.V.m. Tabelle 41 zeigt, dass die in Tabelle 41 geforderte Anzahl der Gleise auf der Freien Strecken in den aufgezeigten Abschnitten vorhanden sein müssen.

Tabelle 42: Position des zusätzlichen Gleises bei 1-gleisiger NBS-Ausführung

zusätzliche Gleise	Start [km]	End [km]
Nr. 1	12+600	16+400
Nr. 2	28+600	30+400
Nr. 3	34+600	39+800
Nr. 4	42+500	42+800
Nr. 5	49+800	52+700
Nr. 6	55+300	57+800
Nr. 7	60+200	61+700
Summen	18 km	

Der Vergleich partieller 1-gleisiger mit durchgängiger 2-gleisigen Strecke zeigt, dass

- die Nutzung einer 1-gleisigen Strecke eine deutlich geringere Kapazität als die Hälfte einer 2-gleisigen aufweist [128].
- bei 1-gleisiger Ausführung 7 zusätzliche 2-gleisige Abschnitte mit den jeweiligen Weichenverbindungen (14 Weichen) inkl. der LST hinzugefügt werden müssen. Die Weichenverbindungen müssen auf die örtlichen Geschwindigkeiten abgestimmt sein, um keine Fahrzeitverluste zu konstruieren.
- die Abstände zwischen den 2-gleisigen Abschnitten und den Bahnhöfen (Nr. 2 und Pforzheim, Nr. 5 und Vaihingen (Enz)) sehr kurz sind. Dies beeinflusst die Geschwindigkeit und den Energieverbrauch und somit die Fahrzeit des Zuges und ist für den Betrieb nicht förderlich.
- Nr. 4 im Anschluss an den Bahnhof Mühlacker sehr kurz ist, da sich RE2A und RE1B im Bf Mühlacker vorab treffen.

Folgerung:

Die 2-gleisige Strecke eignet sich sowohl in finanziellem Hinblick auf die Investitionen und Kosten der Unterhaltung als auch für den Betrieb.

Gleisverbindungen im Bahnhofskopf

Die Gleisverbindungen im Bahnhofskopf werden gemäß Kapitel 4.3.4 berechnet.

Die Belegung eines Zuges im Bahnhofskopf wird mit den Gleichungen (4-15) und (4-16) berechnet. Die Belegungsbänder in den Bahnhofsköpfen Karlsruhe und Stuttgart sind in *Abbildung 110* und *Abbildung 111* dargestellt.

Abbildung 110 und mit vergrößerten Teilausschnitt *Abbildung 116* (Anhang) zeigen für den Bahnhofskopf Karlsruhe Hbf Richtung Stuttgart:

- ICE2A und ICE1B überlappen sich zwischen km 0+000 und km 0+190
- ICE2B und RE1B überlappen sich zwischen km 0+000 und km 0+138 (siehe auch Anhang *Abbildung 116*)

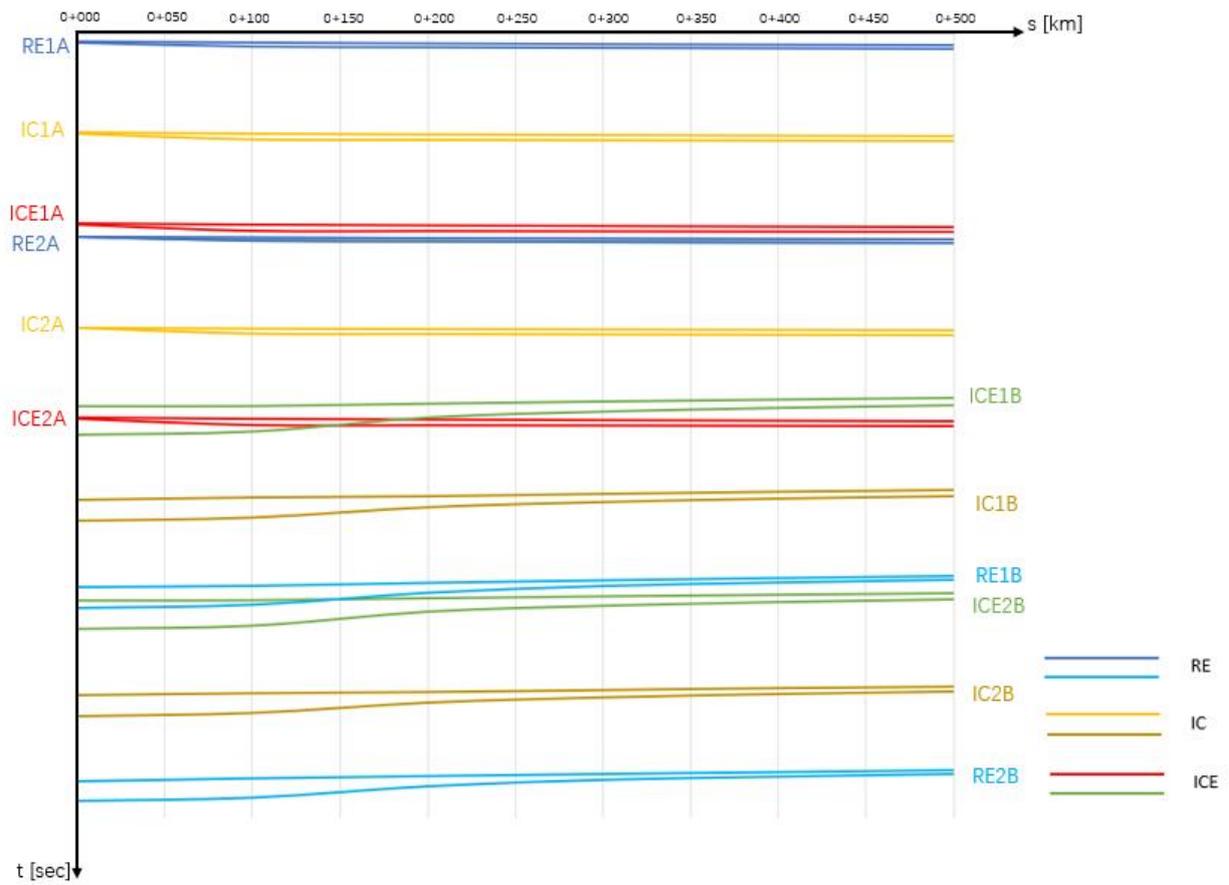


Abbildung 110: Belegungsbänder im Bahnhofskopf Karlsruhe Hbf

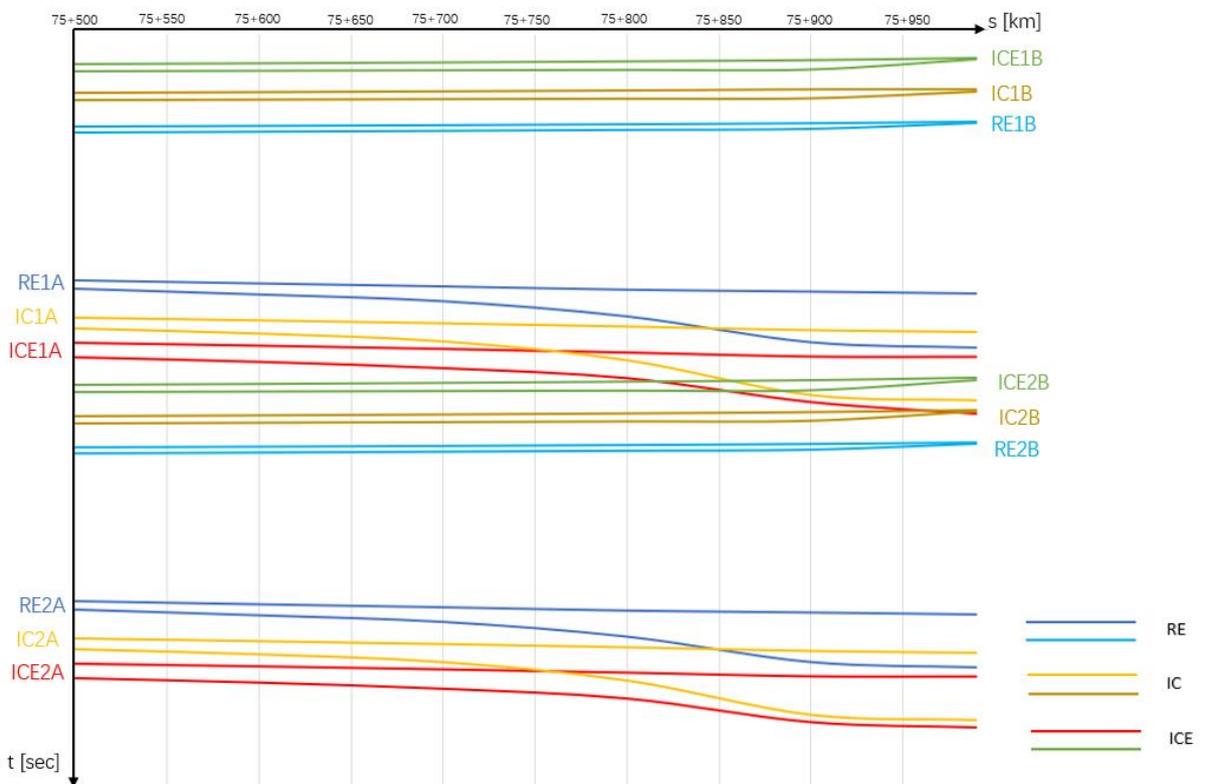


Abbildung 111: Belegungsbänder im Bahnhofskopf Stuttgart Hbf

Abbildung 111 zeigt für den Bahnhofskopf Stuttgart Hbf Richtung Karlsruhe:

- IC1A und RE1A sowie IC2A und RE2A überlappen sich zwischen km 75+850 und km 75+990
- ICE1A und IC1A sowie ICE2A und IC2A überlappen sich zwischen km 75+780 und km 75+990
- ICE2B und ICE1A überlappen sich zwischen km 75+860 und km 75+990
- ICE2B und IC1A überlappen sich zwischen km 75+815 und km 75+990

Da die Stuttgarter Bahnhofs-GG mit km 75+585 beginnt (die Bahnsteiglänge in der GG ist 405 m), müssen Züge vor der Einfahrt in die GG zu den Bahnsteigen die Gleise wechseln, um sicherzustellen, dass es nach der Einfahrt in die GG keine Konflikte gibt.

Abbildung 110 und Abbildung 111 zeigen, dass am Bahnhofskopf von Karlsruhe Hbf zwei Gleise und am Bahnhofskopf von Stuttgart Hbf vier Gleise zur Vermeidung der aufgezeigten Konflikte erforderlich sind.

Nach [34] wird der Abstand des Bahnhofskopfes vom Bahnsteigende mit ca. 400 m angenommen. Laut EBO [31] beträgt die Geschwindigkeit V eines Zuges, der in einen Bahnhof ein- bzw. ausfährt, i.d.R. $V \leq 60 \text{ km/h}$. Unter Berücksichtigung der in dieser Arbeit berechneten FSL der langsameren Züge (z.B. RE) wird der Abstand des Bahnhofskopfes vom Bahnsteigende auf 450 m festgesetzt.

Die Gleisverbindungen im Bahnhofskopf zur 2-gleisigen Freien Strecke können nach Kapitel 4.3.4.1.2 unter Berücksichtigung des Komforts aus der Querschleunigung a_q für stehende (anschließend aussteigende) Fahrgäste bestimmt werden. Alle verwendeten Weichen sind Einfache Weichen EW 500-1:14 mit einer Länge von ca. 43 m. Bei einer Geschwindigkeit von $V = 60 \text{ km/h}$ beträgt der Mindestabstand zwischen den Weichen $\min l_w = 0,1 \times V \geq 7 \text{ m}$ ([103] und [104]). Die Querschleunigung für stehende Fahrgäste beim Überfahren der Weichen bei einer Überhöhung von $u = 0 \text{ mm}$ und einem Überhöhungsfehlbetrag von $u_f = 86 \text{ mm}$ beträgt $a_q = 0,56 \text{ m/sec}^2$. Der Unzufriedenheitsgrad $U_{R_{x,y}}$ stellt sich mit $U_{R_{x,y}} = 4,44\%$ ein.

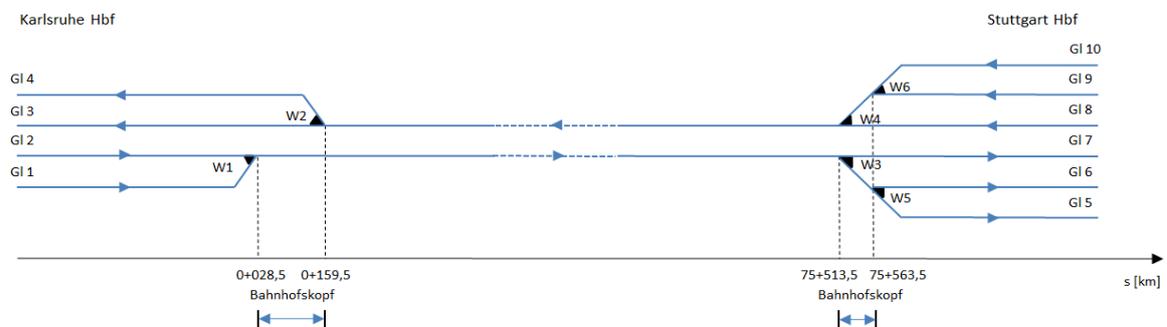


Abbildung 112: Spurplan für die Einführung der zweigleisigen Freien Strecke in die Hauptbahnhöfe Karlsruhe und Stuttgart

Um die Berechnungen übersichtlich zu gestalten, werden die Gleise zunächst nummeriert und die Fahrrichtungen angegeben, in welche die Züge fahren können. Die Weichen werden in Abhängigkeit von den Berechnungsergebnissen der Zugpriorisierung in der entsprechenden Reihenfolge eingefügt. Die Reihenfolge der Züge ist in *Tabelle 43* aufgeführt.

Tabelle 43: Reihenfolge der Zugeinfahrten

Zug	Karlsruhe Hbf	Weichen						Stuttgart Hbf
	Gleis-Nr.	W1	W2	W3	W4	W5	W6	Gleis-Nr.
RE1A	1	x		x		x		5
IC1A	2			x				6
ICE1A	2							7
RE2A	1	x		x		x		5
IC2A	2			x				6
ICE2A	2							7
ICE1B	3							8
IC1B	3				x			9
RE1B	4		x		x		x	10
ICE2B	3							8
IC2B	3				x			9
RE2B	4		x		x		x	10

Abbildung 112 zeigt den Spurplan auf der Basis eines zukunftsfähigen ITF unter Berücksichtigung der Zugreihenfolge aus *Tabelle 43*:

- für Karlsruhe Hbf
 - in Richtung Stuttgart:
 - da sich die Haltezeiten von ICE1A und RE2A bzw. ICE2A und RE1A in der Karlsruher Bahnhofs-GG überlagern (*Abbildung 105* und *Abbildung 107*), muss ICE1A und ICE2A auf Gleis 2 einfahren und dort halten (*Tabelle 43*). Nach ihrem Aufenthalt fahren sie aus diesem Gleis direkt nach Stuttgart Hbf aus.
 - RE2A bzw. RE1A fahren aufgrund ihrer früheren Ankunftszeit vor dem ICE1A bzw. ICE2A auf Gleis 1 ein. Nach deren Aufenthalt fahren sie im Anschluss an ICE1A bzw. ICE 2A von Gleis 2 über die Weiche W1 nach Gleis 2 und über die Freie Strecke weiter zum Hbf Stuttgart (*Tabelle 43*).
 - aus Richtung Stuttgart:
 - da die Überlagerung der Belegungsbänder von ICE2B und RE1B bzw. ICE1B und RE2B bei km 0+138 beginnt (*Abbildung 110* und *Abbildung 116* (Anhang)) und bis zur Bahnhofs-GG (*Abbildung 106*, *Abbildung 107* und *Abbildung 110*) reicht, wird die Weiche W2 benötigt, dass RE1B bzw. RE2B auf Gleis 4 wechseln kann (*Tabelle 43*). Obwohl der ICE2B bzw. ICE1B später als der RE1B bzw. RE2B eintrifft (*Abbildung 106* und *Abbildung 107*), muss der ICE2B bzw. ICE1B direkt nach Gleis 3 einfahren (*Tabelle 43*), weil der ICE eine hohe Zugpriorisierung hat, möglichst direkt im Durchfahrgleis einfahren und deshalb Weichen so weit wie möglich meiden sollte.
 - RE1B bzw. RE2B fährt über die Weiche W2 in Gleis 4 ein.

- für Stuttgart Hbf
 - in Richtung Stuttgart:
 - da ICE1A, IC1A und RE1A vor der Einfahrt in die Bahnhofs-GG an die Bahnsteige die Gleise wechseln müssen (*Abbildung 111*), wurden die Weichen W3 und W5 bei km 75+513,5 und km 75+563,5 unter Berücksichtigung der Weichenlänge und des Weichenabstands festgelegt.
 - ICE1A und ICE2A fahren nach Gleis 7 ein.
 - IC1A und IC2A fahren über die Weichen W3 und W 5 in Gleis 6 ein (*Tabelle 43*).
 - RE1A und RE2A fahren über die Weichen W3 und W5 in Gleis 5 ein (*Tabelle 43*).
 - aus Richtung Stuttgart:
 - um die IC und RE im Richtung Karlsruhe auszufahren, wurden die Weichen W4 und W6 bei km 75+513,5 und km 75+563,5 festgelegt.
 - IC1B bzw. IC2B fahren aus Gleis 9 über die Weichen W6 und W4 auf die Freie Strecke (*Tabelle 43*).
 - RE1B bzw. RE2B fahren aus Gleis 10 über die Weichen W6 und W4 auf die Freie Strecke (*Tabelle 43*).

Die letzte Weiche des Bahnhofskopfes vor der Freien Strecke wird als Ende des Bahnhofskopfes betrachtet, so dass der Abstand des Bahnhofskopfes von Karlsruhe Hbf von km 0+028,5 bis km 0+159,5 = 131 m und der Abstand des Bahnhofskopfes von Stuttgart Hbf von km 75+513,5 bis km 75+563,5 = 50 m beträgt (*Abbildung 112*).

5.2.3 Ermittlung der Signalstandorte

5.2.3.1 Blockeinteilung im Bahnhof

Gemäß Kapitel 4.4.4 werden die virtuellen Blöcke über die Bahnsteiglänge in beiden Bahnhöfen aufgeteilt (*Abbildung 113*). Die Länge der Bahnsteige in der Bahnhofs-GG beträgt 405 m. Um die Blocklänge gleichmäßig zu gestalten, beträgt die Mindestblocklänge $\min l_{\text{Block}} = 40,5 \text{ m}$. Somit ergeben sich für die Bahnhofs-GG-Abschnitte entlang den Bahnsteigen insgesamt 10 virtuellen Blöcke.

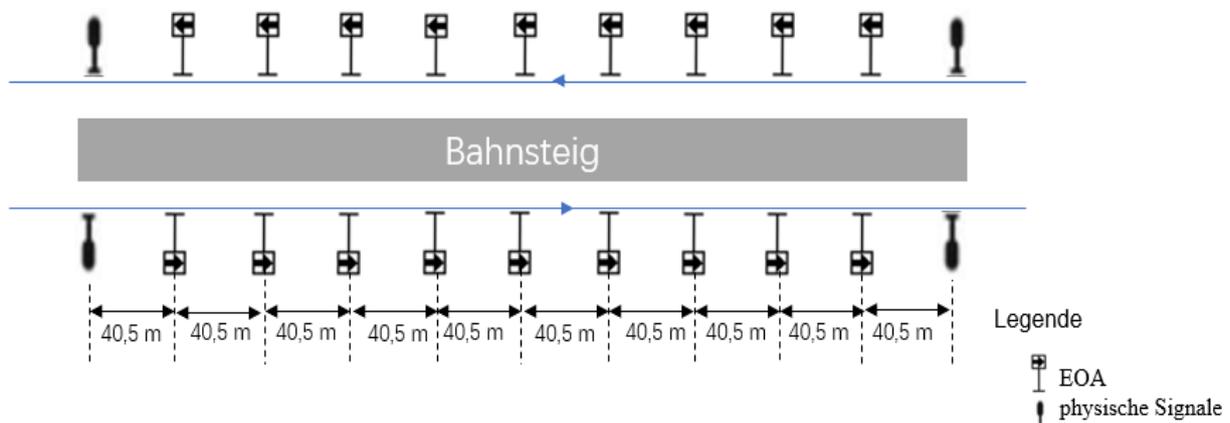


Abbildung 113: virtuelle Blockeinteilung am Bahnsteig

Gemäß des Teilblockmodus (siehe Kapitel 4.4.3.1) werden vier physische Signale als Ein- und Ausfahrtsignale an beide Enden eines Bahnsteigs gesetzt.

Virtuelle Blöcke in den Bahnhofsköpfen:

- Bahnhofskopf Karlsruhe Hbf: da der Abstand zwischen den Weichen W1 und W2 von km 0+028,5 bis km 0+159,5 = 131 m beträgt, werden in diesem Abschnitt die virtuellen Signale wegen des Deckungssignals für die Weichen nicht benötigt.
- Bahnhofskopf Stuttgart Hbf: aufgrund der kurzen Länge des Bahnhofskopfes mit den Deckungssignalen der Weichen sind hier keine zusätzlichen virtuellen Signale erforderlich.

Tabelle 44 fasst alle virtuellen Blockeinteilungen in den Hauptbahnhöfen Karlsruhe und Stuttgart zusammen.

Tabelle 44: Zusammenfassung der virtuellen Blockeinteilungen in den Hauptbahnhöfen Karlsruhe und Stuttgart

		Blocklänge	Anzahl der Block
Karlsruhe Hbf	GG	40,5 m	10
	Bahnhofskopf	-	-
Stuttgart Hbf	Bahnhofskopf	-	-
	GG	40,5 m	10

Anhand der Teilblockmodi müssen die physischen Signale an jeder Weiche sowie an den Aus-/Einfahrtsignalen gesetzt werden (siehe Kapitel 4.4.3.1), so dass die physischen Signalstandorte im Bahnhof mit den Weichen und den Aus-/Einfahrtsignalen übereinstimmen (Abbildung 114).

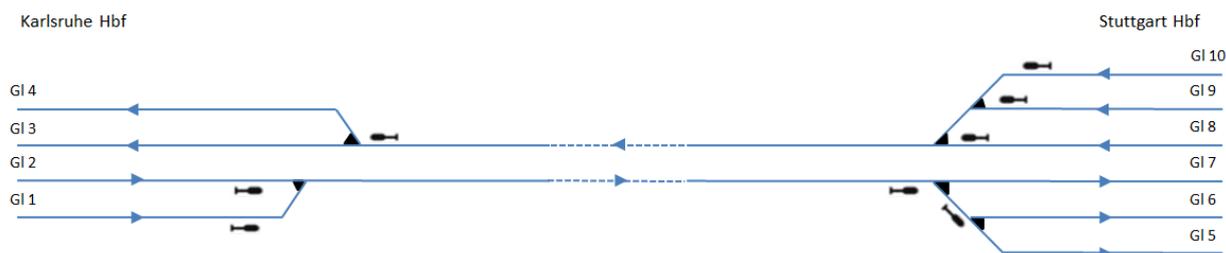


Abbildung 114: physische Signalstandorte in den Hauptbahnhöfen Karlsruhe und Stuttgart

5.2.3.2 Signalstandorte auf der Freien Strecke

Die Länge zwischen Karlsruhe Hbf und Stuttgart Hbf beträgt für die gewählte Linienführung (Linie 5) 75.990 m. Die Freie Strecke beginnt nach dem Karlsruher Hbf bei km 0+50 nach der letzten Weiche (W1) und endet vor dem Stuttgarter Hbf vor dem Einfahrtsignal bei km 75+392 (100 m vor der Weichenspitze W3. Dies entspricht dem Mindestanstand eines Signals zum Weichenanfang einer spitz befahrenen Weiche [52]).

Mit den GA wird die Mindestblocklänge $\min l_{\text{Block}}$ zwischen Karlsruhe Hbf und Stuttgart Hbf mit 598 m generiert. Somit ergeben sich 126 EOA und damit 127 virtuelle Blöcke.

Nachfolgend werden die physischen Signalstandorte gemäß den Gleichungen (4-36) bis (4-37) berechnet. Signal Nr. 1 (Ausfahrtsignal von Karlsruhe Hbf vor der Weiche W1) ist das letzte physische Signal des Karlsruher Hbf. Signal Nr. 20 (von Stuttgart Hbf) ist als Einfahrtsignal das erste physische Signal nach der Freien Strecke der betrachteten NBS für den Stuttgarter Hbf vor der Weiche W3.

Tabelle 45 führt die physischen Signalstandorte der Aus- und Einfahrtsignale sowie der Deckungssignale an den Überleitstellen auf, Fahrtrichtung Karlsruhe - Stuttgart.

Tabelle 45: Berechnungsergebnisse für die physischen Signalstandorte

Signal-Nr.		Ort [km]	Blockabstand [m]
1	Ausfahrtsignal	0+050	-
2	Deckungssignal	10+216	10.166
3	Deckungssignal	10+432	216
4	Deckungssignal	20+000	9.568
5	Deckungssignal	20+216	216
6	Einfahrtsignal	30+382	10.166
7	Ausfahrtsignal	30+782	400
8	Deckungssignal	31+380	598
9	Deckungssignal	31+596	216
10	Deckungssignal	41+164	9.568
11	Deckungssignal	41+380	216
12	Einfahrtsignal	42+576	1.196
13	Ausfahrtsignal	42+866	290
14	Einfahrtsignal	51+238	8.372
15	Ausfahrtsignal	51+638	400
16	Deckungssignal	58+216	6.578
17	Deckungssignal	58+432	216
18	Deckungssignal	68+000	9.568
19	Deckungssignal	68+216	216
20	Einfahrtsignal	75+392	7.176

Aus *Tabelle 45* ist folgendes ersichtlich:

- der maximale Abstand der physischen Signale beträgt 10.166 m (zwischen Signal Nr. 1 und Signal Nr. 2 sowie zwischen Signal Nr. 5 und Signal Nr. 6). Dies ist der Abstand zwischen dem Ausfahrtsignal des Karlsruher Hbf und der Überleitstelle bzw. dem Einfahrtsignal des Pforzheimer Bhf. Der Abstand der physischen Signale unterteilt sich in 17 virtuellen Blöcken.
- um die Anforderungen des Überleitstellenabstandes $l_{\text{üst}} \leq 10$ km anzupassen, wurde der maximale Signalabstand für die Überleitstellen auf 9.568 m festgelegt (zwischen Signal Nr. 3 und Signal Nr. 4, Signal Nr. 9 und Signal Nr. 10 sowie Signal Nr. 17 und Signal Nr. 18). Die Länge der Überleitstellen beträgt 216 m¹²⁵. Somit ist der gesamte Abstand zwischen den Mittelpunkten von zwei Überleitstellen 9.784 m, das sind annähernd 10 km.
- dass die Abstände zwischen den Ein- und Ausfahrtsignal an den Zwischenhalttestellen auf der Grundlage der Länge der Züge (IC und RE) und des Gefahrenpunktabstandes für Einfahrtsignale generiert wurden (z.B. zwischen Signal Nr. 6 und Signal Nr. 7, Signal Nr. 12 und Signal Nr. 13 sowie Signal Nr. 14 und Signal Nr. 15).

125 Länge von vier EW 500-1:14 plus angepassten Weichenabstand

6 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein ganzheitlicher Ansatz für die mikroskopische Infrastrukturdimensionierung vorgeschlagen, der auf dem Konzept der inversen Kapazitätsbemessung (C^{-1}) basiert. Da das C^{-1} -Verfahren im Ansatz „vom Fahrplan zur Infrastruktur“ geprägt ist, nimmt der Fahrplan bzw. die Zugfahrzeiten T eine wichtige Rolle ein. Die Spur-/Signalplandimensionierung basiert in dieser Arbeit auf einem zukunftsfähigen ITF.

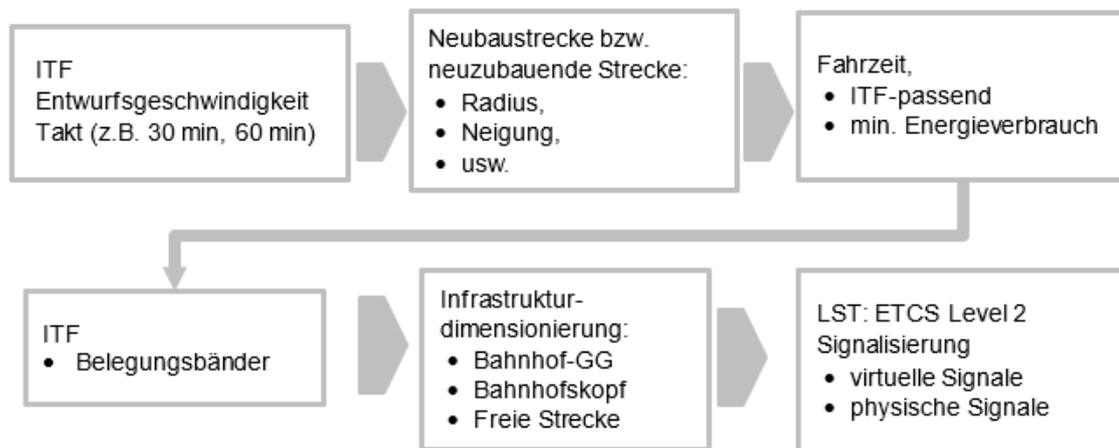


Abbildung 115: Arbeitsschritte dieser Arbeit (Eigene Darstellung)

Abbildung 115 zeigt die Schritte dieser Arbeit zusammenfassend. Wie bereits erwähnt, besteht die erste Voraussetzung für die Gestaltung der Infrastruktur darin, sich in den vorgegebenen zukunftsfähigen ITF einzufügen. Daher bestimmt die Zukunftsfähigkeit des ITF die Nachhaltigkeit der Infrastruktur. Um die Anforderungen des ITF zu erfüllen, müssen zuerst die Zugfahrzeiten T und die dazu benötigte Geschwindigkeiten $\max V$ bestimmt werden.

Damit gliedert sich der Ablauf der mikroskopischen Infrastrukturdimensionierung in vier Stufen:

- (i) ITF-Konstruktion
- (ii) Basierend auf dem ITF und der Entwurfsgeschwindigkeit wird eine NBS ermittelt. Die Fahrzeit T – unter Berücksichtigung des Unzufriedenheitsgrades U und des minimalen Energieverbrauchs $\min E$ – muss sich dem ITF anpassen.
- (iii) Auf Basis der „optimalen Lösung“ der Linienführung wird die Dimensionierung der Infrastruktur räumlich und zeitlich festgelegt.
- (iv) Die „optimalen Signalstandorte“ werden gemäß Kapitel 4.4 ermittelt.

Diese Arbeit kombiniert für die Linienführung einer NBS zwei Methoden. Mit DT werden zunächst die wichtigsten Faktoren auf der horizontalen und vertikalen Ebene bzw. der Umwegfaktor U_F und die Neigung I um den entsprechenden Intervallpunkt ermittelt. Dies schafft die Voraussetzung für die nachfolgende Linienverbesserung. Daraus resultieren verschiedene realisierbare Lösungen.

Um die „optimale Lösung“ auszuwählen, wird die Fahrschaulinie des Zuges berechnet. Reproduzierbarkeit und Implementierung werden dadurch erreicht, dass eine ganzzahlige lineare Optimierungsmethode angewandt wird. Diese kann die exakte „optimale Lösung“ erzielen. Im Vergleich zu früheren Untersuchungen besteht der Vorteil dieser Methode darin, dass die „optimale Lösung“ nicht mehr auf einer voreingestellten Wahrscheinlichkeit basiert.

Aufgrund der Komplexität des Entwurfs der Infrastruktur (in dieser Arbeit werden nur die Trassierungs- und Gleisparameter sowie die Signalstandorte betrachtet) auf der Basis eines ITF wird das Konzept C^{-1} vorgeschlagen, um die Infrastrukturbemessung so zu gestalten, dass sie den Transportanforderungen entspricht. Ein Teil dieser Arbeit konzentriert sich dabei auf die Weichenverbindungen im Eisenbahnknoten. Das angewandte LP-Modell versucht, den zukunftsfähigen ITF einzuhalten, während der Spurplan die kleinste mögliche Anzahl an Weichen aufweist. Durch die Kombination der Methoden aus [29] und [42] wurde schließlich der Spurplan entwickelt, der nicht nur dem ITF entspricht, sondern auch die geringsten Baukosten für die Infrastrukturkomponenten enthält.

ETCS-Level 2 ist bei der DB perspektivisch das Zugsteuerungssystem der beginnenden und nächsten Dekade [127]. Um die Realisierbarkeit eines hinsichtlich der Geschwindigkeit V gemischten Personenverkehrs zu gewährleisten, werden die Blöcke mit ihren virtuellen und physischen Signalstandorten berechnet. Mithilfe des in dieser Arbeit verwendeten GA wird die Mindestanzahl von Signalen berechnet, die nicht nur die wirtschaftlichen Anforderungen erfüllen, sondern auch die Sicherheitsanforderungen des Zugfahrens.

7 Ausblick

Da es noch Unvollkommenheiten und ungelöste Aufgaben auf diesem Feld der Eisenbahnbetriebswissenschaft gibt, hier folgende Anregungen:

- Verbesserung der Linienführung:
 - Auf Basis von detaillierteren geographischen Informationen (z.B. Schutzgebiete, deren Durchfahrung nicht geboten ist) können bei der Berechnung der Linienführung Bereiche berücksichtigt werden, die möglichst nicht bzw. mit besonderen Maßnahmen durchfahren werden können und damit die Effizienz des Ergebnisses erhöhen.
 - Sollten leistungsfähigere PC's in Zukunft sehr große Datenmengen verarbeiten können, kann die digitale topografische Karte in kleinere Raster (z.B. 30 m × 30 m oder 20 m × 20 m) unterteilt werden, um die Genauigkeit der Berechnung zu erhöhen.
 - Zur Optimierung der Linienführung sollte der Einsatz von s-förmigen Übergangsbogen bzw. Übergangsbogen nach BLOSS geprüft werden.
- Weitere ungelöste Aufgaben für die Spur-/Signalplandimensionierung:
 - Verbesserung des Algorithmus, der die Berechnung von mehreren Knoten oder Teilen des Netzes ermöglicht.
Problem: mit steigender Anzahl an Zügen und Knoten im mikroskopischen Modell geht eine Erhöhung der Lösungsmenge und Berechnungszeit einher, welche unter Verwendung heute üblicher PC's noch Probleme bereitet.
 - Tool für die Untersuchungen im ETCS-Level 3 (= Moving Block).
In dieser Arbeit wurde die Spur-/Signalplandimensionierung mit ETCS-Level 2 entwickelt. Im Vergleich zu ETCS-Level 2 besteht beim evtl. zukünftigen Betrieb im Level 3 aufgrund des Fahrens im absoluten Bremswegabstand eine weitere Kapazitätssteigerung.

Literaturverzeichnis

- [1] ALLGEMEINES EISENBAHNGESETZ (AEG)
Fassung vom 12.12.2003
- [2] BLOSS, A.E.
Der Übergangsbogen mit geschwungener Überhöhungsrampe
Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens 73 (15), 1936, Seite 319 bis 320
- [3] BMVI
Machbarkeitsstudie zur Prüfung eines Deutschland-Takts im Schienenverkehr
Anlagen, 2015
- [4] BMVI
Bahnsystem soll digitalisiert werden
<https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/E/digitalisierung-bahnsystem.html>,
aufgerufen am 01.03.2021
- [5] BMVI
Infrastruktur für einen Deutschland-Takt im Schienenverkehr
<https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/BVWP/bundesverkehrswegeplan-2030-deutschlandtakt.html?nn=216420>, aufgerufen am 14.05.2021
- [6] BLAUTH, MARVIN
Infrastruktur- und Fahrplanbestimmung in Teilnetzen auf Grundlage eines Betriebskonzeptes
Diplomarbeit: Abteilung Eisenbahnwesen, Karlsruhe Institut für Technologie, 2013
- [7] BOPP, BERND
Inverse Kapazitätsermittlung: Ermittlung der Infrastruktur unter der Vorgabe eines Zielfahrplans, Beispiel: Querspange Erbach - Ehingen
Diplomarbeit: Abteilung Eisenbahnwesen, Universität Karlsruhe (TH), 2004
- [8] BRÄNNLUND, U.; LINDBERG, P.O.; NOU, A., NILSSON, J.-E.
Railway Timetabling Using Lagrangian Relaxation
Transportation Science 32(4), 1998, Seite 358 bis 369
- [9] BUHL, PHILIPP
Inverse Kapazitätsermittlung: Ermittlung der Infrastruktur unter der Vorgabe einer Zielkapazität, Beispiel: Umgestaltung des Rangierbahnhofes Däniken
Diplomarbeit: Abteilung Eisenbahnwesen, Universität Karlsruhe (TH), 2004
- [10] BUSSE, MATTIAS
Der optimierte Einsatz von ETCS-Bremskurven
Dissertation: Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“, Technischen Universität Dresden, 2021
- [11] BÜKER, THORSTEN
Methods of assessing railway infrastructure capacity
Journal of Engineering Science & Technology (JESTEC), 2013, Seite 59 bis 71
- [12] CHANG, C.S.; DU, D.
Improved optimisation method using genetic algorithms for mass transit signalling block-layout design
IEE Proc. Electr. Power Appl. 145, 1998, Seite 266 bis 272
- [13] CHANG, C.S.; DU, D.
Further improvement of optimisation method for mass transit signalling block-layout design using differential evolution
IEE Proc. Electr. Power Appl. 146, 1999, Seite 559 bis 569

- [14] CHANG, C.S.; SIM, S.S.
Optimising train movements through coast control using genetic algorithms
IEE Proceedings - Electric Power Applications, 1997, Seite 65 bis 73
- [15] CHENG, J. F.; LEE, Y.
Model for three-dimensional highway alignment
Journal of Transportation Engineering, 132(12), 2006, Seite 913 bis 20
- [16] TIETZE, CHRISTIAN
Die Premiere des ICE 3
Eisenbahn Magazin, Heft (12), 1998, Seite 20
- [17] de SMITH, M. J.
Determination of gradient and curvature constrained optimal paths
Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 21(1), 2006, Seite 24 bis 38
- [18] DENIßEN, JONAS; FLIEGER, MARKUS; KÜMMLING, MICHAEL; KÜPPER, MICHAEL; WANSTRATH, SVEN
Optimierung der Blockteilung mit ETCS Level 2 im Digitalen Knoten Stuttgart
SIGNAL+DRAHT, 7+8/ 2021, Seite 60 bis 67
- [19] DEUTSCHE BAHN AG
Grundlagenbericht zum UmweltMobilCheck (UMC)
Stand April 2016
- [20] DEUTSCHE BAHN AG
Digitale Schiene Deutschland - Die Zukunft der Eisenbahn
September 2019
- [21] DEUTSCHE BAHN GRUPPE
Planungsgesellschaft Bahnbau Deutsche Einheit mbH (Hrsg.): Nürnberg–München in
einer Stunde
Nürnberg, 30. November 1999
- [22] DEUTSCHE BAHN NETZ AG
European Train Control System (ETCS) bei der DB Netz AG
verfügbar unter
https://www.deutschebahn.com/resource/blob/1303328/d9556ec0c860abb53cf07bfcb693f79d/Anhang_Themendienst_ETCS-data.pdf, aufgerufen am 25.05.2022
- [23] DEUTSCHE BAHN NETZ AG
ETCS als Trägersystem für mehr Kapazität und Betriebsqualität: Empfehlungen &
Ergebnisse der S-Bahn-ETCS-Untersuchung in Stuttgart
ETCS auf der Stammstrecke der S-Bahn Stuttgart, 26.06.2019
- [24] DEUTSCHE BAHN NETZ AG
Geschäftsbericht 2014
- [25] DEUTSCHE BAHN NETZ AG
Intercity 2 Stadler-KISS BR 4110 Daten und Fakten
Stand: Januar 2020
- [26] DIN EN 13803
Bahnanwendungen - Oberbau - Trassierungsparameter - Spurweiten 1435 mm und
größer, gültig ab 09. 2017
- [27] DORSCH LEXIKON DER PSYCHOLOGIE
Variable, kontinuierliche
verfügbar unter <https://dorsch.hogrefe.com/stichwort/variable-kontinuierliche#search=1e6b9087d345886499303deac53f848b&offset=0>, aufgerufen am 21.04.2022

- [28] DORSCH LEXIKON DER PSYCHOLOGIE
Variable, diskrete
verfügbar unter <https://dorsch.hogrefe.com/stichwort/variable-diskrete#search=06a66a4f41f2aa78ab32cab947b22bfd&offset=0>, aufgerufen am 21.04.2022
- [29] DÜPMEIER, FREDERIK
Modellierung der Inversen Kapazitätsbestimmung für Eisenbahnstrecken und -knoten.
Bachelorarbeit: Abteilung Eisenbahnwesen, Karlsruhe Institut für Technologie, 2012
- [30] EASA, S.M.
Selection of Roadway Grades that Minimize Earthwork Cost Using Linear Programming
Transportation Research Part A, V.22, N.2, 1988, Seite 121 bis 136
- [31] EISENBAHN-BAU- UND BETRIEBSORDNUNG (EBO)
vom 8. Mai 1967, zuletzt geändert 19.7.2016
- [32] EICHENBERGER, PETER
Kapazitätssteigerung durch ETCS
SIGNAL+DRAHT, 03/2007, Seite 6 bis 14
- [33] ESCHLBECK, RAINER
Fahren auf elektronische Sich mit ETCS Level 2
SIGNAL+DRAHT, 03/2016, Seite 36 bis 39
- [34] FENDRICH, LOTHAR; FENGLER, WOLFGANG (Hrsg.)
Handbuch Eisenbahninfrastruktur
2. neu bearbeitete Auflage, 2013
- [35] FERCHLAND, CHRISTIAN; KÖRNER, TOBIAS
Analytische Verfahren der Eisenbahnbetriebswissenschaft.
Eisenbahntechnische Rundschau, 2004, Seite 499 bis 505
- [36] FÖRDERKREIS DES VERBANDES DEUTSCHER VERKEHRSUNTERNEHMEN
Zehn Jahre Bahnreform in Deutschland Erfahrungen - Bewertungen – Perspektiven
Jahrbuch des Bahnwesens Nah- und Fernverkehr (Band 53)
Eurailpress, 2004/2005
- [37] FORSCHUNGS INFORMATION SYSTEM
verfügbar unter <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/438532/>,
Änderungsdatum: 23.09.2014, aufgerufen am 01.03.2021
- [38] YANG, CHANGXIU; LIU, LI; WANG, CHANGLIN
Optimization of high-speed curve base on Genetic Algorithm
Railway Computer Appplictiaon, 2012, Vol.21
- [39] GILL, D.C.; GOODMAN, C.J.
Computer-based optimisation techniques for mass transit railway signalling design
IEEE Proc. B Electric Power Appl. 139, 1992, Seite 261 bis 275
- [40] GLOSSAR DER SYSTEMTECHNIK DES SCHIENENVERKEHRS
verfügbar unter <http://www.joernpachl.de/glossar.htm#F>, aufgerufen am 15.10.2020
- [41] GRIMES, G.A.; BARKAN C.P.L
Cost-effectiveness of railway infrastructure renewal maintenance
J. Transport. Eng. 132, 2006, Seite 601 bis 608
- [42] HARTMANN, ANDREAS
Inverse Kapazitätsermittlung – Entwicklung eines Verfahrens für die freie Strecke
Diplomarbeit: Abteilung Eisenbahnwesen, Universität Karlsruhe (TH), 2007

- [43] HAIN, WERNER
Linienzugbeeinflussung (LZB), kein Buch mit sieben Siegeln
Bahnpraxis B, 11/2007
- [44] HAUPTMANN, DIRK
Automatische und diskriminierungsfreie Ermittlung von Fahrplantrassen in beliebig großen
Netzen spurgeführter Verkehrssysteme
Dissertation: Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie, Universität Hannover, 2000
- [45] HELMERT, F.R.
Die Übergangscurven für Eisenbahn-Geleise (Aachen)
J.A., Mayer 1872
- [46] HEINZE, PETER
Technische Mechanik III Kinematik und Kinetik
Hochschule Wismar FB MVU, 2010
- [47] HENNING, EGGERS
Der lange Weg zum VDE 8. Teil 2: Neubaustrecke mit in Beton gegossenen Defiziten
Bahn-Report, 2/2018, Seite 78 bis 81
- [48] HOHNECKER, EBERHARD
Zukunftssichere Trassierung von Eisenbahn-Hochgeschwindigkeitsstrecken
Dissertation: Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität Stuttgart,
1993
- [49] HOHNECKER, EBERHARD
Leistungsfähigkeit für Neu- Aus- Umbaustrecken vs. Bestandsstrecken
Auszug aus der Stellungnahme von Hohnecker-Consult zu S 21, PFA 1.3b, 2021
- [50] HOHNECKER, EBERHARD
Spurgeführte Transportsysteme-Technische Gestaltung und Komponenten
Lehrstuhl Eisenbahnwesen, Karlsruhe Institut für Technologie, WS 2017/18
- [51] HOHNECKER, EBERHARD
Anlagen und Fahrzeug
Lehrstuhl Eisenbahnwesen, Karlsruhe Institut für Technologie, SS 2017
- [52] HOHNECKER, EBERHARD
Spurgeführte Transportsysteme-Betriebe
Lehrstuhl Eisenbahnwesen, Karlsruhe Institut für Technologie, SS 2017
- [53] HOWARD, B. E.; BRAMNICK, Z.; SHAW, J. F. B.
Optimum curvature principle in highway routing
Journal of the Highway Division, ASCE, 94 (HW1), 1968, Seite 61 bis 82
- [54] HOCHGESCHWINDIGKEITSZÜGE
verfügbar unter <https://www.hochgeschwindigkeitszuege.com/deutschland/ice-4.php?vorgaengerdir=deutschland>, aufgerufen am 15.10.2022
- [55] HUERLIMANN G.
Die Eisenbahn der Zukunft, Modernisierung, Automatisierung und Schnellverkehr bei den
SBB im Kontext von Krisen und Wandel (1965-2000)
Dissertation: Fakultät für Bau, Umwelt und Geomatik, ETH Zürich, 2006
- [56] IHME, JOACHIM
Schienenfahrzeugtechnik
Springer Vieweg, 2. Auflage, 2019
- [57] INITIATIVE DEUTSCHLANDTAKT
verfügbar unter <http://www.deutschland-takt.de>, aufgerufen am 01.03.2021

- [58] INTRAPLAN CONSULT GMBH
Standardisierte Bewertung von Verkehrsweeinvestitionen im schienengebundenen öffentlichen Personennahverkehr: Version 2016
München: ITP Intraplan Consult GmbH
- [59] JANECEK, D.; KUCKELBERG, J.; NIEßEN, N.
Kapazitätsermittlung von Eisenbahnknoten und -strecken
Eisenbahntechnische Rundschau, 2012, Seite 30 bis 36
- [60] KE B.R.; CHEN N.
Signaling blocklayout and strategy of train operation for saving energy in mass rapid transit systems
IEE Proc. Electr. Power Appl. 152, 2005, Seite 129 bis 140
- [61] KETTNER, MICHAEL
Netzevaluation und Engpassbehandlung mit makroskopischen Modellen des Eisenbahnbetriebs
Dissertation: Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie, Universität Hannover, 2005
- [62] KHMELNITSKY, E.
On an optimal control problem of train operation
IEEE Transactions on Automatic Control, V. 45, 2000, Seite 1257 bis 1266
- [63] KIEFFER, E.; ERNST, J.; JASPER-OTTENHUS, C.
Das Bahnsteighöhenkonzept der DB AG
ETR, Mai 2014, Nr. 5, Seite 49 bis 42
- [64] KLEIN, RUDOLF
Der Übergangsbogen mit sinusförmiger Überhöhungsrampe
Gleistechnik und Fahrbahnbau 13(23/24), 1937, Seite 224 bis 227
- [65] KRUEGER, HARALD
Parametric modeling in rail capacity planning
WSC 1999: Simulation – a bridge to the future, V. 2, 1999, Seite 1194 bis 1200
- [66] KÜMMLING, MICHAEL
Bahnsystemkolloquium: Mehr Leistungsfähigkeit mit Digitaler LST – aber wie?
Praxisbeispiele aus dem Digitalen Knoten Stuttgart
DB Projekt Stuttgart-Ulm GmbH, 17.12.2020
- [67] LAI YUNGCHENG; BARKAN, CHRISTOPHER
Enhanced parametric railway capacity evaluation tool
Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Jan. 2009, Seite 33 bis 40
- [68] LANG, MARKUS; FRASE, NILS
Regionalzug-Verkehr zwischen Bayerischem Untermain und Rhein-Main,
Planungen und Konzepte der BEG, 2016
- [69] LI, W.; PU, H.; SCHONFELD, P.; ZHANG, H.; ZHENG, X.
Methodology for optimizing constrained 3-dimensional railway alignments in mountainous terrain
Transportation Research Part C Emerging Technologies, 68, 2016, Seite 549 bis 565
- [70] LIANG, ZHENGXIAN
Entwicklung netzbezogener Dispositionsalgorithmen im Rahmen der "Inversen Kapazitätsberechnung spurgeführter Systeme (C⁻¹)
Dissertation: Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften, Karlsruhe Institut für Technologie, 2021

- [71] LINDER, ULRICH
Optimierung von Fahrweisen im spurgeführten Verkehr und deren Umsetzung
Dissertation: Fakultät für Verkehrs- und Maschinensysteme, TU Berlin, 2004
- [72] LIU, HAIDONG
Optimization of Railway Section Signaling Layout Based on Quasi-Moving Block
J Transpt Sys Eng & IT, 11(4), 2011, Seite 103 bis 109
- [73] LIU, JIANFENG; MAO, BAOHUA
Optimization of Signaling Layout in Automatic Block Section with Genetic Algorithms
Journal of the China Railway Society, Vol.28, 2006, Seite 54 bis 59
- [74] LU, S.; WANG, M.; WESTON P.; CHEN, S.; YANG, J.
Partial Train Speed Trajectory Optimization Using Mixed-Integer Linear Programming
IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, Seite 2911 bis 2920
- [75] MAO, BAOHAU; LIU, JIANFENG; DING, YONG; LIU, HAIDONG; HO, TIN KIN
Signaling Layout for Fixed-block Railway Lines with Real-coded Genetic Algorithms
HKIE Transactions, 2013, Seite 35 bis 40.
- [76] MATTHEWS, VOLKER
Bahnbau, 8. Auflage, 2011
- [77] MEIRICH, CHRISTIAN
Berechnung und Bewertung der Gesamtleistungsfähigkeit von Eisenbahnnetzen
Dissertation: Fakultät für Bauingenieurwesen, RWTH Aachen, 2017
- [78] MENIUS, REINHARD; MATTHEWS, VOLKER
Bahnbau und Bahninfrastruktur: Ein Leitfaden zu bahnbezogenen Infrastrukturthemen
9. Auflage, 2017
- [79] MESSNER, MELANIE
Berechnung des Energieverbrauchs für Triebfahrzeuge
Masterarbeit: Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft, TU Graz, 2014
- [80] MORTON, DAVID; THEEG, GREGOR; BÄHR, MAIK; DETERING, ROLF
Optimierung der Zugfolgezeit mittels ETCS und ATO
SIGNAL+DRAHT, 10/ 2014, Seite 16 bis 19
- [81] MUTSCHINK, KARSTEN; UHLMANN, MATTHIAS
Bemessung komplexer Eisenbahninfrastruktur – Die konstruktive Methode
Eisenbahntechnische Rundschau 7+8/2004, Seite 506 bis 515
- [82] NÖRDLING, WILHELM
Ueber die Vermittlung der Gefälle, sowie der geraden und gekrümmten Strecken auf Eisenbahn.
Auszug aus dem Protokoll der Sitzung des Ingenieur-Vereins zu Paris vom 5. April 1867
- [83] NOTTBECK, ALEXANDER
Untersuchungen zu Auswirkungen von Geschwindigkeitserhöhungen auf Bahnstrecken im Bestand
Dissertation: Ingenieur fakultät Bau, Geo, Umwelt, Technische Universität München, 2016
- [84] PACHL, JÖRN
Systemtechnik des Schienenverkehrs – Bahnbetrieb planen, steuern und sichern
6. überarbeitete Auflage, 2011
- [85] PACHL, JÖRN
railway timetable & traffic: analysis – modelling – simulation
2nd edition, Eurailpress 2014

- [86] PALMER, MIKE
The Jubilee Line Upgrade
London Underground Railway Society, 13. Oktober 2009
- [87] PAN, CHENG
Research on Application of Genetic Algorithm and Multi-Objective Decision Method in the Overall Optimization of Railway Route
Masterarbeit: Institut für Eisenbahn- und Straßenwesen, Central South University, 2007
- [88] PHYSIK FÜR ALLE
Trajektorie (Physik)
verfügbar unter [https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Trajektorie_\(Physik\)](https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Trajektorie_(Physik)),
aufgerufen am 26.01.2022
- [89] PIETZCHE, WOLFGANG
Strassenplanung. 6. Neubearb. und erw. Aufl.
Düsseldorf: Werner, 2000
- [90] POTTHOFF, GERHART
Die Bedienungstheorie im Verkehrswesen
Transpress Verlag Berlin, 1969
- [91] PUNZENGRUBER, GERALD
Überleitstellen im Netz der ÖBB
Diplomarbeit: Bahntechnologie und Mobilität, Fachhochschule St. Pölten 2019
- [92] PRIEMUS, HUGO
Development and design of large infrastructure projects disregarded alternatives and issues of spatial planning
Environ. Plann. B 34 (4), 2007, Seite 626 bis 644.
- [93] RADTKE, A.
EDV-Verfahren zur Modellierung des Eisenbahnbetriebs
Hannover, Hamburg: Eurailpress, 2005
- [94] REVELLE, C.S.; WHITLATCH, E.; WRIGHT, J.
Civil and Environmental Systems Engineering
Prentice Hall, New Jersey, 1997
- [95] REINHART, PETER
Auf dem Weg zum Digitalen Knoten Stuttgart – Ein Blick in die Werkstatt
DB Projekt Stuttgart–Ulm GmbH | Stuttgart | 18.11.2019
- [96] RICHTLINIE 301 DER DB AG
Signalbuch, gültig ab 10.12. 2017
- [97] RICHTLINIE 402 DER DB AG
Trassenmanagement, gültig ab 15.12. 2019
- [98] RICHTLINIE 405 DER DB AG
Fahrwegkapazität, gültig ab 1.1. 2008
- [99] RICHTLINIE 408 DER DB AG
Fahrdienstvorschrift, gültig ab 13.12. 2015
- [100] RICHTLINIE 413 DER DB AG
Infrastruktur Gestalten, gültig ab 01.08.2009
- [101] RICHTLINIE 438 DER DB AG
Fahrdienstvorschrift; FV-NE, gültig ab 13.12.2020

- [102] RICHTLINIE 483.0202 DER DB AG
Zugbeeinflussungsanlagen bedienen, gültig ab 15.04.2009
- [103] RICHTLINIE 800.0110 DER DB AG
Linienführung, gültig ab 16.12.2013
- [104] RICHTLINIE 800.0120 DER DB AG
Linienführung, gültig ab 16.12.2013
- [105] SBB
Geschwindigkeitsüberwachung im Level 2
verfügbar unter <https://elearning.sbb.ch/IT-SCG-KB/etcs/pages/16.html>, aufgerufen am 29.08.2022
- [106] SCHIEMANN, WOLFGANG
Schienenverkehrstechnik: Grundlagen der Gleistrassierung
1. Auflagen, 2002
- [107] SCHMIDT, CHRISTINE
Betrag zur experimentellen Bestimmung der Wartezeitfunktion bei Leistungsuntersuchungen im spurgeführten Verkehr
Dissertation: Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften, Universität Stuttgart, 2009
- [108] SCHNIEDER, LARS
European Train Control System (ETCS): Einführung in das einheitliche europäische Zugbeeinflussungssystem
2. Auflagen, Springer Vieweg, 2021
- [109] SCHRAMM, GERHARD
Der Gleisbogen 4. Auflagen,
Otto Elsner Verlag Darmstadt, 1962
- [110] SCHUHR, PETER
Übergangsbogen für Bahnen mit hohen Fahrgeschwindigkeiten
DEUTSCHE GEODÄTISCHE KOMMISSION bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Heft Nr. 314, 2007
- [111] SCHULZ, ANDREAS
In Takt lokal und deutschlandweit? Nahverkehr im Spannungsfeld
verfügbar unter http://www.irfp.de/files/iRFP/Downloads/awt/230415_beg-schulz-vortragdeutschlandtakt.pdf, aufgerufen am 01.03.2021
- [112] SCHWANHÄÜBER, WULF
Die Bemessung der Pufferzeiten im Fahrplangefüge der Eisenbahn
Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Instituts der RWTH, 1974
- [113] SHAW, J.; HOWARD, B. E.
Expressway route optimization by OCP
Journal of Transportation Engineering, 108(3), 1982, Seite 227 bis 243
- [114] SIEFER, T., HEMPE, T.
Erneuerungsbedarf der norddeutschen Eisenbahninfrastruktur
Untersuchung durchgeführt im Auftrag des Verbandes der Bauindustrie für Niedersachsen; finanziert durch die Stiftung der Niedersächsischen Bauindustrie,
verfügbar unter https://www.bauindustrie-nord.de/system/files/stiftungsprojekte/downloads/Erneuerungsbedarf%20der%20norddeutschen%20Eisenbahninfrastruktur_Professor%20Siefer.pdf, aufgerufen am 19.04.2021

- [115] SPIESS, PETER
 Fahrdynamik des Schienenverkehrs
 DB Systemtechnik, 2005
- [116] SIMENS
 Desiro HC RRX elektrische Triebzüge und Instandhaltung für den Rhein-Ruhr-Express
 Simens.com/mobility, 2018
- [117] SPORI, BRUNO; EICHENBERGER, PETER
 Optimierte Signalisierungskonzepte zur Kapazitätssteigerung mit ETCS Level 2
 SIGNAL+DRAHT, 09/2013, Seite 31 bis 36
- [118] TRIETSCH, D.
 A family of methods for preliminary highway alignment
 Transportation Science, 21 (1), 1987, Seite 17 bis 25
- [119] TSI INF CS
 Technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Infrastruktur“ des
 konventionellen Eisenbahnsystems
 Als Abhang zur Richtlinie 2008/57/EG, 2011
- [120] TSI INF HGV
 Interoperabilität des Transeuropäischen Hochgeschwindigkeitsbahnsystems - Technische
 Spezifikation für die Interoperabilität Teilsystems „Infrastruktur“
 96/48/EG, 2008
- [121] TSI INF
 Technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Infrastruktur“ des
 Eisenbahnsystems in der Europäischen Union
 2008/57/EG, 2014
- [122] TZSCHASCHEL, JAN
 Modellierung der Infrastruktur- und Fahrplanbestimmung auf Grundlage eines
 Fahrplankonzeptes
 Diplomarbeit: Abteilung Eisenbahnwesen, Karlsruhe Institut für Technologie, 2013
- [123] UIC-KODEX 406 E
 Kapazität
 1. Ausgabe 2004 (deutsche Fassung)
- [124] UIC 505-1
 Railway transport stock – Rolling stock construction gauge
 10th edition, 2006
- [125] UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY
 The Terra Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)
 Global Digital Elevation Model (GDEM)
 verfügbar unter <https://lpdaac.usgs.gov/products/astgtmv003/>
- [126] VEIT, PETER
 Wirtschaftlich optimaler Abstand von Überleitstellen
 ZEVrail, 3/2006, Seite 116 bis 121
- [127] VERBAND DER BAHNINDUSTRIE IN DEUTSCHLAND E.V.
 Die Zukunft der Schiene soll rasch beginnen: Aus- und Umrüstung von
 Schienenfahrzeugen mit ETCS-Bordgeräten
- [128] VIAREGG-RÖSSLER GMBH
 Bestandsorientierter Aus- und Neubau der Bahnstrecke Rosenheim-Kufstein
 München, 26.07.2019

- [129] VIGNALI, V.; CUPPI, F.; LANTIERI, C.; DIMOLA, N.; GALASSO, T.; RAPAGNÀ, L.
A methodology for the design of sections block length on ETCS L2 railway networks
Journal of Rail Transport Planning & Management, 13, 2020
- [130] VOJACEK, L.
Ueberhöhung der Geleise in Curven
Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure, 12(10), 1868, Seite 617 bis 624
- [131] WAKOB, H.
Ableitung eines generellen Wartemodells zur Ermittlung der planmäßigen Wartezeiten im Eisenbahnbetrieb unter besonderer Berücksichtigung der Aspekte Leistungsfähigkeit und Anlagenbelastung
Dissertation: Fakultät für Bauingenieurwesen, RWTH Aachen Universität, 1985
- [132] WARNINGHOFF, CARSTEN-RAINER; FERCHLAND, CHRISTIAN
Nutzung von Simulationen zur Unterstützung der betrieblichen Infrastrukturplanung
Eisenbahntechnische Rundschau 7+8/2004, Seite 490 bis 498
- [133] WEGEL, HELMUT
Der Hochleistungsblock mit linienförmiger Zugbeeinflussung (HBL)
Die Deutsche Bahn 7/1992, Seite 735 bis 739
- [134] WEI, SUN; DAN NEWTION, CIMEON COX
Signalling the Layout – Automatic Design of the Optimum ETCS L2 Track Sections
EWEC2019: World Engineers Convention, 20-22 November 2019, Seite 217 bis 231
- [135] WEIGAND, WERNER
Dimensionierung der Eisenbahninfrastruktur Zusammenfassung der eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Arbeitsgebiete zu einem „Kompetenzzentrum“
Eisenbahn-Ingenieur 1/2005, Seite 8 bis 12
- [136] WEIGEND, MANFRED
Linienführung und Gleisplangestaltung: die Trasse der Eisenbahn in Grund- und Aufriss
Eurailpress, 2004
- [137] WEIßER, DIRK
Weiterentwicklung eines Komfortkriteriums für Personenzüge
Diplomarbeit: Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften, Universität Karlsruhe (TH), 1998
- [138] WENDE, DIETRICH
Fahrodynamik des Schienenverkehrs
Studium, 2003
- [139] WEYMANN, FRÉDÉRIC; NIEßEN, NILS
Unterstützung der Fahrplanfeinkonstruktion mit Optimierungsverfahren
Eisenbahntechnische Rundschau 03 2015, Seite 16 bis 19
- [140] WIECZOREK, TOBIAS
Inverse Kapazitätsbestimmung für die Eisenbahn-Infrastruktur.
Dissertation: Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften, Universität Karlsruhe (TH), 2006
- [141] WIKIPEDIA
Freiheitsgrad
verfügbar unter <https://de.wikipedia.org/wiki/Freiheitsgrad>, aufgerufen am 11.10.2021
- [142] WIKIPEDIA
Aufzählungstyp
verfügbar unter <https://de.wikipedia.org/wiki/Aufz%C3%A4hlungstyp>, aufgerufen am 24.01.2022

- [143] WIKIPEDIA
Bremsen (Eisenbahn)
verfügbar unter [https://de.wikipedia.org/wiki/Bremse_\(Eisenbahn\)#Hydrodynamische_Bremse](https://de.wikipedia.org/wiki/Bremse_(Eisenbahn)#Hydrodynamische_Bremse), aufgerufen am 09.12.2021
- [144] WIKIPEDIA
Wiener Bogen
verfügbar unter https://de.wikipedia.org/wiki/Wiener_Bogen, aufgerufen am 27.01.2022
- [145] WIKIPEDIA
Linienförmige Zugbeeinflussung
verfügbar unter https://de.wikipedia.org/wiki/Linienf%C3%B6rmige_Zugbeeinflussung, aufgerufen am 25.05.2022
- [146] WIKIPEDIA
Moving Block
verfügbar unter https://en.wikipedia.org/wiki/Moving_block, aufgerufen am 26.05.2022
- [147] WIKIPEDIA
Punktförmige Zugbeeinflussung
verfügbar unter https://de.wikipedia.org/wiki/Punkt%C3%B6rmige_Zugbeeinflussung, aufgerufen am 01.07.2022
- [148] WIKIPEDIA
ETCS-Bremskurven
verfügbar unter <https://de.wikipedia.org/wiki/ETCS-Bremskurven>, aufgerufen am 07.07.2022
- [149] WIKIPEDIA
FRMCS
verfügbar unter <https://de.wikipedia.org/wiki/FRMCS>, aufgerufen am 12.08.2022
- [150] WIKIPEDIA
Trip (ETCS)
verfügbar unter [https://de.wikipedia.org/wiki/Trip_\(ETCS\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Trip_(ETCS)), aufgerufen am 29.08.2022
- [151] WIKIPEDIA
Digitales Höhenmodell
verfügbar unter https://de.wikipedia.org/wiki/Digitales_H%C3%B6henmodell, aufgerufen am 12.10.2022
- [152] WIKIPEDIA
Triangulated Irregular Network
verfügbar unter https://en.wikipedia.org/wiki/Triangulated_irregular_network, aufgerufen am 12.10.2022
- [153] WIKIPEDIA
ArcGIS
verfügbar unter <https://de.wikipedia.org/wiki/ArcGIS>, aufgerufen am 12.10.2022
- [154] WINK, CHRISTOPHER
13.759 km in 8.921 Minuten - Das Jahr 2021 im Bahnfahrer Rückblick - Rückblick Schienenverkehr Archiv, 01/2022
- [155] WIRTH, MAXIMILIAN; SCHÖBEL, ANDREAS
Mindestzugfolgezeiten bei ETCS Level 2 und Level 3 auf der Wiener S-Bahn-Stammstrecke
SIGNAL+DRAHT, 4/ 2020, Seite 21 bis 26

[156] ZHANG, WEIDONG

Hybrid algorithm based on genetic algorithm and dynamic programming railway profile optimization design.

Masterarbeit: Institut für Eisenbahn- und Straßenwesen, Lanzhou Jiaotong University, 2015

Anhang

Tabelle 46: Grenzwerte für die Trassierungs- und Gleisparameter für $\max V = 500 \text{ km/h}$

Parameter	Grenzwerte
minimaler Bogenradius $\min r$ [m]	8.200 (8.195) ¹²⁶
Seitenbeschleunigung a_q [m/sec ²]	1,05
maximale Überhöhung $\max u$ [mm]	200
maximaler Überhöhungsfehlbetrag $\max u_f$ [mm]	160
Unzufriedenheitsgrad $U_{R_{x,y}}$ [%]	15 (12,12) ¹²⁶
Unzufriedenheitsgrad $U_{\ddot{U}_{x,y}}$ [%]	15 (11,42) ¹²⁶
maximale Neigung $\max I$ [‰]	40
minimaler Ausrundungsradius $\min r_a$ [m]	12.700 (12.696) ¹²⁶
Unzufriedenheitsgrad U_{R_z} [%]	15 (14,6) ¹²⁶

Tabelle 47: IC-Fahrzeit (ohne Regel- und Bauzuschläge) zwischen Karlsruhe und Stuttgart

Fahrtrichtung	$\max v$ [m/sec]	Fahrzeit t [sec]	Fahrtrichtung	$\max v$ [m/sec]	Fahrzeit t [sec]
Karlsruhe-Pforzheim	51	748,12	Stuttgart-Vaihingen (Enz)	51	689,21
Pforzheim - Vaihingen (Enz)	50	532,43	Vaihingen (Enz)-Pforzheim	50	549,78
Vaihingen (Enz)-Stuttgart	51	719,40	Pforzheim - Karlsruhe	49	767,23
Haltezeit an den Zwischenbahnhöfen: 2 min					

¹²⁶ exakte Rechenwerte im Klammer

Tabelle 48: RE-Fahrzeit (ohne Regel- und Bauzuschläge) zwischen Karlsruhe und Stuttgart

Fahrtrichtung	max v [m/sec]	Fahrzeit t [sec]	Fahrtrichtung	max v [m/sec]	Fahrzeit t [sec]
Karlsruhe-Pforzheim	36	848,76	Stuttgart-Vaihingen (Enz)	35	817,0
Pforzheim - Mühlacke	33	482,9	Vaihingen (Enz)-Mühlacker	34	387,29
Mühlacker-Vaihingen (Enz)	33	373,92	Mühlacker-Pforzheim	33	475,31
Vaihingen (Enz)-Stuttgart	35	816,12	Pforzheim - Karlsruhe	36	849,6

Haltezeit am Zwischenbahnhöfen: 2 min

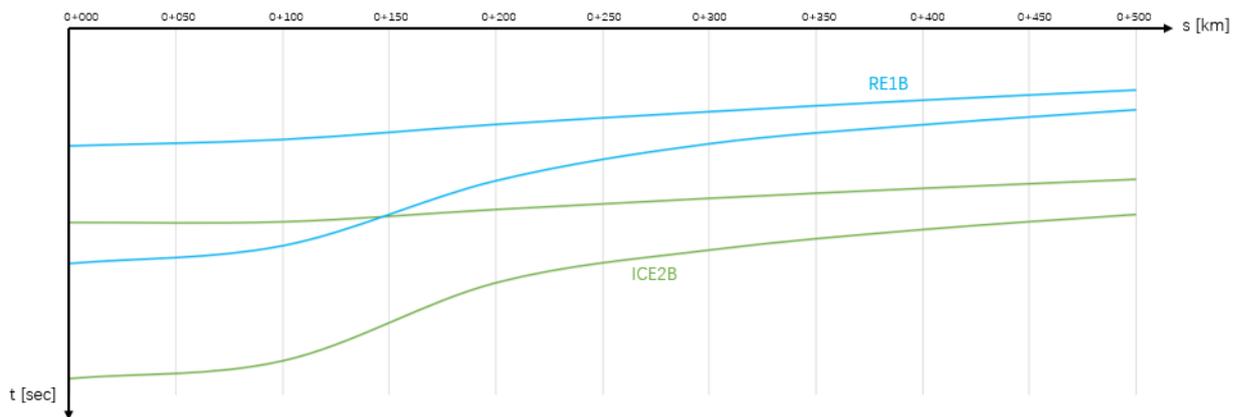


Abbildung 116: Belegungsbänder von ICE2B und RE1B