



NITOB - Nachhaltige intermodale Transportketten durch Optimierung von Bahnabläufen

Alexandra Anderluh, Fabián Figueroa-Valle, Philipp Graf, Frank Michelberger, Markus Prem, Adrian Wagner (FH St. Pölten)
Hrvoje Haramina (FPZ Zagreb)

28.07.2023

Inhalt

Abbildungsverzeichnis	iii
Tabellenverzeichnis	v
Abkürzungsverzeichnis	vi
Abstract	vii
1 Einleitung.....	1
2 Status Quo zu Optimierungspotentialen im intermodalen Güterverkehr	3
2.1 Literaturrecherche	3
2.1.1 Kategorie Terminal	4
2.1.2 Kategorie Netzwerkstruktur	7
2.1.3 Kategorie Routing.....	10
2.1.4 Kategorie Verschiebebahnhof	13
2.1.5 Kategorie Digitalisierung/Automatisierung	15
2.2 Expert*inneninterviews	20
2.2.1 Methodik und Interviewpartner*innen	20
2.2.2 Kernaussagen aus den Interviews	20
3 Bewertung der Optimierungspotentiale.....	25
3.1 Gegenüberstellung der Optimierungspotentiale.....	25
3.2 Bewertung und Priorisierung der Optimierungspotentiale.....	26
4 Infrastrukturanalyse und Betriebssimulation	28
4.1 Betriebssimulation mittels OpenTrack.....	28
4.1.1 Inputdaten.....	30
4.1.2 Infrastrukturdaten	30
4.1.3 Fahrzeugdaten	31
4.1.4 Fahrplandaten.....	32
4.2 Grundlagen und Konzeption.....	34
4.2.1 Grobcharakteristik der Infrastruktur	35
4.2.2 Vorgesehener Fahrplan/Taktarten	35
4.2.3 Referenzstrecken	37
4.2.4 Streckenparameter	37
4.2.5 Streckenkonzeption	39
4.2.6 Verbindungsstrecke ST/DT-Linie	46
4.3 Fahrplanvarianten.....	47
4.3.1 Fahrplanerstellung.....	47
4.3.2 Problemanalyse.....	48
4.3.3 Fazit des Fahrplans	50
4.4 Szenarien.....	50

4.4.1	Einbindung in den Knotenbahnhof A2.....	54
4.4.2	Blockabschnitte auf der ST-Strecke	55
4.4.3	Einschränkungen des Güterverkehrs durch den Personenverkehr	56
5	Conclusio.....	59
	Literaturverzeichnis	60
	Anhang A – Taktarten und Blocklängen.....	66
	Anhang B – Referenzbahnhöfe	67
	Anhang C – Details der ST-Line	74
	Anhang D – Details der DT-Line	78
	Anhang E – Ergebnisse aus den Szenarios	81

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kategorisierung der in der ausgewählten Literatur behandelten Themen.....	4
Abbildung 2: Kategorisierung der Aussagen aus den Expert*inneninterviews	21
Abbildung 3: Aufwand-Nutzen Diagramm der Optimierungspotentiale.....	27
Abbildung 4: Detaillierungsgrad bei der Betrachtung von Modellen	29
Abbildung 5: Hauptbestandteile einer eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Simulation	29
Abbildung 6: Arbeitsoberfläche von RailSys	30
Abbildung 7: Z-V und B-V Diagramm einer ÖBB 1016/1116	31
Abbildung 8: Beispiel für einen Tabellenfahrplan	33
Abbildung 9: Beispiel für einen Bildfahrplan	34
Abbildung 10: Linientaktkarte Personenverkehr	36
Abbildung 11: Schematische Darstellung der ST-Line	40
Abbildung 12: ST-Line (OpenTrack)	41
Abbildung 13: Mögliche Konflikte auf ST-Line	42
Abbildung 14: Slow Speed Zones (OpenTrack).....	42
Abbildung 15: Schematische Darstellung der DT-Line.....	43
Abbildung 16: DT-Line (OpenTrack).....	44
Abbildung 17: Schematische Darstellung der Verknüpfung ST/ DT-Line	46
Abbildung 18: Verknüpfung ST/DT-Line (OpenTrack)	47
Abbildung 19: Ausfahrbereich Bahnhof A2	55
Abbildung 20: Abschnitte ST-Line	56
Abbildung 21: Relative Leistungsaufnahme/Distanz (kW - km) und Energieaufnahme/Distanz (MJ - km) für Basis, Szenario 1 und Szenario 2.....	58
Abbildung 22: Gleisplan A-Bahnhof ST-Line (Referenz Bhf. Jesenice, vereinfacht).....	67
Abbildung 23: Strecke 222 Villach – Jesenice	67
Abbildung 24: Gleisplan A-Bahnhof DT-Line (Referenz Bhf. Brenner, vereinfacht).....	68
Abbildung 25: Strecke 302 Innsbruck – Brenner	68
Abbildung 26: Strecke 302 Wörgl – Kufstein	69
Abbildung 27: Gleisplan B- Bahnhof ST-Line (Referenz Bhf. Kirchdorf an der Krems, vereinfacht)	69
Abbildung 28: Ausschnitt Strecke 204 Linz – Selzthal mit Bhf. Kirchdorf a. d. Krems	70
Abbildung 29: Gleisplan B-Bahnhof DT-Line (Referenz Bhf. Parndorf, vereinfacht).....	70
Abbildung 30: Ausschnitt Strecke 118 Wien – Hegyeshalom mit Bhf. Parndorf	71
Abbildung 31: Gleisplan C-Bahnhof ST-Line (Referenz Bhf. Hinterstoder, vereinfacht)	71
Abbildung 32: Ausschnitt Strecke 204 Linz - Selzthal mit Bhf. Hinterstoder	72
Abbildung 33: Gleisplan C- Bahnhof DT-Line (Referenz Bhf. Riedau, vereinfacht).....	72
Abbildung 34: Ausschnitt Strecke 205 Wels – Passau mit Bhf. Riedau.....	73
Abbildung 35: <i>Reserve with previous route</i> in OpenTrack	75
Abbildung 36: Geschwindigkeitsprofil ST-Line (OpenTrack).....	76
Abbildung 37: Neigungsprofil ST-Line (OpenTrack).....	77

Abbildung 38: Geschwindigkeitsprofil DT-Line (OpenTrack).....	79
Abbildung 39: Neigungsprofil DT-Line (OpenTrack)	80
Abbildung 40: Beschleunigung Weg Diagramm REX 4031.....	81
Abbildung 41: Weg-Geschwindigkeitsdiagramm REX 4031.....	81
Abbildung 42: Ausschnitt Bildfahrplan zwischen den Bahnhöfen	82
Abbildung 43: Ausschnitt simulierter Gesamtfahrplan.....	82
Abbildung 44: Geschwindigkeit/Distanz (km/h – km) Basis Szenario.....	84
Abbildung 45: Beschleunigung/Distanz (km/h ² – km) Basis Szenario	85
Abbildung 46: Geschwindigkeit/Distanz (km/h – km) Szenario 1	85
Abbildung 47: Beschleunigung/Distanz (km/h ² – km) Szenario 1	86
Abbildung 48: Geschwindigkeit/Distanz (km/h – km) Szenario 1	86
Abbildung 49: Beschleunigung/Distanz (km/h ² – km) Szenario 1	87
Abbildung 50: Geschwindigkeit/Distanz (km/h – km) Basisszenario (Güterzug kurz).....	87
Abbildung 51: Beschleunigung/Distanz (km/h ² – km) Szenario 1 (Güterzug kurz)	88
Abbildung 52: Geschwindigkeit/Distanz (km/h – km) Szenario 1 (Güterzug kurz).....	88
Abbildung 53: Beschleunigung/Distanz (km/h ² – km) Szenario 1 (Güterzug kurz)	89
Abbildung 54: Geschwindigkeit/Distanz (km/h – km) Szenario 2 (Güterzug kurz).....	89
Abbildung 55: Beschleunigung/Distanz (km/h ² – km) Szenario 2 (Güterzug kurz)	90
Abbildung 56: Leistungsaufnahme/Distanz (kW – km) alle Szenarien	90
Abbildung 57: Energieaufnahme/Distanz (MJ – km) alle Szenarien.....	91
Abbildung 58: Leistungsaufnahme/Distanz (kW – km) Basis & Szenario 1 (Güterzug kurz) .	91
Abbildung 59: Energieaufnahme/Distanz (kW – km) Basis & Szenario 2 (Güterzug kurz)	92

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der in der Literaturrecherche berücksichtigten Werke	17
Tabelle 2: Gegenüberstellung der Optimierungspotentiale	25
Tabelle 3: Abstände Bahnhofskategorien	39
Tabelle 4: Beschreibung Güterzug	52
Tabelle 5: Beschreibung Güterzug kurz.....	53
Tabelle 6: Beschreibung Schnellzug.....	53
Tabelle 7: Beschreibung Regionalzug	54
Tabelle 8: Annahme Abfahrtszeiten.....	56
Tabelle 9: Fahrzeitberechnungen des REX 4030 sowie REX 4031	56
Tabelle 10: Taktarten	66
Tabelle 11: Blocklänge (freie Strecke)	66
Tabelle 12: Blocklänge (Betriebsstellengrenzen)	66
Tabelle 13: Bahnstabsabstände ST-Line.....	74
Tabelle 14: Bahnstabsabstände DT-Line	78
Tabelle 15: Fahrzeitberechnungen Güterzug Basisszenario, Szenario 1 & Szenario2.....	83
Tabelle 16: Fahrzeitberechnung Güterzug kurz.....	84
Tabelle 17: Energiebedarf langer & kurzer Güterzug alle Szenarien.....	92

Abkürzungsverzeichnis

AFTS.....	Automated Freight Transport Systems
Bsb.....	Betriebsstellenbeschreibung
DAK.....	Digitale Automatische Kupplung
DB.....	Deutsche Bahn
DT-Line	Double Track Line
eFTI.....	elektronische Frachtbeförderungsinformation
ep-Bremse.....	elektropneumatische Bremse
ETCS	European Train Control System
EU.....	Europäische Union
F&E-Projekte.....	Kooperative Forschungs- und Entwicklungsprojekte
FBS.....	Fahrplanbearbeitungssystem
ITS	Intelligent Transport Systems
LKW	Lastkraftwagen
NITOB	Nachhaltige intermodale Transportketten durch Optimierung von Bahnabläufen
ÖBB	Österreichische Bundesbahnen, Österreichische Bundesbahnen
PV.....	Personenverkehr
PZB.....	Punktförmige Zugbeeinflussung
REX.....	Regionalexpress
RFC.....	Rail Freight Corridor
ST-Line	Single Track Line
TTR	Timetable Redesign
UIC.....	Internationaler Eisenbahnverband
VLZ	Verkehrsleitzentrale
Vmax.....	Höchstgeschwindigkeit
VzG.....	Verzeichnis der örtlich zulässigen Geschwindigkeiten
Z-V Diagramm.....	Zugkraft - Geschwindigkeit Diagramm

Abstract

Angesichts der gegenwärtigen Klimasituation gilt es, vermehrt Transporte auf die Schiene zu verlagern, um die verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen zu reduzieren, denn ein Tonnenkilometer auf der Schiene verursacht beispielsweise nur etwa 2% dieser Emissionen verglichen mit dem auf der Straße. Dies erfordert gerade im Güterverkehr flexible und optimierte Prozesse für den schienengebundenen Verkehr, damit gemeinsam mit den vor- und nachgelagerten Prozessen eine wettbewerbsfähige intermodale Transportkette ermöglicht wird. Um die Flexibilität im Schienengüterverkehr zu erhöhen, muss in erster Linie die gesamte Transportkette vom Ausgangsbahnhof bis zum Endbahnhof betrachtet werden, aber auch der dort ansetzende Vor- und Nachlauf, also eine intermodale Betrachtung. Derzeit werden Optimierungsfragestellungen in diesem Bereich meist als Einzelprobleme behandelt, die nur einen Prozessschritt umfassen. Dadurch bleiben unerwünschte Wechselwirkungen in der intermodalen Kette ebenso unberücksichtigt wie mögliche Synergieeffekte durch die Kombination mehrerer Maßnahmen.

Hier setzt das Sondierungsprojekt NITOB an, indem es die Optimierungsmöglichkeiten, die im Einzelnen schon in diversen Projekten und/oder Studien erarbeitet wurden, mit der Praxissicht durch Expert*inneninterviews abgleicht. Die Ergebnisse daraus zeigen in mehreren Punkten eine Diskrepanz zwischen Forschung und Praxiserfordernissen, geben aber nach einer strukturierten Betrachtung der einzelnen Optimierungspotentiale nach Aufwand und Nutzen eine Entscheidungsunterstützung für Eisenbahn- ebenso wie Logistikunternehmen aber auch politische Entscheidungsträger*innen, wo mit relativ geringem Aufwand großer Nutzen erzielt werden kann, wie beispielsweise im Bereich Transparenz und Verlässlichkeit. Um Kapazitätssteigerungen auf der bestehenden Infrastruktur erheben zu können, wurde ein Simulationsansatz gewählt, der klar zeigt, dass ohne Infrastrukturausbau eine signifikante Kapazitätsausweitung zur Verlagerung von Gütertransporten auf die Schiene kaum möglich ist. Mit diesen Erkenntnissen und Ergebnissen kann somit aktiv auf potentielle Partner*innen für die Beantragung eines F&E-Projekts zugegangen werden, um eine Praxisimplementierung von ausgewählten Maßnahmen vorzubereiten.

1 Einleitung

Eine der größten Herausforderungen heutzutage ist die signifikante Reduktion von Treibhausgasemissionen, um die Pariser Klimaziele zu erreichen. Das Verkehrsvolumen, das immer noch stark mit dem Wirtschaftswachstum korreliert, trägt derzeit etwa ein Viertel zu den europäischen Treibhausgasemissionen bei (EUROPEAN COMMISSION, 2022). Außerdem ist mit einem weiteren Anstieg des Güterverkehrsaufkommens in den nächsten Jahren zu rechnen, wobei der Verkehrsträger Straße überproportional zur Schiene einen Zugewinn verzeichnen wird (VCÖ, 2020). Daher hat der Verkehrssektor insgesamt ein großes Potenzial, zur Reduktion dieser Emissionen beizutragen.

Derzeit beträgt der EU-weite Modal Split des Schienengüterverkehrs 17,9%, der Beitrag zu den Treibhausgasemissionen liegt mit nur 0,4% aber deutlich darunter. Die Erhöhung des Anteils der Schiene am Modal Split ist daher ein wichtiges Mittel zur Reduktion verkehrsbedingter Treibhausgasemissionen, da ein Tonnenkilometer auf der Schiene 3,5g CO₂-Äquivalent verursacht, während dieser Wert für einen LKW bei 149,5g CO₂-Äquivalent liegt (EUROPEAN UNION, 2020; UMWELTBUNDESAMT, 2020).

Um eine deutliche Verlagerung des Güterverkehrs auf die Schiene zu erreichen, sind flexible und damit wettbewerbsoptimierte Prozesse für den Schienenverkehr erforderlich, die einerseits bahnspezifische Prozesse wie z.B. die Abläufe an Verschiebebahnhöfen betrachten, andererseits aber auch den Vor- und Nachlauf von intermodalen Transportketten mitberücksichtigen, um eine Gesamtperspektive zu schaffen (BOYSEN u. a., 2012). Eine initiale Recherche facheinschlägiger Literatur ergab, dass sich bisherige Forschung hauptsächlich auf einzelne Teilprozesse in intermodalen Transportketten fokussiert und somit die Perspektive auf das Gesamtsystem nicht ausreichend beleuchtet wird. Eine Durchsicht der FFG-Projektdatenbank¹ zeigt ein ähnliches Bild, und zwar, dass Projekte im Schienengüterverkehr zumeist einen Schwerpunkt auf spezifische Fragestellungen haben, aber eine systemische Perspektive auf die gesamte intermodale Transportkette mit Fokus Bahn fehlt.

Hier setzt das Sondierungsprojekt NITOB an. Mit der beschriebenen Gesamtbetrachtung einer Transportkette im Güterverkehr zeigt sich bereits, dass der Vor- und Nachlauf eine überproportionale Bedeutung innehat, da diese Prozesse einen erheblichen Anteil der Gesamtzeit einnehmen. Schafft man es, die gesamte Prozesskette zu optimieren, können daraus Änderungen der Wettbewerbsbedingungen folgen. Laufen die Prozesse zusätzlich auch effizienter ab, können außerdem Kapazitätssteigerungen entstehen und es ist damit möglich, mehr Gütertransporte auf den Verkehrsträger Schiene zu verlagern.

Nutzt man die freiwerdenden Zeitbestandteile als Reserve, könnte das System Bahn darüber hinaus zuverlässiger gestaltet werden und somit positive Auswirkungen auf den Vor- und Nachlauf haben, da sich die Akteure in der Transportkette an die veränderten Rahmenbedingungen anpassen können. Das Sondierungsprojekt zeigt daher Optimierungsmöglichkeiten

¹ <https://www.ffg.at/projektdatenbank>

auf und stellt deren Auswirkungen in Use Cases dar, auf deren Basis Szenarien simuliert werden können. Da die Interaktion der verschiedenen Stakeholder innerhalb der Transportkette und die Optimierung dieser ein so komplexes Themenfeld bietet, soll mit den Ansatzpunkten aus der faktenbasierten Potentialanalyse des Sondierungsprojekts die Basis geschaffen werden, in weiterer Folge an die beteiligten Akteure des Schienengüterverkehrs (Logistikdienstleister, Eisenbahnverkehrsunternehmen, Eisenbahninfrastrukturunternehmen, ...) heranzutreten und mit diesen zu erarbeiten, welche dieser Optimierungsmöglichkeiten konkret in F&E-Projekten in die Umsetzung gebracht werden können.

Zur Beantwortung der Fragestellung im Projekt wird methodisch ein dreistufiger Ansatz verfolgt

1. *Faktenbasierte Analyse intermodaler Transportketten mit Fokus auf die Bahn sowie die vor- und nachgelagerten Prozesse:* Basierend auf einer extensiven Literaturrecherche zu bereits beforschten Optimierungspotentialen werden in Expert*innengesprächen die erhobenen Schwachpunkte vertiefend erörtert bzw. ergänzt.
2. *Analyse von konkreten Optimierungsmöglichkeiten und Ermittlung von Bewertungskriterien zur Evaluierung des Optimierungspotentials:* mittels geeigneter Bewertungsansätze werden die aus dem ersten Schritt abgeleiteten Optimierungspotentiale strukturiert und priorisiert.
3. *Validierung des Potentials optimierter Prozesse anhand von Use-Cases:* Dieser Teil beinhaltet die Anwendung ausgewählter Optimierungsmöglichkeiten mit hohem Potential. Dazu werden in 2-3 Use-Cases aus dem realen Betriebsalltag die Prozessketten abgebildet und in einem iterativen Prozess die Auswirkungen mittels eines Simulationsansatzes evaluiert.

In Kapitel 2 wird die Bestandsanalyse anhand von Literaturrecherche und Expert*inneninterviews behandelt, woraus in Kapitel 3 konkrete Optimierungspotentiale abgeleitet und priorisiert werden. Kapitel 4 widmet sich den durchgeführten Simulationen während Kapitel 5 die Erkenntnisse zusammenfasst und einer kritischen Reflexion unterzieht, um daraus Ansätze für künftige F&E-Projekte abzuleiten.

2 Status Quo zu Optimierungspotentialen im intermodalen Güterverkehr

Als Basis für die weitere Arbeit gilt es in einem ersten Schritt, den aktuellen Stand im Bereich der Optimierungspotentiale in der intermodalen Logistik mit dem Hauptlauf auf der Bahn mittels Literaturrecherche, ergänzt um die Einschätzungen durch Expert*innen der Logistikbranche, zu erfassen.

2.1 Literaturrecherche

Für die Literaturrecherche wurde zu Beginn ein Pool an Schlagwörtern, welche in Kontext zum Thema stehen, sowohl in deutscher als auch in englischer Sprache erstellt. In weiterer Folge wurden mehrere Online-Datenbanken (Science Direct, SpringerLink, Google Scholar sowie ergänzend ResearchGate, IEEE Xplore und INFORMS) mit diesen Suchbegriffen auf relevante Forschungsarbeiten durchsucht.

Die gefundenen Forschungsarbeiten wurden initial anhand ihrer Keywords sowie des Abstracts auf Relevanz überprüft. In weiterer Folge wurden für die so selektierten Treffer eine fünfteilige Beurteilungsskala bezüglich der Bedeutung für die konkrete Fragestellung angewendet, welche von 1 (keine direkte Relevanz) bis 5 (sehr hohe Relevanz) reicht. Anhand dieser Skala wurden in Summe 153 Forschungsarbeiten einer genaueren Beurteilung unterzogen und anschließend kategorisiert, um im weiteren Verlauf des Projektes eine bessere Übersicht über die Ergebnisse der Literaturrecherche zu haben (siehe Abbildung 1), wobei zu berücksichtigen ist, dass manche Arbeiten mehrere Kategorien betreffen, die Zuordnung in solchen Fällen aber nur zur jeweils angesprochenen Hauptkategorie erfolgte. Anhand dieser Zuordnung werden nachfolgend die Arbeiten mit einer Relevanz ≥ 3 aufgelistet und näher besprochen.

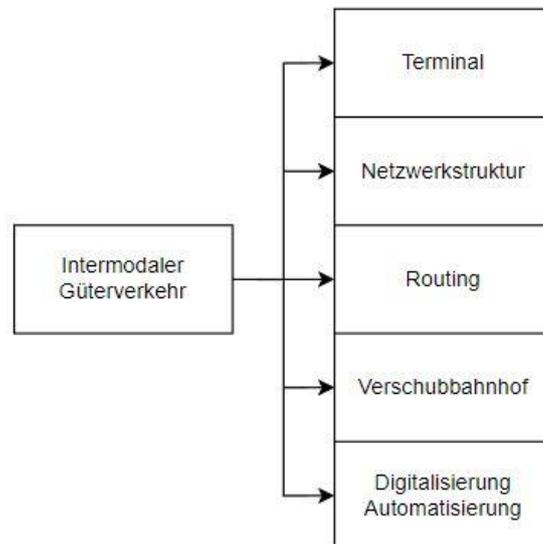


Abbildung 1: Kategorisierung der in der ausgewählten Literatur behandelten Themen

Am Ende des Kapitels in Tabelle 1 findet sich eine übersichtliche Zusammenfassung der betrachteten Literatur.

2.1.1 Kategorie Terminal

2.1.1.1 *An allocation-scheduling heuristic to manage train traffic in an intermodal terminal (MUÑUZURI u. a., 2016)*

Relevanz: 5

Durch die Entwicklung eines heuristischen Algorithmus wird eine effizientere Abwicklung der ankommenden/abgehenden Züge beziehungsweise ein optimierter Umschlag der Güter in einem intermodalen Hafenterminal angestrebt. Konkret betrifft dies die Zuordnung der Züge zu Gleisen beziehungsweise Umschlagpunkten. Es soll damit die Kapazität des Hafenterminals erhöht und gleichzeitig ein Mindestmaß an Sicherheit garantiert werden. Das Modell wurde bereits im Hafen von Sevilla erprobt.

2.1.1.2 *Assessment methods for innovative operational measures and technologies for intermodal freight terminals (RICCI u. a., 2016)*

Relevanz: 5

In dieser Arbeit werden Bewertungsmethoden und Kriterien für Optimierungsansätze in intermodalen Terminals entwickelt. Die Ansätze werden konkret in operationale und innovative

technische Entwicklungen unterschieden. Weiters werden einige dieser Ansätze anhand der zuvor definierten Key Performance Indikatoren bewertet.

2.1.1.3 New solution approaches for the train load planning problem (AMBROSINO & CABALLINI, 2019)

Relevanz: 5

Durch die Entwicklung von zwei heuristischen Ansätzen wird eine Optimierung der Zugbeladung in Containerterminals angestrebt. Konkret beinhaltet dies die Zuteilung der Container zu den Wagen sowie die Anzahl der Umschlagbewegungen. Ziel ist einerseits die Maximierung der Prioritäten der ausfahrenden Züge und andererseits die Minimierung der Umschlagbewegungen.

2.1.1.4 An improved technique for train load planning at intermodal rail-road terminals (DOTOLI u. a., 2015)

Relevanz: 5

Es wurde ein zweistufiger Ansatz verfolgt, um die Zugbeladung in intermodalen (Straße/Eisenbahn) Terminals zu optimieren. Die erste Stufe besteht Modellen zur Maximierung des kommerziellen Nutzens von ausfahrenden Zügen. Auf der zweiten Ebene wird durch heuristische Ansätze die Minimierung der Wagenbewegungen angestrebt.

2.1.1.5 Integration of inter-terminal transport and hinterland rail transport (HU u. a., 2019)

Relevanz: 5

Es wird die Problemstellung des interterminalen Transportes von Containern innerhalb eines Hafens sowie der umliegenden Terminals im Hinterland untersucht. Um hier Stakeholdern einen Einblick in taktische Planungsprobleme zu geben, wird ein Optimierungsmodell entwickelt, welches die Bewegungen der Container sowie des Rollmaterials zwischen und in den Terminals beschreibt. Anschließend wird das Modell anhand einer Fallstudie mit realitätsnahen Bedingungen hinsichtlich der Aspekte wie Inter-Terminal Verbindungen, Zugzusammenstellung und Fahrplan erprobt. Hierbei zeigt sich, dass mehr Verbindungen zwischen Terminals und flexiblere Abfahrtszeiten zu Verbesserungen führen würden.

2.1.1.6 Optimization in multimodal freight transportation problems: A survey (ARCHETTI u. a., 2022)

Relevanz: 5

Diese Arbeit gibt einen Überblick über den aktuellen Forschungsstand (September 2021) im Bereich des multi-/intermodalen Transports. Laut dieser Forschungsarbeit liegt der Hauptnachteil von multimodalen Transporten gegenüber unimodalen Verkehrsträgern in den benötigten Verladeterminals, in denen Ladung vom Zug auf den LKW umgeladen wird. Dies ist zeit-

und kostenintensiv. Deshalb sei multimodaler Transport erst bei ausreichend großer Strecke (vor allem im Hauptlauf) rentabel. Als kritischer Parameter, um als System Schiene konkurrenzfähig zu bleiben, werden eine effiziente Laderaumnutzung der Züge sowie minimale Verladekosten am Terminal gesehen.

2.1.1.7 Levelling crane workload in multi-yard rail-road container terminals (SCHULZ u. a., 2021)

Relevanz: 4

In großen intermodalen Terminals (mit mehreren Umschlagplätzen Bahn/LKW) wird mithilfe mathematischer Optimierungsmodelle eine optimale Gleiszuweisung und Abwicklung der Züge mit den vorhandenen Ressourcen vorgeschlagen. Als limitierende Ressource wird in diesem Modell die Anzahl der Umschlagkräne des Terminals gesehen.

2.1.1.8 Innovative project of prototype railway wagon and intermodal transport system (WIESŁAW u. a., 2016)

Relevanz: 4

In dieser Arbeit wird der Prototyp eines Güterwagens entwickelt, der über eine horizontal schwenkbare Plattform verfügt. Auf dieser Plattform können LKW-Trailer verladen werden. Vorteilhaft wirkt sich die Möglichkeit einer Verladung ohne Kräne aus. Die Trailer werden auf seitlichen Rampen mithilfe von Zugfahrzeugen auf die Wagen verladen. Dadurch wird ein schnelleres Be- und Entladen und damit Kostenersparnisse erwartet.

2.1.1.9 Optimization challenges and literature overview in the intermodal rail-sea terminal (AMBROSINO u. a., 2021)

Relevanz: 3

Es werden die Prozesse und Abläufe in intermodalen Hafenterminals (Schiff, Eisenbahn) analysiert und Optimierungsansätze auf verschiedenen Ebenen vorgeschlagen:

- Strategisch: Layout und Konfiguration des Umschlag-/Verschubbereichs
- Taktisch: Zugplanung/Abwicklung (Management) im Hafenterminal
- Operational: Planung/Abwicklung der Verschiebetätigkeiten bzw. Neuzusammensetzungen der Züge

2.1.1.10 Investment evaluation in seaports for increasing the rail split modality in multimodal freight networks (AMBROSINO & SCIOMACHEN, 2017)

Relevanz: 3

Um den Anteil der Eisenbahn am Modal Split des Güterverkehrs zu erhöhen, untersucht diese Forschungsarbeit mögliche Optimierungspotentiale der Umschlagabläufe in Häfen. Damit soll der Anteil der Transporte über die Schiene beim Containerverkehr gesteigert werden. Folgende Aspekte werden konkret betrachtet:

- Erhöhung der Kapazität der Eisenbahn durch neue Investitionen mit dem Ziel der Minimierung der logistischen Gesamtkosten sowie der Investitionskosten. Daraus ergeben sich Effekte einer höheren Schienenkapazität an Umschlagplätzen auf den Marktanteil.
- Externe Kosten (für Straße beziehungsweise Eisenbahn)
 - Lärm/Luftverschmutzung
 - Staukosten (nur für LKW bei Verlassen des Terminals)
- Logistische Gesamtkosten
 - Transportkosten
 - Externe Kosten
- Wenn im Modell die externen Kosten miteinbezogen wurden, stieg der Anteil der Schiene von 8,5% auf 35%. Deshalb sollten externe Kosten im Entscheidungsprozess berücksichtigt werden, da dies klare Anreize für die Nutzung der Eisenbahn im Bereich intermodaler Transporte gibt.

2.1.1.11 *Integrated inbound train split and load planning in an intermodal railway terminal (BRUCK u. a., 2021)*

Relevanz: 3

Zielsetzung dieser Arbeit ist die Entwicklung von Optimierungsalgorithmen, welche die operationalen Abläufe in intermodalen Terminals verbessern. Mithilfe von zwei Mixed-Integer Linear Programming Modellen wird einerseits die optimale Zuteilung der Blöcke von ankommenden Zügen zu ihren Ent- bzw. Beladegleisen bewerkstelligt und andererseits die optimale Zusammenstellung der Blöcke zu ausfahrenden Zügen ermittelt.

2.1.1.12 *A Tabu Search algorithm for inter-terminal container transport (HU u. a., 2016)*

Relevanz: 3

Mithilfe eines Tabu-Search Algorithmus soll der interterminale Transport von Containern in einem Hafen verbessert werden, was anhand von 18 Terminals im Hafen von Rotterdam erprobt wurde.

2.1.2 **Kategorie Netzwerkstruktur**

2.1.2.1 *The impact of transport policies on railroad intermodal freight competitiveness – The case of Belgium (SANTOS u. a., 2015)*

Relevanz: 4

In dieser Forschungsarbeit werden verschiedene Ansätze zur Attraktivierung des intermodalen Güterverkehrs und deren Auswirkung anhand der Beispielregion Belgien behandelt. Konkret werden folgende Konzepte vorgeschlagen:

- Subventionierung (durch Staat) des intermodalen Verkehrs

- Einbeziehen von externen Kosten
- Optimierung der Terminalstandorte

Anschließend werden diese Ansätze in drei Szenarien simuliert, was die folgenden Ergebnisse liefert:

- Bei Subventionierung durch den Staat Belgien kommt es zu einer starken Steigerung des intermodalen Verkehrs (+9%).
- Wenn externe Kosten miteinbezogen werden, führt dies zu einem leichten Rückgang des intermodalen Verkehrs (-0,74%). Dies wird durch die entstehenden hohen externen Kosten bei Vor- und Nachlauf begründet.
- Nach Optimierung der Terminalstandorte am Beispiel Belgien kommt es zu einer leichten Steigerung des intermodalen Verkehrs (+3,5 %)

2.1.2.2 Appropriateness of the “small-scale corridor terminals” scheme for rail-road combined transport: Evidence from the Brenner axis (CAVALLARO u. a., 2021)

Relevanz: 4

Es wird eine Bedarfserhebung bei lokalen Unternehmen in Südtirol durchgeführt, ob ein intermodales Terminal in der dortigen Region notwendig ist. Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass in dieser Region nicht genügend Bedarf besteht. Alternativ wird eine technische Lösung (Data exchange system) und eine Änderung der Regelungen vorgeschlagen. Ziel ist hier eine gleichmäßige Verteilung auf die umliegenden Terminals.

2.1.2.3 Efficient metaheuristics to solve the intermodal terminal location problem (SÖRENSEN u. a., 2012)

Relevanz: 4

Ziel dieser Arbeit ist die Ermittlung der optimalen Terminalstandorte sowie das optimale Routing durch ein Netzwerk. Hierfür werden zwei verschiedene metaheuristische Methoden entwickelt, wobei für das Routing als Zielfaktor minimale Transportkosten angenommen werden.

2.1.2.4 An improved MIP heuristic for the intermodal hub location problem (HE u. a., 2015)

Relevanz: 4

Das Augenmerk dieser Arbeit liegt auf der Optimierung der intermodalen Hub-Standorte, wofür ein Algorithmus entwickelt und anschließend erprobt wird. Um die Stärken von exakten Methoden als auch Heuristiken nutzen zu können, wird ein kombinierter Algorithmus vorgestellt.

2.1.2.5 Intermodal network design: a three-mode bi-objective model applied to the case of Belgium (MOSTERT u. a., 2018)

Relevanz: 4

In dieser Arbeit wird ein mathematisches Modell zur Entscheidungsfindung im Logistikbereich vorgestellt. Konkret werden drei Transportarten (Straße, intermodal mit Eisenbahn, intermodal mit Inlandwasserwegen) berücksichtigt. Es werden sowohl ökonomische als auch ökologische Aspekte in die Betrachtung miteinbezogen. In weiterer Folge sollen daraus Strategien für intermodales Netzwerkdesign entwickelt werden. Dies beinhaltet Entscheidungen bezüglich Terminalstandort und -anzahl.

2.1.2.6 Scheduled service network design for freight rail transportation (ZHU u. a., 2014)

Relevanz: 4

Das Paper berücksichtigt einen ganzheitlichen Rahmen für taktische Planungsentscheidungen im Eisenbahngüterverkehr. Der verwendete Ansatz ist flexibel und zudem wird die zweistufige Zusammenstellung (cars to blocks, blocks to trains) im Bereich des Eisenbahngüterverkehrs berücksichtigt. Es werden Aspekte wie Serviceauswahl und Planung, Blocking, Zugzusammenstellung und Routing miteinbezogen. Es erfolgt eine ganzheitliche Optimierung durch ein auf einem zyklischen Raum-Zeit Design basierendes Netzwerkdesign.

2.1.2.7 A multi-objective sustainable load planning model for intermodal transportation networks with a real-life application (BAYKASOĞLU & SUBULAN, 2016)

Relevanz: 4

Diese Arbeit hat die Optimierung mehrerer Aspekte von intermodalen Netzwerken zum Ziel. Dies beinhaltet Transportartauswahl, Frachtzuteilung sowie Standorte der intermodalen Terminals. Das verwendete Network-Flow-Modell ist dabei für taktische Planung gedacht. Ziel sind minimale Transportkosten und -dauer.

2.1.2.8 Service network design for freight transportation: a review (WIEBERNEIT, 2008)

Relevanz: 3

Es werden bestehende Lösungsansätze zu Problemstellungen im Bereich des allgemeinen Güterverkehrs untersucht, verglichen und anschließend Empfehlungen für zukünftige Forschungsprojekte abgegeben. Der Fokus liegt auf mathematischen Modellen zur Problemlösung.

2.1.2.9 Decomposition approach for integrated intermodal logistics network design (GHANE-EZABADI & VERGARA, 2016)

Relevanz: 3

Diese Forschungsarbeit legt ihr Hauptaugenmerk auf die Optimierung der Netzwerkstruktur von intermodalen Systemen. Dies beinhaltet Aspekte wie Terminal Location, Routenauswahl sowie Auswahl der Transportart. Dafür wird ein geteilter (decomposition) Algorithmus

entwickelt, dessen Ziel die Minimierung der gesamten Netzwerkkosten (inkl. fixe Kosten Terminal + variable Transportkosten) ist.

2.1.2.10 *The challenge of appropriate hub terminal and hub-and-spoke network development for seaports and intermodal rail transport in Europe*
(KREUTZBERGER & KONINGS, 2016)

Relevanz: 3

Es wird eine optimierte Netzwerkstruktur vorgeschlagen, wobei konkret Hub-and-Spoke Bundling angewendet wird. Es werden unterschiedliche Arten des Hub-and-Spoke Bundling verglichen und eine optimierte Lösung (Bündelung der Züge/Shuttlezüge zu Knotenpunkten) aufgezeigt. Weiters werden Barrieren und Herausforderungen für eine schnellere Implementierung von Hub-and-Spoke Terminals diskutiert.

2.1.3 Kategorie Routing

2.1.3.1 *Handbook of optimization in the railway industry* (BOHLIN u. a., 2018)

Relevanz: 5

In dieser Arbeit werden mehrere Teilbereiche des Güterverkehrs beziehungsweise des Schienenverkehrs allgemein behandelt. Besonders aus den Bereichen Train Routing und Blocking findet sich hier eine gewisse Relevanz für das Projekt. Generell zeigt sich in dieser Arbeit, dass es eine Anzahl an Optimierungsmodellen für den Schienengüterverkehr gibt, jedoch nicht alle tatsächlich für eine praktische Anwendung im Regelbetrieb geeignet sind.

- Train Routing
 - Um Ressourcen möglichst effizient nutzen zu können, muss das bestehende Netzwerk analysiert werden. Die Güterzugtrassierung erfolgt am Beispiel der Deutschen Bahn (DB) in der strategischen Planungsebene mithilfe eines vereinfachten Verkehrsnetzes (makroskopisch).
 - Untersuchte Probleme
 - Infrastruktur
 - Strategisches Level, mit makroskopischer Betrachtung des Verkehrsnetzes, deshalb in größeren Gebieten lösbar (Deutschlandweit)
 - Netzwerkdesign
 - Verkehrsprognosen (Langzeit)
 - Streckenplanung, Trassenzuweisung, Fahrplan
 - Sehr detailliert (Anzahl Gleise etc.) nur in kleineren/regionalen Einheiten lösbar (Stand 2018)
- Blocking (am Beispiel der DB)

Die DB verwendet seit 2011 mathematische Modelle für die langfristige Planung und Optimierung des Einzelwagenverkehrs (non-linear mixed integer models).

Als Eingaben werden Vorhersagematrizen bzw. Bedarfsmatrizen verwendet, zudem wird das Netz in Hierarchien unterteilt, um die Rechenzeit in praxistauglichen Maßen zu halten. Als Anwendung kann die Identifizierung optimaler Routen für zukünftige Transporte als auch von Engstellen in Rangierbahnhöfen gesehen werden.

2.1.3.2 *Single wagonload production schemes improvements using GüterSim (agent-based simulation tool) (MANCERA u. a., 2015)*

Relevanz: 5

In dieser Forschungsarbeit wird eine mögliche Optimierung des Einzelwagenverkehrs im Schweizer Schienennetz vorgeschlagen. Verwendet wird dafür die Optimierungssoftware MATSim (Open Source Software zur Simulation von Verkehr). Diese Software wird dementsprechend auf die Voraussetzungen des Einzelwagenverkehrs angepasst, wodurch das Simulationstool GüterSim (zwei Layer Modell, skalierbar) entsteht. Folgende Ansätze zur Verbesserung werden vorgeschlagen:

- Steigerung der Zugauslastung (aktuell Züge ca. 60% ausgelastet)
- Verringerung der Umwege der Wagen (aktuell bedingt durch kompliziertes Routing)
- Verkürzte Transportzeiten und folglich Verbesserung des Service

GüterSim optimiert dabei das Verhalten der einzelnen „Agenten“ in mehreren Durchläufen, wobei Erfahrungen aus vorherigen Runs integriert werden. Die Agenten stellen in diesem Fall die einzelnen Wagen dar. Die Software besteht aus mehreren Layern, wie zum Beispiel Infrastruktur (Kapazitäten, Strecken) und Produktion (Zugangspunkte wie Rangiergleise/Rangierbahnhöfe, Fahrpläne)

2.1.3.3 *Railway timetabling: a maximum bottleneck path algorithm for finding an additional train path (LJUNGGREN u. a., 2021)*

Relevanz: 5

Mithilfe eines Dijkstra Algorithmus wird versucht, eine zusätzliche Zugtrasse in einen bereits bestehenden, zeitnahen Fahrplan zu integrieren. Die anderen Trassen werden als fixiert angesehen und der Personenverkehr soll nicht beeinträchtigt werden. Ziel ist zudem eine möglichst hohe Fahrplanstabilität, weshalb ein maximaler Abstand zu angrenzenden Zugtrassen angestrebt wird.

2.1.3.4 *Utilising more of the loading space in intermodal line trains – Measures and decision support (WOXENIUS u. a., 2013)*

Relevanz: 5

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der optimalen Auslastung von intermodalen Transporten. Es werden existierende Maßnahmen zur Steigerung der Auslastung identifiziert und anschließend qualitativ bewertet. Die Maßnahmen beinhalten Ansätze wie:

- Angepasste Zugkapazität
- Änderung der Abfahrtszeiten

- Änderung der Routen
- Rerouting von LKW
- Umverteilung der Ladungen auf die Straße

2.1.3.5 Integrated optimization of transfer station selection and train timetables for road–rail intermodal transport network (CHEN u. a., 2022)

Relevanz: 5

In dieser Arbeit wird versucht, ein intermodales Netzwerk zwischen Straße und Eisenbahn zu optimieren. Konkret werden die Anzahl der notwendigen Umschläge (Container) sowie die Anpassung des Fahrplans auf die Bedürfnisse des Güterverkehrs untersucht. Als Ziele des Modells wird ein höherer Auslastungsgrad der Infrastruktur, die Minimierung der Umschlagstationen für Container sowie die Reduzierung der Transportkosten und anfallender Strafzahlungen aufgrund Verspätungen angesetzt. Abschließend wird eine Case Study im chinesischen bzw. im chinesisch-europäischen Netz durchgeführt.

2.1.3.6 NEMO — Netz-Evaluations-Modell bei den ÖBB (SEWCYK u. a., 2001)

Relevanz: 5

NEMO (Netz-Evaluationsmodell) ist ein Simulationsprogramm bei den ÖBB, welches als Entscheidungshilfe bei strategischen Themen verwendet werden kann. Darunter fallen Evaluierungen von Infrastruktur, Ermittlung der Netzbelastung und Auswirkungen veränderter Produktions- und Betriebskonzepte auf das Netz. Die Netzbelastung wird auf Grundlage von Verkehrsprognosen für einen mittleren Betriebstag erstellt. Dafür wird der Tag in mehrere Zeitscheiben (Dauer zwischen drei und acht Stunden) unterteilt und mehrere Betrachtungsfälle durchgespielt (Referenzfall, Plannullfall für 2005, 2010 und 2015). Die Infrastruktur wird durch Knoten- und Kantenmodelle simuliert.

Hinsichtlich des Routings für den Güterverkehr bildet das System automatisch Ganzzüge (bei genügend Volumen) bzw. optimiert Einzelwagenverkehre. Zudem werden auch Leerwagenverkehre im Einzelwagenverkehr berücksichtigt. Die Modellzüge haben fix vorgegebene Einschränkungen bezüglich Länge und Gewicht. Im Modell werden anschließend für alle beladenen und leeren Wagen (Einzelwagen bzw. Ganzzüge) die optimalen Routen gesucht.

Es werden zuerst Personenverkehr und Güterverkehr einzeln betrachtet und anschließend zusammengefügt und Engpässe gelöst. Abschließend werden für jeden Planfall verschiedene Kenngrößen berechnet. Darunter fallen Tonnen- bzw. Personenkilometer und strecken- bzw. knotenbezogene Kennzahlen.

2.1.3.7 A train formation plan with elastic capacity for large-scale rail networks (LIN u. a., 2021)

Relevanz: 4

Ziel dieser Arbeit ist die Optimierung des Traffic Routing und des Train Formation Problems (Blocking). Dafür werden unterschiedliche Algorithmen entwickelt. Abschließend wird dieses Modell anhand einer Simulation im chinesischen Schienennetz erprobt.

2.1.3.8 Robust Tabu Search algorithm for planning rail-truck intermodal freight transport (BOŽEJKO u. a., 2016)

Relevanz: 4

In dieser Arbeit wird ein Tabu-Search Algorithmus vorgestellt, welcher zur optimalen Frachtverteilung zu intermodalen Verkehrsrouten beitragen soll, wobei das Ziel die Erreichung minimaler Transportkosten ist. Konkret werden zwei Transportarten, Straße und Straße/Eisenbahn/Straße, untersucht.

2.1.3.9 Intermodal service network design with stochastic demand and short-term schedule modifications (MÜLLER u. a., 2021)

Relevanz: 4

Diese Forschungsarbeit beschäftigt sich mit den Bedarfsschwankungen im Güterverkehr. Dieser ist nur bedingt vorhersehbar und in weiterer Folge ist die Auslastung der Infrastruktur ineffizient, da zu viele Trassen bestellt werden, welche schlussendlich nicht benötigt werden. Hier werden zwei Lösungsansätze vorgestellt.

- Stochastic service network design: Erstellung von Transportplänen, welche einerseits minimale Kosten verursachen aber gleichzeitig mit ausreichend Kapazitäten ausgestattet sind
- Kurzfristiges Rerouting von Rollmaterial, wenn im geplanten Einsatzgebiet kein Bedarf besteht

2.1.3.10 One-block train formation in large-scale railway networks: An exact model and a tree-based decomposition algorithm (CHEN u. a., 2018)

Relevanz: 3

Mit linearer Optimierung wird in dieser Forschungsarbeit eine Lösung für kleine bzw. mittelgroße Netzwerke gesucht, um die Zusammenstellung von Zügen möglichst effizient zu gestalten. Für große Netzwerke wird ein zweistufiger, tree-based Ansatz verwendet, indem das Problem in mehrere Untergruppen zerlegt wird. Die Algorithmen werden anhand chinesischer Schienensysteme getestet.

2.1.4 Kategorie Verschiebebahn

2.1.4.1 The basic train makeup problem in shunting yards (BOYSEN u. a., 2016)

Relevanz: 4

Es werden die Zugzusammenstellung (Train Make-up Problem) in den Verschiebebahnhöfen analysiert und Optimierungsmodelle vorgeschlagen. Die entwickelten Heuristiken und exakten Algorithmen werden in Fallstudien erprobt. Konkret werden drei Modelle verwendet, um eine möglichst effiziente Zugzusammenstellung zu erreichen und die Anzahl an Verschiebewegungen zu minimieren, wobei die Kapazität der ausfahrenden Züge beachtet werden muss.

2.1.4.2 Single-stage shunting minimizing weighted departure times (JAEHN u. a., 2015bb)

Relevanz: 4

Für einen einstufigen Verschiebebahnhof (hier am Beispiel München) wird ein Optimierungsmodell entwickelt. Den Güterwagons wird eine gewichtete Priorität zugewiesen. Diese wird anschließend mit den verstrichenen Zeiteinheiten multipliziert, die der Wagen auf seine Weiterfahrt gewartet hat. Das Ziel dieses Algorithmus ist die Minimierung dieser Faktoren (Priorität * Wartezeit).

2.1.4.3 Solving real-life railroad blocking problems (AHUJA u. a., 2007)

Relevanz: 3

Es wird ein effizientes Blocking (Zugzusammenstellung) zwischen den Terminals untersucht. Ziel ist wiederum die Minimierung der Transportkosten. Die vorgeschlagenen Algorithmen werden bei drei Unternehmen in den USA in der Praxis erprobt.

2.1.4.4 Minimizing delays in a shunting yard (JAEHN u. a., 2015aa)

Relevanz: 3

Mithilfe heuristischer sowie exakter Methoden wird versucht, die Abläufe in einem Verschiebebahnhof zu optimieren bzw. Verspätungen der ausgehenden Züge zu minimieren. Zudem wird ein optimierter Fahrplan der ankommenden beziehungsweise ausfahrenden Züge genauer betrachtet. Konkret werden Zusammenhänge zwischen ankommenden und ausfahrenden Zügen untersucht. Das Ziel ist die Minimierung der gewichteten Verspätung der ausfahrenden Züge sowie eine optimierte Verschiebfolge der ankommenden Züge.

2.1.4.5 Shunting yard operations: Theoretical aspects and applications (BOYSEN u. a., 2012)

Relevanz: 3

Im Paper wird eine Übersicht der Forschungsergebnisse der vergangenen 40 Jahre in Bezug auf betriebliche Abläufe in Verschiebebahnhöfen vorgestellt. Zudem wird ein Vorhersagemodell für die Leistung von Verschiebebahnhöfen und die Verweildauer der Güterwagons entwickelt. Abschließend werden noch Herausforderungen der Forschung in diesem Bereich in den nächsten Jahren behandelt.

2.1.5 Kategorie Digitalisierung/Automatisierung

2.1.5.1 *Developing a prototype platform to manage intelligent communication systems in intermodal transport (GIUFFRIDA u. a., 2021)*

Relevanz: 5

Es werden die Ergebnisse des Forschungsprojektes „ITS Italy 2020“ präsentiert. Dafür wurde eine neue Software (ITS - Intelligent Transport Systems) entwickelt, welche es den Benutzer*innen ermöglicht, laufende Sendungen in intermodalen Netzwerken verfolgen bzw. managen zu können. Hierfür werden Sensoren/Geräte entlang der Infrastruktur sowie dem Rollmaterial implementiert. Der Hauptfokus wird auf den Informationsaustausch zwischen den Beteiligten gelegt.

2.1.5.2 *Dynamic train unit coupling and decoupling at cruising speed: Systematic classification, operational potentials, and research agenda (NOLD & CORMAN, 2021)*

Relevanz: 5

Diese Arbeit kategorisiert systematisch die Arten des Kuppelns/Trennens von Wagen. Es werden die Voraussetzungen seitens Infrastruktur und Wagenmaterial untersucht sowie die Komparabilität der Systeme behandelt. Weiters werden die potenziellen Vorteile des „Dynamic coupling“, Kuppeln während der Fahrt, aufgezeigt.

2.1.5.3 *Automatic information exchange between interoperable information systems: Potential improvement of access management in a seaport terminal (JACOBSON u. a., 2020)*

Relevanz: 5

Es wird eine Anwendung vorgestellt, die einen automatischen Informationsaustausch zwischen Hafenbetreibern, Eisenbahnverkehrsunternehmen und Frächtern (Straße) ermöglichen soll. Dadurch wird ein schnellerer Umschlag angestrebt. Der Informationsaustausch erfolgt in drei Phasen, konkret eine Woche, einen Tag und zwei Stunden vor dem geplanten Transport. Als relevante Informationen werden in diesem Fall folgende Attribute gesehen:

- Geschätzte Ankunftszeit (estimated time of arrival)
- Prioritätsinformationen der Ware
- Driver ID
- Shipment ID

2.1.5.4 *Bestimmung der Kapazitätssteigerung durch Einführung der Mittelpufferkupplung und ep-Bremse (REISCH u. a., 2021)*

Relevanz: 5

Es wird mithilfe zweier Szenarien die entstehenden Vorteile durch die Einführung einer Mittelpufferkupplung sowie von elektropneumatischen (ep-)Bremsen im Güterverkehr untersucht. Dafür wird mithilfe eines Verfahrens zur automatischen Trassenkonstruktion jeweils ein Durchlauf unter aktuellen Bedingungen und anschließend ein Versuch mit geänderten Bedingungen, die eine Einführung einer digitalen automatischen Kupplung (DAK) sowie einer ep-Bremse simulieren sollen, durchgeführt. Als Vergleichswerte werden einerseits die Streckenkapazität als auch die Fahrzeiten herangezogen. Durch eine vollständige Einführung einer Mittelpufferkupplung (hier mit Energieversorgung und Datenverbindung) mit ep-Bremse würde sich die Kapazität der Strecke um 4% erhöhen und die Fahrzeit würde sich im Mittel um 7% verringern. Zudem wurden auch Szenarios simuliert, in denen nur ein Teil der Züge umgerüstet wurde.

2.1.5.5 Evaluating the effects of automation components in service networks of rail freight (POLLEHN u. a., 2021)

Relevanz: 4

Es werden die Auswirkungen von Automatisierungskomponenten auf des Netzwerkdesign untersucht, wobei das Hauptaugenmerk auf der Automatisierung von Verschiebebahnhöfen liegt. Drei Szenarios mit unterschiedlichen Automatisierungsgraden werden betrachtet und anschließend in einer Fallstudie im Einzelwagennetzwerk verglichen. Abschließend werden mögliche Zeit- sowie Kostenersparnisse hervorgehoben.

2.1.5.6 A multi-state train-following model for the analysis of virtual coupling railway operations (QUAGLIETTA u. a., 2020)

Relevanz: 4

In dieser Arbeit wird ein neuartiges Train-Following Modell entwickelt, welches auf dem Prinzip des Virtual-coupling beruht. Dabei handelt es sich um eine Weiterentwicklung des Moving-Block Prinzips durch Einführung eines relativen Bremswegabstands zwischen den Zügen. In weiterer Folge wird eine Kapazitätsanalyse auf einer Strecke in England durchgeführt. Dabei zeigt sich ein Kapazitätvorteil im Vergleich zu bisherigen Systemen (European Train Control System (ETCS) Level 2 und 3).

2.1.5.7 Technical trends related to intermodal automated freight transport systems (AFTS) (SHIN u. a., 2018)

Relevanz: 4

Diese Arbeit analysiert die aktuellen Trends (Stand 2018) der technologischen Entwicklungen bei automatisierten intermodalen Gütertransportsystemen. Als Rahmen werden hier Entwicklungen in Südkorea, USA und Europa behandelt. Es wird hierbei in folgende Kategorien unterschieden:

- Be- und Entlademethoden
- Kontroll- und Steuersysteme
- Fahrzeugtypen

2.1.5.8 *Synchromodal logistics: An overview of critical success factors, enabling technologies, and open research issues (GIUSTI u. a., 2019)*

Relevanz: 3

In dieser Forschungsarbeit wird der State-of-the Art bezüglich synchromodalem Transport vorgestellt, die kritischen Erfolgsfaktoren für Synchromodalität untersucht und abschließend offene Forschungsfragen in diesem Bereich identifiziert.

Tabelle 1: Übersicht der in der Literaturrecherche berücksichtigten Werke

Werk	Kategorie	Relevanz	Beschreibung
AHUJA u. a., 2007	Verschiebebahnhof	3	Algorithmen zur effizienten Zugzusammenstellung zwischen Terminals
AMBROSINO & CABBALLINI, 2019	Terminal	5	Optimierung von Zugbeladungen in Containerterminals
AMBROSINO & SCIOMACHEN, 2017	Terminal	3	Optimierungspotentiale in Hafenterminals mit Fokus auf Umschlagabläufe
AMBROSINO u. a., 2021	Terminal	3	Ansätze zur Optimierung von Prozessen und Abläufen in Hafenterminals
ARCHETTI u. a., 2022	Terminal	5	Überblick über aktuellen Forschungsstand im multi-/intermodalen Güterverkehr
BAYKASOĞLU & SUBULAN, 2016	Netzwerkstruktur	4	Optimierung von Aspekten wie Serviceauswahl, Frachtverteilung und Terminalstandorte in intermodalen Netzwerken
BOHLIN u. a., 2018	Routing	5	Aktuell verwendete Modelle für Routing und Blocking sowie allgemeine Probleme des Güterverkehrs
BOYSEN u. a., 2012	Verschiebebahnhof	3	Übersicht über aktuellen Forschungsstand bezüglich Optimierung von Verschiebebahnhöfen
BOYSEN u. a., 2016	Verschiebebahnhof	4	Optimierungsmodelle für eine effiziente Zugzusammenstellung in Verschiebebahnhöfen
BOŽEJKO u. a., 2016	Routing	4	Algorithmus zur optimalen Frachtverteilung auf intermodalen Verkehrsrouten
BRUCK u. a., 2021	Terminal	3	Optimierung der operationalen Abläufe in intermodalen Terminals
CAVALLARO u. a., 2021	Netzwerkstruktur	4	Erhebung zu Bedarf von intermodalem Terminal im Raum Südtirol
CHEN u. a., 2018	Routing	3	Optimierung der Zugzusammenstellung in Netzwerken
CHEN u. a., 2022	Routing	5	Optimierung eines intermodalen Netzwerkes bezüglich Umschlagsanzahl und Fahrplan
DOTOLI u. a., 2015	Terminal	5	Optimierung von Zugbeladungen in intermodalen Terminals

Werk	Kategorie	Relevanz	Beschreibung
GHANE-EZABADI & VERGARA, 2016	Netzwerkstruktur	3	Optimierung der Netzwerkstruktur (Terminalstandorte, Routen)
GIUFFRIDA u. a., 2021	Digitalisierung/ Automatisierung	5	Ergebnisse aus Forschungsprojekt zu Live Tracking and Tracing System in Italien
GIUSTI u. a., 2019	Digitalisierung/ Automatisierung	3	Übersicht über State-of-the-Art im Bereich des synchronmodalen Transportes
HE u. a., 2015	Netzwerkstruktur	4	Optimierung von intermodalen Hub-Standorten
HU u. a., 2016	Terminal	3	Verbesserung des interterminalen Transportes innerhalb eines Hafens
HU u. a., 2019	Terminal	5	Modell zur Optimierung der interterminal bzw. Hinterland Transporte
JACOBSSON u. a., 2020	Digitalisierung/ Automatisierung	5	Entwicklung einer Software für automatischen Informationsaustausch zwischen allen Beteiligten
JAEHN u. a., 2015aa	Verschiebebahnhof	3	Optimierung der Abläufe in Verschiebebahnhöfen
JAEHN u. a., 2015bb	Verschiebebahnhof	4	Algorithmus zur effizienten Abwicklung von Abläufen in Verschiebebahnhöfen
KREUTZBERGER & KONINGS, 2016	Netzwerkstruktur	3	Optimierte Netzwerkstruktur durch Anwendung von Hub-and-Spoke Bundling
LIN u. a., 2021	Routing	4	Modell zur Optimierung von Routing und Blocking
LJUNGGREN u. a., 2021	Routing	5	Implementierung von zusätzlicher Zugtrasse in bestehenden Fahrplan
MANCERA u. a., 2015	Routing	5	Simulationssoftware zur Optimierung des Einzelwagenladungsverkehrs
MOSTERT u. a., 2018	Netzwerkstruktur	4	Mathematisches Modell zur Entscheidungsfindung im Logistikbereich
MÜLLER u. a., 2021	Routing	4	Lösungsansätze für Umgang mit Bedarfsschwankungen im Güterverkehr
MUÑUZURI u. a., 2016	Terminal	5	Durch Optimierung effizientere Abwicklung der Zugzusammenstellung und Umschläge in Hafenterminals
NOLD & CORMAN, 2021	Digitalisierung/ Automatisierung	5	Zusammenstellung von Technologien und Verfahren des Kuppelns/Trennen von Wagen sowie Entwicklung eines Dynamic-coupling Systems
POLLEHN u. a., 2021	Digitalisierung/ Automatisierung	4	Auswirkungen von Automatisierung in Verschiebebahnhöfen auf Netzwerkdesign
QUAGLIETTA u. a., 2020	Digitalisierung/ Automatisierung	4	Entwicklung eines Virtual-coupling Modells und Vergleich zu ETCS-Level 2 und 3
REISCH u. a., 2021	Digitalisierung/ Automatisierung	5	Untersuchung der Vorteile durch Einführung von DAK und ep-Bremse

Werk	Kategorie	Relevanz	Beschreibung
RICCI u. a., 2016	Terminal	5	Bewertungsmethoden für Optimierungsansätze in intermodalen Terminals
SANTOS u. a., 2015	Netzwerkstruktur	4	Ansätze zur Attraktivierung des intermodalen Güterverkehrs
SCHULZ u. a., 2021	Terminal	4	Optimierte Gleiszuweisung und Abwicklung mit verfügbaren Ressourcen
SEWCYK u. a., 2001	Routing	5	Simulationsprogramm als Entscheidungshilfe für strategische Themen im Güterverkehr
SHIN u. a., 2018	Digitalisierung/ Automatisierung	4	Übersicht und Analyse von aktuellen Trends bei automatisierten intermodalen Gütertransportsystemen
SÖRENSEN u. a., 2012	Netzwerkstruktur	4	Modell für optimierte Terminalstandorte und Routing durch Netzwerk
WIEBERNEIT, 2008	Netzwerkstruktur	3	Grundsätzliche Problemstellungen im Bereich des allgemeinen Güterverkehrs mit Fokus auf mathematische Modelle
WIESŁAW u. a., 2016	Terminal	4	Prototypenentwicklung von Güterwagen mit horizontal schwenkbarer Plattform
WOXENIUS u. a., 2013	Routing	5	Identifizierung und Bewertung von Maßnahmen zur Steigerung der Zugauslastung
ZHU u. a., 2014	Netzwerkstruktur	4	Mittels flexiblen Ansatzes ganzheitliche Optimierung von Zugzusammenstellung, Serviceauswahl und Routing

2.2 Expert*inneninterviews

2.2.1 Methodik und Interviewpartner*innen

In Ergänzung zur Literaturrecherche wurden Einschätzungen direkt aus der Logistikbranche miteinbezogen. Dazu wurden fünf Experten*innen bezüglich möglicher Verbesserungsansätze im intermodalen Güterverkehr mit Hauptlauf auf der Bahn befragt. Dadurch konnte beurteilt werden, inwiefern sich die aktuell von der Forschung behandelten Themenbereiche mit den Bedürfnissen der Praxis decken und in welchen Bereichen Unterschiede bestehen. Die leitfadengestützten Interviews wurden online geführt, zur weiteren Verwendung transkribiert und anschließend gemäß einer objektiven Inhaltsanalyse nach Mayring ausgewertet (MAYRING, 2010). Die fünf Interviews wurden dabei mit folgenden Personen geführt:

- Person in leitender Funktion am Lehrstuhl eines Eisenbahnforschungsinstituts an einer europäischen Universität
- Expert*in aus einem international tätigen Schienengüterverkehrsunternehmen mit Fokus auf intermodalen Güterverkehr
- Führungskraft einer im Schienengüterverkehr tätigen Spedition
- Person aus einem Netzwerk österreichischer Verkehrsunternehmen
- Person aus einem Verband europäischer Eisenbahninfrastrukturunternehmen mit Fokus auf die Vereinfachung/Koordinierung des europäischen Güterverkehrs

2.2.2 Kernaussagen aus den Interviews

Die Kernaussagen aus den Interviews wurden für eine bessere Übersichtlichkeit insgesamt acht Kategorien zugeordnet, welche in Abbildung 2 dargestellt sind. Anhand dieser Kategorisierung werden nachfolgend die Ergebnisse aus den Expert*inneninterviews erörtert.

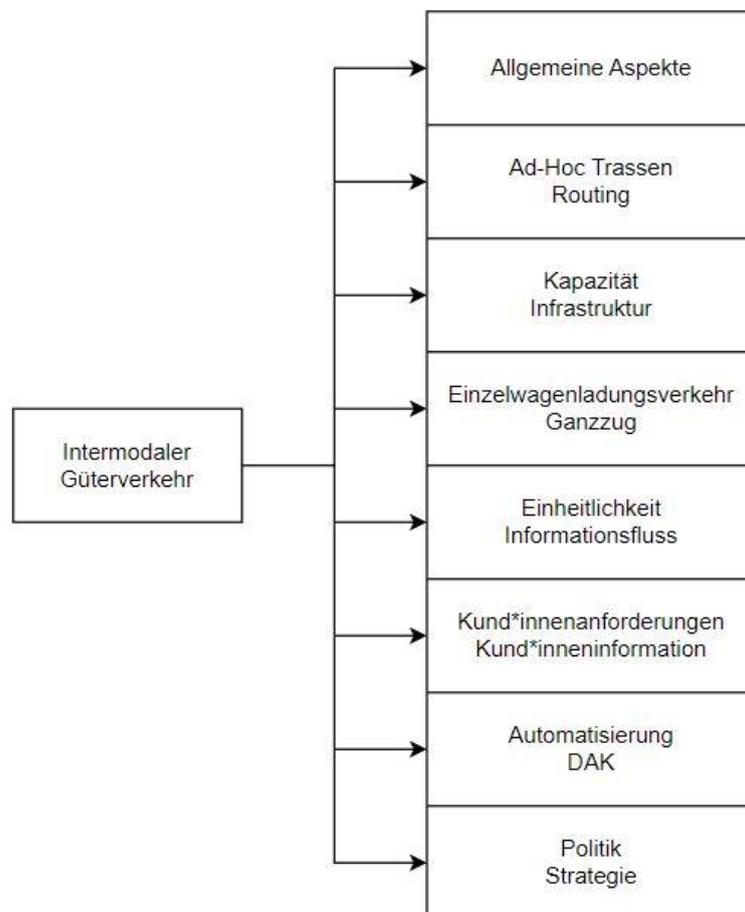


Abbildung 2: Kategorisierung der Aussagen aus den Expert*inneninterviews

2.2.2.1 Allgemeine Aspekte

Grundsätzlich werden intermodale Transporte als Zukunft des Güterverkehrs gesehen, jedoch ist es wichtig, dass gesamte System einfach zu halten. Zudem bedarf es einer Kosten-Nutzen Aufstellungen möglicher Maßnahmen. Schlussendlich muss der Nutzen möglicher Verbesserungen bei den Kund*innen ankommen, innerhalb der Transportkette ist es eher als Verteilungsfrage zu betrachten.

2.2.2.2 Ad-Hoc Trassen / Routing

Im intermodalen Güterverkehr besteht aufgrund der schlechteren Vorhersagbarkeit im Vergleich zum Personenverkehr eine hohe Volatilität, da die Priorität von Güterzügen im Allgemeinen geringer ist als die von Personenzügen und sie deshalb nachgereiht abgefertigt werden. Deshalb werden Ad-Hoc Trassen als sinnvoll angesehen, um eine höhere Flexibilität zu ermöglichen. Somit könnte auf schwankende Frequenz und Auslastung besser reagiert werden. Aktuell wird jedoch die fehlende Garantie für Ad-Hoc Züge als Problem gesehen.

Rerouting ist derzeit ebenfalls nicht umsetzbar, da die Alternativrouten häufig durch Baustellen eingeschränkt bzw. gesperrt sind, sodass aktuell in einigen Fällen nicht einmal das eigentliche Kerngeschäft umsetzbar ist.

Die Trassenzuweisung ist noch ein überwiegend nationaler Prozess, wobei hier durch das Timetable Redesign (TTR) Programm von Railnet Europe Verbesserungen erzielt werden konnten (RAILNETEUROPE, k.D.). Der Markt sollte zudem auch vermehrt unterschiedliche Produkte - von langfristigen gebuchten Trassen bis hin zu Spot-Traffic - anbieten.

2.2.2.3 Kapazität / Infrastruktur

Die Kapazität ist aktuell eine der größten Herausforderungen des Schienengüterverkehrs, denn ohne zukünftigen Ausbau der Infrastruktur werden laut Aussagen mehrerer Befragter nicht ausreichend Kapazitäten zur Verfügung stehen. Gerade Grenzbahnhöfe stellen sich mit zu geringem Durchsatz oft als Nadelöhr heraus. Daher muss mittlerweile bereits viel Transportvolumen aufgrund fehlender Kapazitäten auf der Bahn abgelehnt und somit auf der Straße transportiert werden.

Allgemein wird von einigen Befragten als Ziel gesehen, die Grundlast des Güterverkehrs auf die Schiene zu bringen und lediglich die Spitzenlasten über die Straße zu transportieren, denn aktuell ist dies umgekehrt. Dafür muss für Kund*innen der intermodale Transport so einfach und simpel wie der LKW-Transport werden. Dazu müsste aber auch der Fokus in der Infrastrukturplanung wieder vermehrt auf den Güterverkehr gelegt werden.

Das Thema Baustellenkoordination spielt ebenfalls eine gravierende Rolle. Häufig finden auf mehreren Korridoren beziehungsweise Zulaufstrecken zu Häfen zeitgleich Bauarbeiten statt, wodurch die Kapazität eingeschränkt wird. Folglich sind Verspätungen von Güterzügen von 24 - 48 Stunden durchaus realistisch. Diese Unzuverlässigkeit ist auch für die weitere Umlaufplanung der Triebfahrzeuge und Güterwagen problematisch, weshalb es hier eine europaweite Koordination von derartigen Bauvorhaben bräuchte.

2.2.2.4 Einzelwagenladungsverkehr / Ganzzug

Die Eisenbahn als Gütertransportmittel ist grundsätzlich erst ab ausreichend Frequenz und Volumen/Masse interessant. Die Straße ist zwar für den Vor- sowie Nachlauf essentiell, der Hauptlauf sollte aber möglichst auf der Schiene stattfinden. Einzelwagenladungsverkehr ist aber derzeit preislich uninteressant, weshalb dieser außerhalb Österreichs auch größtenteils vernachlässigt wird.

2.2.2.5 Einheitlichkeit / Informationsfluss

Essenzielle Ansatzpunkte zur Verbesserung werden auch in einer europaweiten Abstimmung sowie einem durchgehenden Informationsfluss zwischen allen Beteiligten gesehen, was - wie oben erwähnt - auch für die internationale Baustellenplanung gelten sollte.

Durch Digitalisierung sollte zuerst der durchgehende Informationsfluss über Staatsgrenzen ermöglicht und in weiterer Folge Standards wie beispielsweise die elektronischen Frachtbeförderungsinformation (eFTI) festgelegt werden. Standards sind jedoch immer nur so gut wie ihre Umsetzung, so stellen Schnittstellen zwischen den Beteiligten in diesem Bereich eine große Herausforderung dar. Seitens der Befragten besteht aber ein Wunsch nach Transparenz und Nachverfolgbarkeit der Transporte in Form von Live-Tracking/Track-and-Trace Systemen.

Die Probleme fehlender Einheitlichkeit zeigen sich unter anderem bei den Anforderungen der Häfen an Speditionen. Trotz einheitlicher EU-Vorgaben setzen die Häfen diese unterschiedlich um, wodurch die Prozesse für die Logistikpartner komplizierter werden. Allgemein sollte der Schienengüterverkehr greifbarer, einfacher und harmonisierter werden, um großflächig genutzt zu werden.

*2.2.2.6 Kund*inneninformation / -anforderung*

Für Kund*innen ist einer der wichtigsten Punkte die Verlässlichkeit in Bezug auf Ladungsausfälle und Liefertermine. Dieser Aspekt wird sogar ausschlaggebender als die Transportkosten gesehen. Nach Aussage der Befragten wäre anstatt „As soon as possible“ ein zuverlässiger Transport mit einer realistischen Transportdauer wichtiger.

Weiters ist für Kund*innen die Planbarkeit von Vor- und Nachlauf von enormer Bedeutung. Darum ist die Kund*inneninformation zur geschätzten Verfügbarkeit einer Lieferung (estimated time of availability), also wann die Lieferung tatsächlich von der Bahn auf den LKW verladen werden kann, sinnvoller als die derzeit übliche geschätzte Ankunftszeit (estimated time of arrival), die allfällige Ladearbeiten etc. nicht beinhaltet.

Generell wäre es erforderlich, dass sich die Bahn an die Anforderungen der Logistikbranche anpasst, unter anderem auch in Bezug auf Flexibilität und Transparenz. Die Angebotslegung beispielsweise dauert zu lange und ist zudem auch zu unflexibel. Außerdem fehlt im Tarifsystern eine notwendige Transparenz. Im Allgemeinen ist derzeit der Gütertransport per Bahn preislich zum Straßentransport nicht konkurrenzfähig.

2.2.2.7 Automatisierung / digitale automatische Kupplung

Die Automatisierung ist laut Befragten grundsätzlich nicht als Allheilmittel anzusehen. Sie sollte auch erst in Angriff genommen werden, wenn zuvor bereits sämtliche Prozesse digitalisiert wurden. Wesentlich ist vielmehr, trotz vieler technischer Möglichkeiten das eigentliche Ziel nicht aus den Augen zu verlieren.

Die Entwicklung und Einführung der DAK ist aber trotzdem von großer Bedeutung, da diese vor allem für (maritime) Zulaufverkehre und Einzelwagenladungsverkehr Vorteile bringen kann. Es stellt sich jedoch die Frage, wer den Nutzen der DAK hat und wer die Kosten für die Einführung trägt. Grundsätzlich ist die aktuell angedachte Version der DAK nach Ansicht von Befragten zu komplex und man sollte sich auf eine einfachere und vor allem einheitliche Umsetzung einigen, die funktioniert. Diese muss auch nicht zwingend die optimale Lösung sein.

2.2.2.8 Politik / Strategie

Die Politik hat ebenfalls einen großen Einfluss auf die zukünftigen Entwicklungen in Bezug auf intermodalen und speziell Schienengüterverkehr. Einerseits muss eine Entscheidung getroffen werden, ob der Fokus weiterhin hauptsächlich auf dem Personen- oder zukünftig auch auf dem Güterverkehr liegen soll, und grundsätzlich ist wesentlich, dass eine Gleichstellung von Schiene und Straße erreicht wird. Zudem muss von den Verantwortlichen entschieden werden, ob der Einzelwagenladungsverkehr weiterhin gewollt ist oder nicht.

Aufgrund aktueller Entwicklungen wie steigender Energiekosten und Personalmangel wird die Bahn in Zukunft teurer werden. Außerdem wird der Konkurrenzkampf mit der Straße zunehmen, wobei hier die fehlende Kapazität zu weiteren Herausforderungen für die Bahn führen kann.

3 Bewertung der Optimierungspotentiale

Ausgehend von den Erkenntnissen aus Kapitel 2 werden die in der Literatur sowie den Interviews genannten Optimierungspotentiale einander gegenübergestellt und im Anschluss eine Bewertung/Priorisierung der wesentlichen Potentiale durchgeführt.

3.1 Gegenüberstellung der Optimierungspotentiale

Zur besseren Übersicht sind in Tabelle 2 die Optimierungspotentiale aus der Literaturrecherche den in den Expert*inneninterviews genannten gegenübergestellt. Dabei zeigen sich durchaus unterschiedliche Ansätze und auch Punkte wie beispielsweise die Verlässlichkeit, die aus Praxissicht als sehr relevant genannt wurde, in der Literatur aber keine wesentliche Erwähnung findet.

Tabelle 2: Gegenüberstellung der Optimierungspotentiale

Optimierungspotentiale aus der Literaturrecherche	Optimierungspotentiale aus den Expert*inneninterviews
<p><u>Optimierung von Terminalabläufen</u></p> <p>Mittels mathematischer Modelle werden optimierte Gleiszuweisung und Containerhandling untersucht.</p>	<p><u>Vereinheitlichung von Anforderungen der Hafенbetreiber</u></p> <p>Es soll eine Vereinfachung der Prozesse für Spediteure im Umgang mit EU-Häfen erreicht werden.</p>
<p><u>Optimierung von (Re)routing und Ad-Hoc Routing</u></p> <p>Algorithmen werden verwendet, um die kostengünstigste bzw. schnellste Route für den Transport zu finden.</p>	<p><u>Verfügbarkeit/Ausbau von Kapazität und Alternativrouten</u></p> <p>Es sollte Kapazität ausgebaut und gegebenenfalls auch für Spot-Traffic freigehalten und ebenso eine bessere Baustellenkoordinaten fokussiert werden, damit nicht mehrere Korridore gleichzeitig blockiert sind.</p>
	<p><u>Steigerung der Verlässlichkeit</u></p> <p>Eine höhere Verlässlichkeit bezüglich Ladungsausfall und Liefertermin sind für Kund*innen wichtig.</p>

Optimierungspotentiale aus der Literatur-recherche	Optimierungspotentiale aus den Exper-ten*inneninterviews
<p><u>Entwicklung von Kund*inneninformations- und Live-Tracking Systemen</u></p> <p>Interoperables Informationsaustauschsystem zwischen allen Beteiligten für wichtige Informationen (z.B. Priorität der Fracht) und Track-and-Trace System für Kund*innen werden entwickelt.</p>	<p><u>Besserer Informationsfluss und Planbarkeit für Kunden*innen</u></p> <p>Verbesserte Planbarkeit des Vor- und Nachlaufs durch neue Informationen (estimated time of availability) sowie Live-Tracking Systeme sind von großem Interesse.</p>
	<p><u>Höhere Transparenz und Flexibilität</u></p> <p>Vor allem bezüglich Angebotslegung muss der Schienentransport einfacher, flexibler und transparenter werden.</p>
<p><u>Entwicklung der DAK in unterschiedlichen Detailgraden</u></p> <p>Von semi-automatisch bis hin zu vollautomatisch werden Varianten der DAK entwickelt und anhand von Nutzen/Aufwand bewertet.</p>	<p><u>Einfache und einheitliche technische Umsetzung der DAK</u></p> <p>Primär soll die DAK nicht zu komplex werden, es muss im Endeffekt eine funktionierende und einheitliche Variante sein.</p>

3.2 Bewertung und Priorisierung der Optimierungspotentiale

Aufbauend auf die Erkenntnisse aus den Expert*inneninterviews ergänzt um Aussagen aus der Literaturrecherche und eigene Abschätzungen im Projektteam wurde in weiterer Folge eine erste Einordnung der angesprochenen Optimierungspotentiale nach Nutzen und Aufwand vorgenommen. Dafür wurden die einzelnen Optimierungspotentiale nach beiden Kategorien auf einer Skala von 1 (gering) bis 10 (hoch) bewertet.

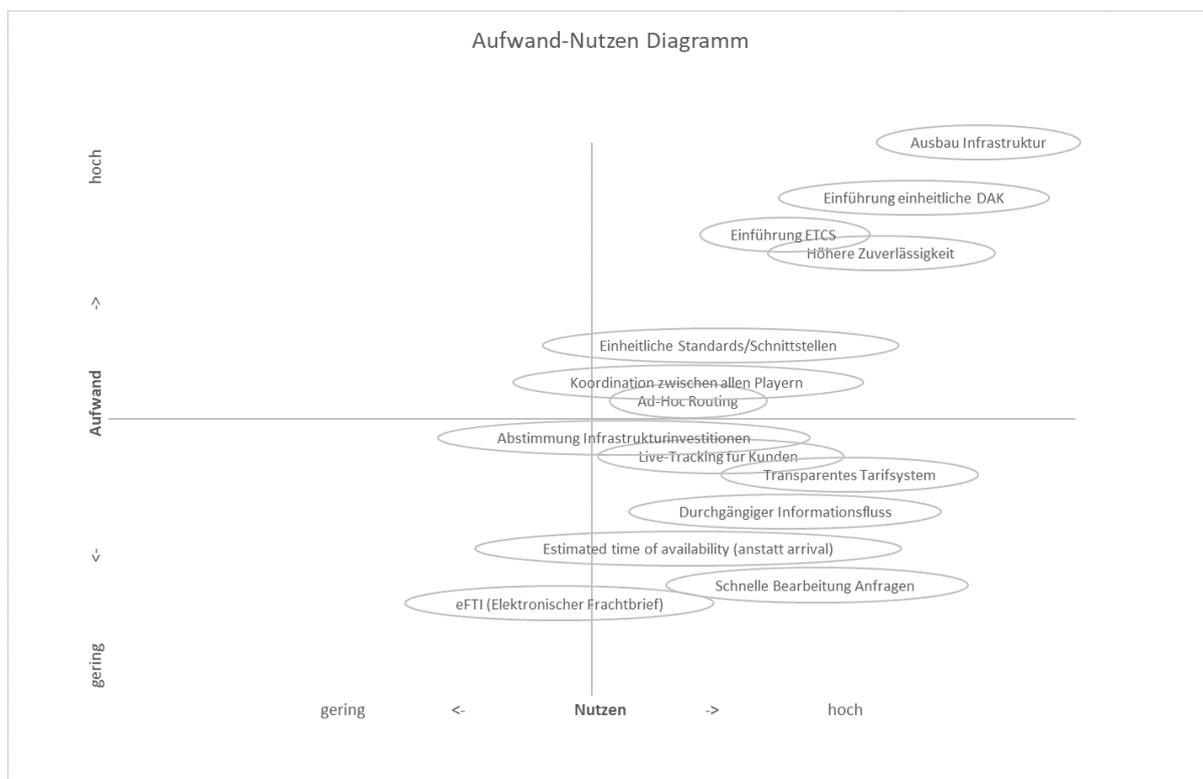


Abbildung 3: Aufwand-Nutzen Diagramm der Optimierungspotentiale

Das resultierende Aufwand-Nutzen Diagramm ist in Abbildung 3 dargestellt. Darin zeigt sich, dass insbesondere die Potentiale im unteren rechten Quadranten in einem ersten Schritt umgesetzt werden sollten, da sie bei relativ geringem Aufwand einen deutlichen Nutzen für die Steigerung des Güterverkehrsanteils auf der Bahn bringen können. Dazu gehören in erster Linie ein durchgängiger Informationsfluss und eine schnelle Bearbeitung von Anfragen seitens der Bahn.

Die Potentiale rechts oben im Diagramm sind vom Nutzen her die vielversprechendsten, allerdings auch mit hohem bis sehr hohem Aufwand verbunden, wie der Ausbau der Infrastruktur. Diese Punkte sollten daher mittel- bis langfristig in Angriff genommen werden.

4 Infrastrukturanalyse und Betriebssimulation

Aufgrund der hohen Bewertung des Themas Infrastrukturausbau hinsichtlich des Nutzens aber auch des Aufwands (siehe Kapitel 3) wurde im Rahmen einer Eisenbahnbetriebssimulation eine vertiefte Infrastrukturanalyse anhand mehrerer Use Cases durchgeführt, um zusätzliche Aussagen dazu ableiten zu können.

4.1 Betriebssimulation mittels OpenTrack

Bei Eisenbahnbetriebssimulationen handelt es sich um eine eisenbahnbetriebswissenschaftliche Methode zur Untersuchung der Leistungsfähigkeit. Typischerweise unterscheidet man dabei zwischen stochastischen und deterministischen Modellen. Als stochastische Modelle kommen analytische Modelle wie beispielsweise bedienungstheoretische und wahrscheinlichkeitstheoretische Ansätze zur Anwendung (VAKTHEL, 2002). Letzterer Ansatz könnte beispielsweise die Anwendung der Strele-Formel nach Schwanhäußer sein (SCHWANHÄUßER, 1974). Zu den stochastischen Ansätzen zählen ebenso Simulationsmodelle. Dabei kann zwischen synchronen und asynchronen Simulationen unterschieden werden (VAKTHEL, 2002). Bei asynchronen Simulationen werden die Züge nach ihrer Priorität eingelegt. Bei der Simulation von gestörten Fahrplänen werden die Sperrzeiten bei dieser Art jedoch nicht gebogen, sondern nur verschoben. Dies führt zu einer unrealistischen Abbildung des Betriebsablaufs. Bei synchronen Simulationen werden alle Züge gleichzeitig eingelegt. Die Betriebsabwicklung kann somit realistisch abgebildet werden. Es sind dazu jedoch hohe Rechenleistungen der Hardware erforderlich (MICHAELSEN, 2015).

Bei der Software OpenTrack handelt es sich um eine synchrone Simulation auf mikroskopischer Ebene (SCHÖBEL & SCHÖBEL, 2018). Daher wird an dieser Stelle beschrieben, welche Betrachtungsebenen üblich sind. Hauptsächlich sind mikroskopische und makroskopische Modelle zu finden. Bei mikroskopischen Modellen werden die Modelle gleisgenau dargestellt, das bedeutet, dass diese die exakten Infrastrukturdaten für jedes einzelne Element an den Strecken beinhalten (Gleislängen, Standorte von Signalen, Weichen, ...). Damit lassen sich Interaktionen zwischen Zügen ebenso wie die Belegungen von Gleisen realitätsgetreu abbilden. Im Gegensatz dazu sind makroskopische Modelle eine vereinfachte Abbildung. Sie bilden den Gleisbereich als Kante ab und die Bahnhöfe als Knoten. Diese werden zur langfristigen Verkehrsplanung genutzt und stellen beispielsweise nur die Anzahl der verkehrenden Züge dar. Es lässt sich daraus auch eine Fahrzeugumlaufplanung ableiten, aber es können keine exakten Fahrzeiten ermittelt oder Konflikte abgeleitet werden. Aus diesem Umstand heraus hat sich eine dritte Betrachtungsebene entwickelt, und zwar die mesoskopische Ebene, welche die Knoten detailliert darstellt, jedoch die Strecken als Kante abbildet (GILLE u. a., 2010). Abbildung 4 zeigt die Unterschiede zwischen den verschiedenen Betrachtungsebenen.

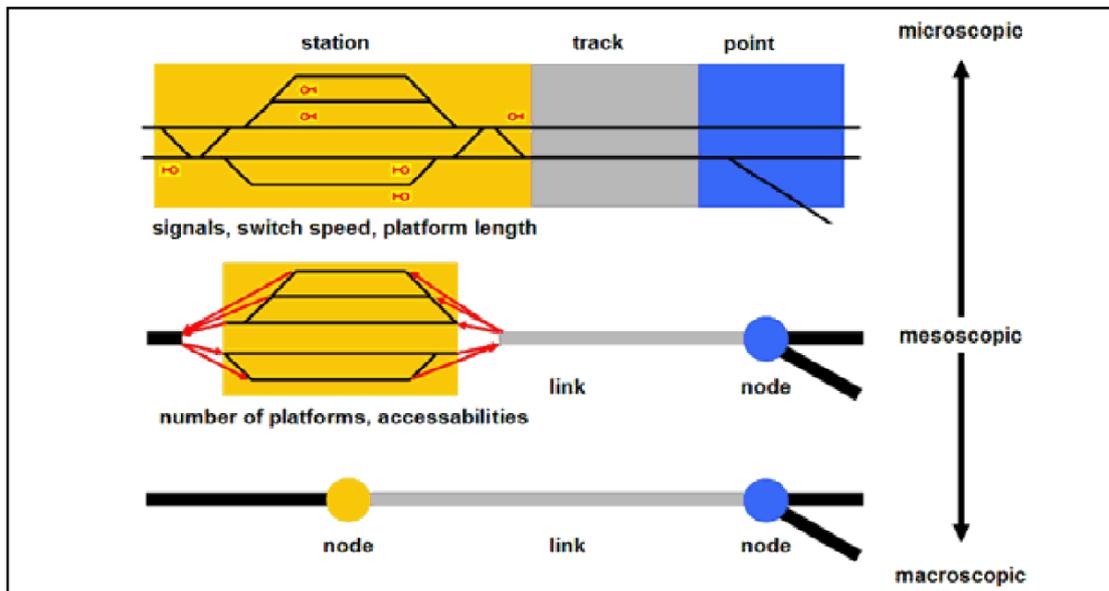


Abbildung 4: Detaillierungsgrad bei der Betrachtung von Modellen (GILLE u. a., 2010, S. 599)

Nachfolgend werden nun die erforderlichen Inputs einer Simulation erörtert. Diese sind grundsätzlich vergleichbar und basieren auf Daten zu Infrastruktur, Fahrzeug und Fahrplan. Abbildung 5 gibt eine Übersicht, welche Parameter die Hauptbestandteile einer Simulation bilden.

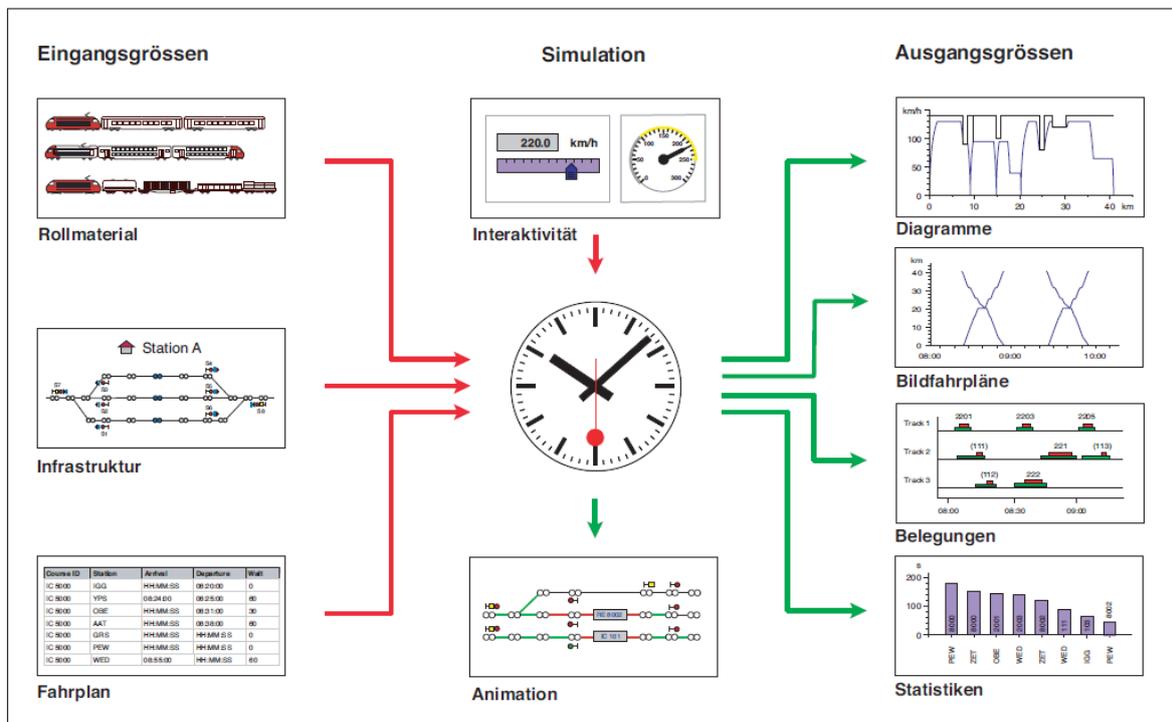


Abbildung 5: Hauptbestandteile einer eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Simulation (HÜLLMANN, 2017, S. 1)

4.1.1 Inputdaten

Als Inputdaten können streckenseitige und fahrzeugseitige Eingabeparameter unterschieden werden. Zusätzlich gehören zu den Inputdaten aber auch die Fahrplandaten, nach welchen die Züge verkehren.

4.1.2 Infrastrukturdaten

Die Infrastruktur wird wie bereits erwähnt mit Hilfe eines Knoten-Kanten Modells dargestellt. Dazu werden Doppelknoten verwendet. Bei jedem dieser Knoten ändert sich in der Regel etwas an den Kanteneigenschaften oder er hat eine besondere Bedeutung, wie zum Beispiel den Standort eines Signals. Abbildung 6 zeigt zur Verdeutlichung die Oberfläche von RailSys, wobei hier im Speziellen ein Fahrplan eines Zuges angezeigt wird mit den entsprechenden Halten, der benutzten Infrastruktur sowie einem Geschwindigkeits-Weg Diagramm und einem Bildfahrplan.

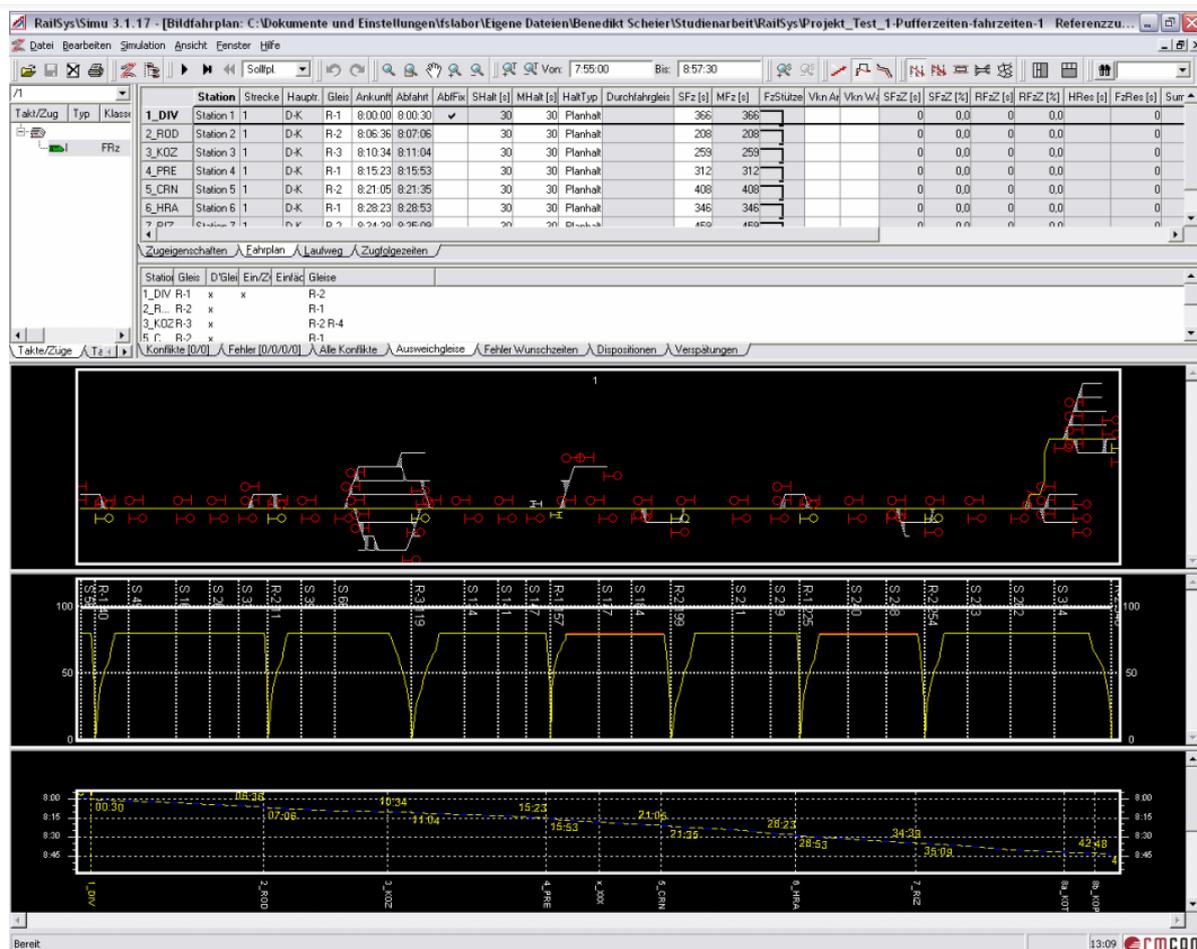


Abbildung 6: Arbeitsoberfläche von RailSys (SCHEIER, 2005, S. 17)

Für die Eingabe der Kantendaten sind neben der Länge auch die Neigung, die Radien und die Geschwindigkeit relevant. Außerdem kann definiert werden, ob diese sich in einem Tunnel befinden oder auf der freien Strecke. Die Knoten können neben einem Signal auch eine Weiche darstellen. Die für die Infrastruktur benötigten Daten können aus dem Verzeichnis örtlich zulässiger Geschwindigkeiten generiert werden. Für die Bahnhöfe sind außerdem die Lage-skizzen bzw. die Signallagepläne ein notwendiger Input. Daneben sind das Bogenverzeichnis und Abstecklagepläne von Vorteil.

4.1.3 Fahrzeugdaten

Um das Fahrverhalten der Triebfahrzeuge optimal abbilden zu können, ist es notwendig, diese mit ihren fahrdynamischen Eigenschaften abzubilden. Eingangparameter sind das Gewicht, die Länge über die Puffer, die maximale Geschwindigkeit und mehrere Hüllpunkte des Zugkraft-Geschwindigkeit (Z-V) Diagramms. Aus diesem lässt sich die maximale Zugkraft, die maximale Höchstgeschwindigkeit und auch die Begrenzung der Leistung ablesen. In Abbildung 7 ist ein typisches Z-V Diagramm der Baureihe 1016/1116 abgebildet. Es ist ersichtlich, wie die Zugkraft durch unterschiedliche Einflussfaktoren begrenzt ist.

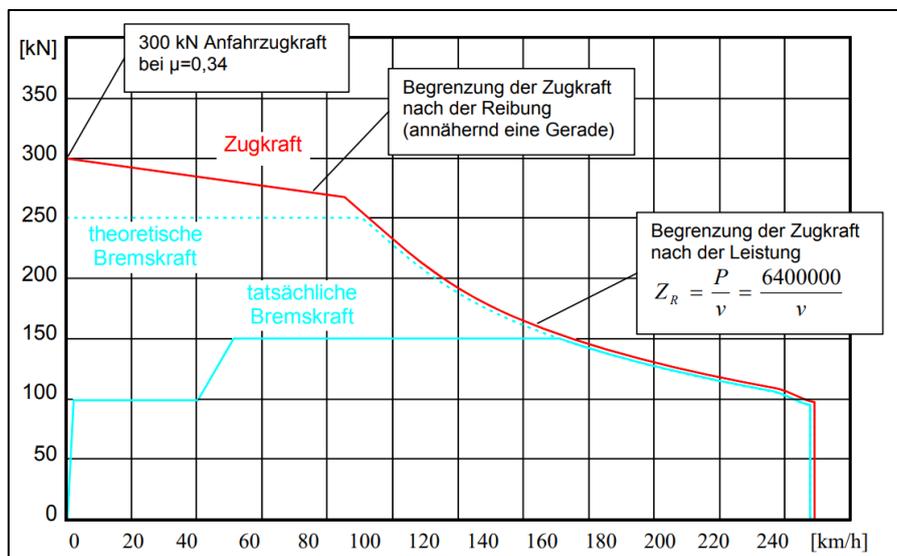


Abbildung 7: Z-V und B-V Diagramm einer ÖBB 1016/1116 (DIENDORFER, 2013, S. 46)

Außerdem ist für die Simulation relevant, mit welcher Antriebsart das Triebfahrzeug abgebildet wird (Elektrotriebfahrzeug, Dieselelektrisch, ...) und über welches Zugsicherungssystem es verfügt. Die für die Simulation erforderlichen Daten lassen sich aus den Triebfahrzeugdatenblätter errechnen (siehe z.B. ÖBB PRODUKTION AG, 2020). Dazu können Tools für das Berechnen der Z-V Diagramme herangezogen werden (siehe z.B. STROMMER, k.D.). Für die Widerstandsberechnung können die Strahl- und Sauthoff-Gleichungen herangezogen werden. Dabei wird die Strahl-Formel angewandt, um einen spezifischen Widerstand für eine bestimmte

Geschwindigkeit zu ermitteln, und über die Sauthoff-Formel lassen sich die spezifischen Widerstände für bestimmte Geschwindigkeiten mit einer bestimmten Anzahl von Wagen errechnen (Rochard & Schmid, 2000). Neben den Daten und der Anzahl der Triebfahrzeuge sind auch die Daten der Wagen einzufügen. Dazu wird neben der Anzahl der Wagen auch das Gewicht und die Länge benötigt.

Ein Modellzug könnte wie folgt aussehen:

- **Triebfahrzeug ÖBB 2070** (ÖBB PRODUKTION AG, 2020):
 - Länge über Puffer: 14,13m
 - Gesamtgewicht: 72t
 - Bremsgewicht Stellung: G 60t
- **12 Güterwagen Bauart Eanos** (DB CARGO AG, k.D.):
 - Länge über Puffer: 15,8m
 - Eigengewicht – leer: 24,45t
 - Gesamtgewicht - beladen: 80t (innerhalb Lastgrenze C)

4.1.4 Fahrplandaten

Als Fahrplandaten sind für die Simulation die geplanten Verkehrshalte, aber auch Betriebs halte und Durchfahrten von Relevanz. Allgemeiner gesprochen wird das Haltemuster für die jeweiligen Züge benötigt. Diese können für Personenzüge aus den entsprechenden Tabellenfahrplänen entnommen werden. Abbildung 8 zeigt einen in einem Fahrplanbearbeitungssystem (FBS) erstellten Tabellenfahrplan.

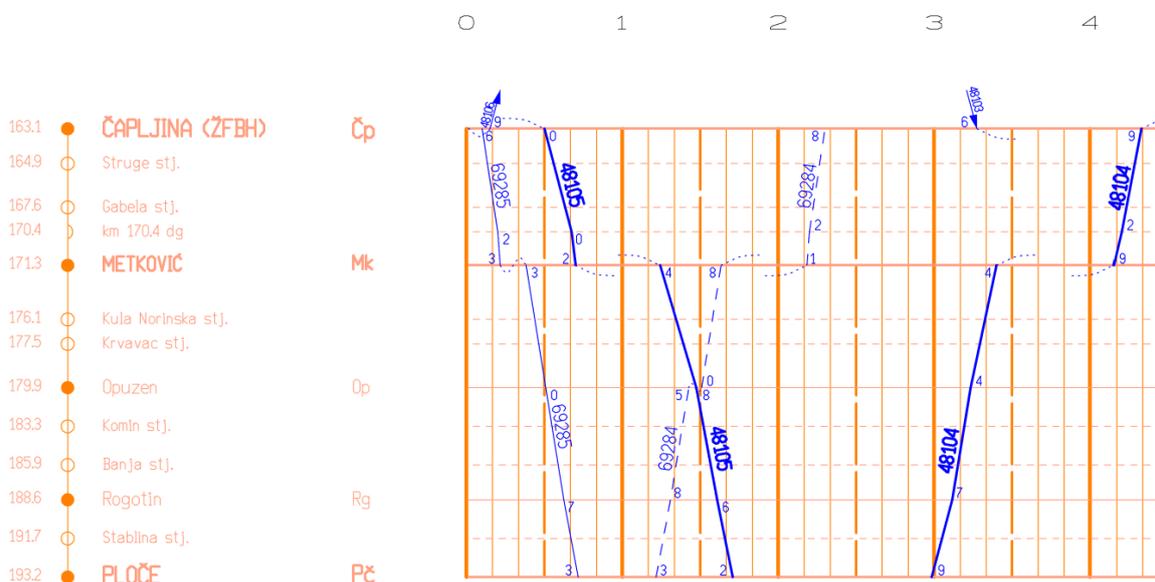


Abbildung 9: Beispiel für einen Bildfahrplan (HŽ INFRASTRUKTURE D.O.O., 2021)

Möchte man in der Simulation keinen bestehenden Fahrplan simulieren, sondern neue Züge planen, so sind entsprechende Fahrzeitüberschläge und Pufferzeiten entsprechend gängiger Vorgaben einzuhalten wie beispielsweise die Fahrzeitüberschläge gemäß UIC 451-1 (INTERNATIONALER EISENBAHNVERBAND, 2000).

4.2 Grundlagen und Konzeption

Wie angesprochen sollen mithilfe von Computersimulationen verschiedene Problemstellungen untersucht und damit Konflikt- bzw. Verbesserungspotential identifiziert werden. Konkret wird das Simulationsprogramm OpenTrack verwendet, welches zur Betriebssimulation von Eisenbahnstrecken und -netzen an der Eidgenössische technische Hochschule Zürich entwickelt wurde.

Als Grundlage werden zwei fiktive Strecken mit realitätsnahen Infrastrukturparametern definiert, wobei eine Strecke über ein, die andere über zwei Streckengleise verfügt. Im Weiteren wird die eingleisige Strecke als Single Track (ST-Line) und die zweigleisige Strecke als Double Track (DT-Line) bezeichnet. Dadurch soll eine Vielzahl an Szenarien dargestellt werden. Als geographischer Bezugsrahmen für die Problemstellungen sowie die gebräuchlichen Infrastrukturtopologien wird das Schienennetz in Österreich herangezogen. Um sowohl Personals als auch Güterverkehrsszenarien zu berücksichtigen, wird innerhalb der Simulation ein Werktag mit 24 Stunden betrachtet.

4.2.1 Grobcharakteristik der Infrastruktur

Beide Strecken werden als durchgehend elektrifiziert betrachtet. Neben der Elektrifizierung wird auch ein Gleiswechselbetrieb bei der DT-Line vorgesehen. Zusätzlich sollen beide Strecken über induktive Zugsicherung - punktförmige Zugbeeinflussung (PZB) - verfügen. Die Streckenhöchstgeschwindigkeit (V_{max}) soll auf der ST-Line 100 km/h und auf der DT-Line 160 km/h betragen. Die Bogenradien werden in dieser Simulation nicht berücksichtigt, die Gradienten sowie die Signal- bzw. Bahnstreckenabstände hingegen werden auf Grundlage der Referenzstrecken gewählt. Zur Darstellung umfangreicher Szenarien wird zudem eine Verknüpfung zwischen der ST-Line und der DT-Line vorgesehen.

4.2.2 Vorgesehener Fahrplan/Taktarten

Der Personenverkehr wird in Fern-, Regional- und Schnellbahnverkehr (nur auf der DT-Line) unterteilt. Die Angaben bezüglich Haltemuster beziehen sich auf die in Kapitel 4.2.4 definierte Bahnhofs- und Haltestellenklassifizierung.

Im Fernverkehr werden Triebfahrzeuge der Baureihe 1116 mit ÖBB Railjet Garnituren in einfacher Traktion gewählt. Diese halten in allen A-Bahnhöfen sowie großen B-Bahnhöfen. Auf der DT-Line wird ein Stundentakt gewählt, auf der ST-Line ein Zweistundentakt.

Der Regionalverkehr wird mit der Baureihe 4747 Typ Siemens Desiro ML-Cityjet in einfacher Traktion betrieben. Halte sind in allen A- sowie B-Bahnhöfen vorgesehen. Sowohl auf der ST-Line als auch der DT-Line ist ein Stundentakt geplant.

Im Schnellbahnverkehr wird die Baureihe 4747 Siemens Desiro ML-Cityjet ebenso in einfacher Traktion eingesetzt. Das Haltemuster ist so gewählt, dass diese Züge in sämtlichen Bahnhöfen und Haltestellen einen Verkehrshalt besitzen. Diese Züge verkehren jedoch nur auf der DT-Line im Halbstundentakt.

Der Güterverkehr wird anschließend anhand der verfügbaren Trassen implementiert. In der Fahrplangestaltung wird auch auf den Tagesverlauf Rücksicht genommen. Da in der Nacht kein Personenverkehr abgebildet wird, liegt hier das Hauptaugenmerk für den Güterverkehr.

In Abbildung 10 ist anhand einer Linientaktkarte der schlussendlich umgesetzte Fahrplan im Personenverkehr in der Simulation ersichtlich. Die Zahlenwerte stehen für die Abfahrtszeiten in jeder Stunde im Zeitraum zwischen 5 Uhr und 23 Uhr.

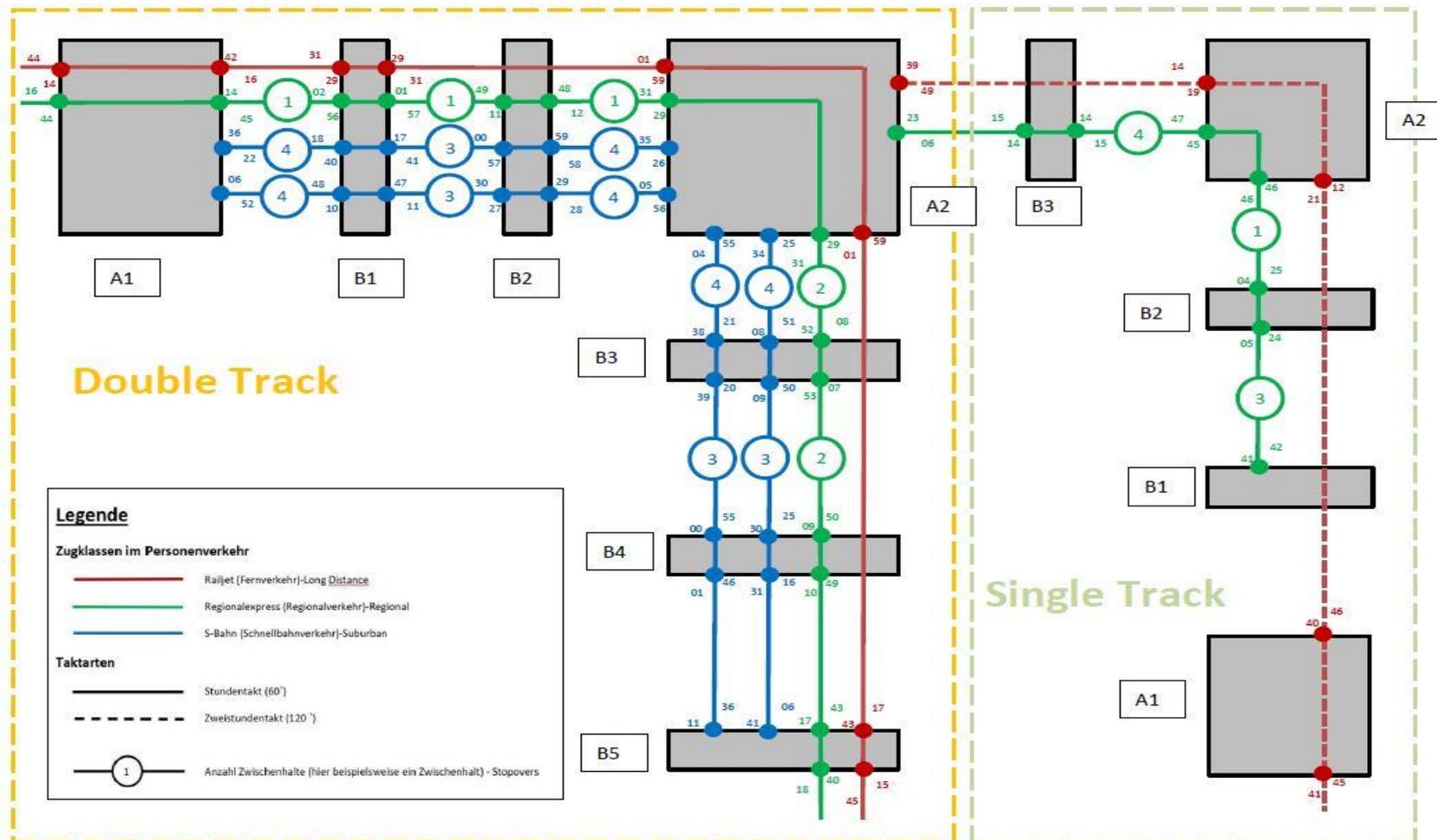


Abbildung 10: Linientaktkarte Personenverkehr

4.2.3 Referenzstrecken

Wie bereits erwähnt werden für die Simulation in diesem Projekt neue, fiktive Strecken definiert. Diese sollen aufgrund Vergleichbarkeit und Relevanz der Ergebnisse auf realitätsnahen Strecken- und Infrastrukturparametern aufbauen. Hierfür wurden im Vorfeld insgesamt vier Strecken im österreichischen Eisenbahnnetz analysiert und für die weitere Streckengestaltung in OpenTrack herangezogen. Datengrundlage bilden Informationen aus dem Verzeichnis der örtlich zulässigen Geschwindigkeiten und Besonderheiten (VzG) und Betriebsstellenbeschreibungen (Bsb). Zudem wurde insbesondere zur Gestaltung der Gleistopologie in den Bahnhöfen auf frei zugängliche Satellitenaufnahmen (Google Maps, OpenRailwaymap) zurückgegriffen.

Es wurden Informationen wie Signalabstände und Blocklängen erfasst. Zudem wurden Bahnhofsabstände und Häufigkeiten von weiteren betrieblich relevanten Punkten (z.B. Überleitstellen) ausgewertet. Diese Daten wurden anschließend zusammengeführt und daraus Mittelwertangaben z.B. bezüglich Blocklängen/Signalabständen berechnet. Weiters wurden Geschwindigkeits- und Gradientenangaben berücksichtigt. Diese Informationen werden im weiteren Verlauf zur Streckengestaltung der fiktiven Strecken verwendet (siehe Kapitel 4.2.4).

4.2.3.1 Referenzstrecke ST-Line

Für die ST-Line wird die Phyrnbahn (Streckenummer 204 01) als Referenz verwendet. Diese führt von Linz nach Selzthal. Dabei wurde der gesamte Abschnitt mit 104,77 km betrachtet.

4.2.3.2 Referenzstrecken DT-Line

Für die DT-Line wird die Südbahn (Streckenummer 105 01), welche von Wien Hbf nach Spielfeld-Straß verläuft, im Abschnitt zwischen Wien Liesing und Mürzzuschlag analysiert. Dieser Abschnitt weist 106,489 km auf. Neben dieser Strecke wird auch die Passauer Bahn (Streckenummer 205 01) im Abschnitt von Wels Hbf nach Passau analysiert. Der betrachtete Abschnitt beträgt 81,215 km. Als Besonderheit sei hier angemerkt, dass der betrachtete Abschnitt teilweise mit ETCS ausgestattet ist. Zusätzlich wird auch die Ostbahn, welche von Wien Hbf nach Hegyeshalom Grenze führt, untersucht. Dabei liegt der betrachtete Abschnitt im Bereich von Wien Zentralverschiebebahn nach Nickelsdorf und ist 60,794 km lang.

4.2.4 Streckenparameter

Die in Kapitel 4.2.3 genannten Strecken wurden anhand der VzG-Daten der jeweiligen Referenzstrecken genauer untersucht und im Folgenden beschrieben.

4.2.4.1 Blocklängen

Anhand der Streckenkilometrierung wurde der Abstand zwischen den Hauptsignalen ermittelt. Blockabschnitte auf der freien Strecke und im Bahnhof wurden jeweils separat voneinander betrachtet. Statistische Ausreißer bezüglich Blocklängen, wie beispielsweise durch lange Bahnhofsbereiche, wurden nicht in die weitere Betrachtung miteinbezogen. Anschließend wurde die mittlere Blocklänge für jede Referenzstrecke berechnet:

- *Blocklängen der freien Strecke:* Für die ST-Line ergibt sich auf der freien Strecke eine Mindestblocklänge von 1315 m, eine maximale Blocklänge von 6745 m und eine mittlere Blocklänge von 3305 m. Für die DT-Line beträgt die Mindestblocklänge 1078 m, die maximale Blocklänge 6244 m und die mittlere Blocklänge 2148 m.
- *Blocklängen innerhalb der Betriebsstellengrenzen (von Einfahr- bis Ausfahrtsignal):* Für die ST-Line ergibt sich in den Bahnhöfen eine Mindestblocklänge von 720 m, eine maximale Blocklänge von 1784 m und eine mittlere Blocklänge von 1186 m. Für die DT-Line beträgt die Mindestblocklänge 925 m, die maximale Blocklänge 2956 m und die mittlere Blocklänge 1638 m.
- *Überleitstellen (nur DT-Line):* Die Simulationsstrecke soll, wie im österreichischen Schienennetz gebräuchlich, im Gleiswechselbetrieb gestaltet werden. Dies bedeutet, beide Gleise sind signaltechnisch in beide Richtungen befahrbar. Um in der Simulation eine Vielzahl an Szenarien abbilden zu können, sollen ebenfalls Überleitstellen auf der freien Strecke implementiert werden. Hierfür wurden wiederum die Referenzstrecken betrachtet, um die Häufigkeit und Abstand solcher Überleitstellen vereinfacht zu erfassen.

Eine ausführliche Auflistung zu den Blocklängen findet sich als Ergänzung in Anhang A.

4.2.4.2 Bahnhofstopologien

Um möglichst realitätsnahe Simulationsbedingungen herstellen zu können, wurde auch die Bahnhofsinfrastruktur anhand der bereits zuvor genannten Recherchemethoden untersucht und in vier Kategorien klassifiziert. Hier wurden Infrastrukturmerkmale, wie beispielsweise Gleis- und Bahnsteiganzahl berücksichtigt. Die Klassifizierung reicht von Bahnhöfen der Kategorien A, B und C bis zu Haltestellen (Kategorie D).

Diese Herangehensweise wurde auf beiden Strecken (ST-Line und DT-Line) angewendet, wobei jedoch zwischen den Strecken differenziert wurde. Ein Bahnhof der A-Kategorie, welcher auf der ST-Line liegt, verfügt folglich nicht über dieselben Infrastrukturgegebenheiten wie ein A-Kategorie Bahnhof auf der DT-Line.

Im Folgenden werden die jeweiligen Bahnhofstypen näher beschrieben. Weitere Details wie die zugrundeliegenden Referenzbahnhöfe sowie die vereinfachten Gleispläne, bei denen nur die für die Simulation relevante Infrastruktur berücksichtigt wurde (z.B. Traktionsstützpunkte nicht dargestellt, Güterzug-Abstellgleise inkludiert), sind in Anhang B näher erläutert.

- *Bahnhof Kategorie A:* Dabei handelt es sich entweder um einen Grenzbahnhof oder einen Knotenbahnhof. Hier enden oder beginnen Zugfahrten. Als Referenzbahnhof für die ST-Line dient hier Jesenice (Grenzbahnhof Österreich/Slowenien). Auf der DT-Line dienen der Bahnhof Brenner (Grenzbahnhof Österreich/Italien) sowie der Bahnhof Kufstein (Grenzbahnhof Österreich/Deutschland) als Referenz. Beide sind Teil des Rail Freight Corridors (RFC) 3.
- *Bahnhof Kategorie B:* Bei Bahnhöfen der Kategorie B handelt es sich um größere Regionalbahnhöfe mit mehreren Bahnsteigen und verschiedenen Gleisen für den Güterverkehr. An diesen Betriebsstellen können Züge beginnen und enden. Als Referenzbahnhöfe für die ST-Line dient der Bahnhof Kirchdorf an der Krems und für die DT-Line der Bahnhof Parndorf.
- *Bahnhof Kategorie C:* C-Bahnhöfe sind Betriebsstellen mit minimaler Infrastruktur, welche für Kreuzungen bzw. Überholungen genutzt werden können. Als Referenzbahnhöfe für die ST-Line dienen Steyrling sowie Hinterstoder. Für die DT-Line dienen Riedau und Felixdorf als Referenzbahnhöfe.
- *Haltestelle Kategorie D:* Als Kategorie D werden Haltestellen ohne Kreuzungsmöglichkeiten auf der ST-Line bzw. Überholungsmöglichkeiten auf der DT-Line bezeichnet. Es ist vorgesehen, dass an diesen Haltestellen lediglich Personenverkehrszüge (PV-Züge) halten.

Für die jeweiligen Kategorien wurde auch überlegt, in welchem Abstand diese zu situieren sind. In Tabelle 3 sind vereinfachte Bereiche der Stationsabstände innerhalb der jeweiligen Stationskategorien ersichtlich. Diese sind jedoch lediglich als Richtwerte anzusehen und können für die Simulation auch abgeändert werden. Zudem ändern sich durch die Kombination der einzelnen Klassen die Abstände zwischen den Bahnhöfen.

Tabelle 3: Abstände Bahnhofskategorien

Strecke/Stationsart	A-A	B-B	C-C
ST-Line	100-200 km	30-60 km	5-20 km
DT-Line	100-200 km	20-50 km	10-20 km

4.2.5 Streckenkonzeption

Entsprechend der genannten Angaben konnte ein Schema an verschiedenen Bahnhofs- und Stationsfolgen erstellt werden.

4.2.5.1 ST-Line

Abbildung 11 zeigt die schematische Darstellung der Bahnhöfe auf der ST-Line. Abbildung 12 gibt ebendiese in OpenTrack in der mikroskopischen Darstellung wieder.

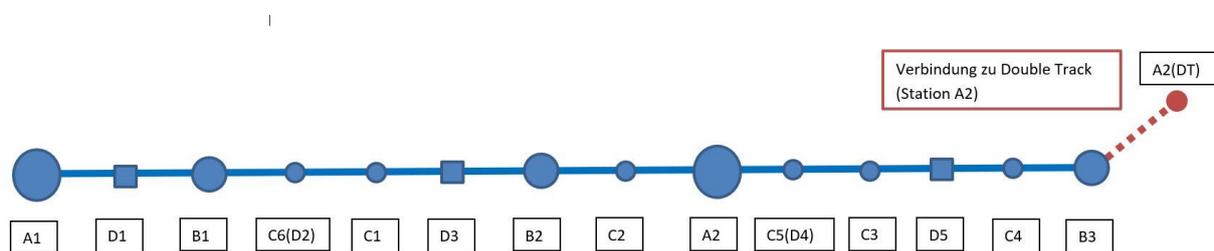


Abbildung 11: Schematische Darstellung der ST-Line

Als Systemgrenze wurde die Strecke beginnend mit einem A-Bahnhof gestaltet, um genug Infrastrukturkapazitäten (z.B. Bahnsteiggleise) zur Verfügung zu stellen, da an den Systemgrenzen betrieblich die Züge beginnen und enden. Die Streckenkilometrierung beginnt im Bahnhof A1 bei Kilometer 0,0 und endet mit Kilometer 127,3 im Bahnhof B3. Kreuzungsmöglichkeiten sind in jedem Bahnhof vorhanden (A, B, C), wobei der Bahnhof A2 als Knotenpunkt der Strecke angesehen werden kann. Als weitere Systemgrenze der ST-Line wird der Bahnhof B3 definiert. Die Strecke wird anschließend verlängert und mit der DT-Line verbunden, worauf in Kapitel 4.2.6 näher eingegangen wird.

Grundsätzlich wurden alle Bahnhofsgleise mit eigenen Ausfahrtsignalen ausgestattet, Gruppensignale sind keine vorgesehen. Auf der offenen Strecke wurde mit Haupt- sowie Vorsignalen gearbeitet. Die Blockunterteilung der freien Strecke wird nachfolgend näher erläutert:

- **Bahnhofsabstände:** Diese sind auch entsprechend der Referenzstrecken gestaltet. In Anhang C – Details der ST-Line können die Kilometrierungen und relativen Entfernungen der Bahnhöfe und Haltestellen entnommen werden. Bei den Bahnhöfen C5 und C6 ist anzumerken, dass diese erst im weiteren Verlauf der Simulation in OpenTrack von einer Haltestelle ohne Ausweichmöglichkeit zu einem Bahnhof geändert wurden. Die Notwendigkeit wurde während der Erstellung des gewünschten Fahrplans ersichtlich.
- **Blocklängen:** Wie in Kapitel 4.2.3 ersichtlich, beträgt der mittlere Abstand zwischen zwei Blocksignalen (=Blocklänge) 3305 m. Für die Simulationsstrecke wurde dies als Anhaltswert verwendet, wobei innerhalb des Bereiches 1,5 km bis 7 km abweichende Blocklänge konzipiert wurden.

Seitens OpenTrack war hier eine simulationstechnische Eigenheit zu berücksichtigen. Aufgrund der Eingleisigkeit der Strecke muss verhindert werden, dass gleichzeitig zwei Züge aus unterschiedlichen Richtungen in denselben eingleisigen Abschnitt einfahren und sich in weiterer Folge gegenseitig blockieren (auch als Deadlock bekannt). Hierfür wurden die Blöcke entlang der Strecke miteinander verknüpft (siehe *Reserve with previous Routes* in Abbildung 35 in Anhang C), sodass ein Zug automatisch die vorausliegenden Blöcke ebenfalls reserviert und eine Einfahrt des Gegenzuges verhindert. Dies ist auch auf zweigleisigen Strecken für Blocksignale anzuwenden, auf denen in der Regel Richtungsbetrieb herrscht, wobei ein nachfolgender Zug in dieselbe Richtung den vor ihm liegenden Blockabschnitt befahren kann, sobald der vorfahrende Zug ebendiesen verlassen hat und das Freisein des Blockabschnittes durch die Gleisfreimeldeanlage bestätigt ist. Abbildung 13 zeigt den eingangs beschriebenen Konflikt, welcher ohne *Reserve with previous Routes* zum Deadlock führen würde.

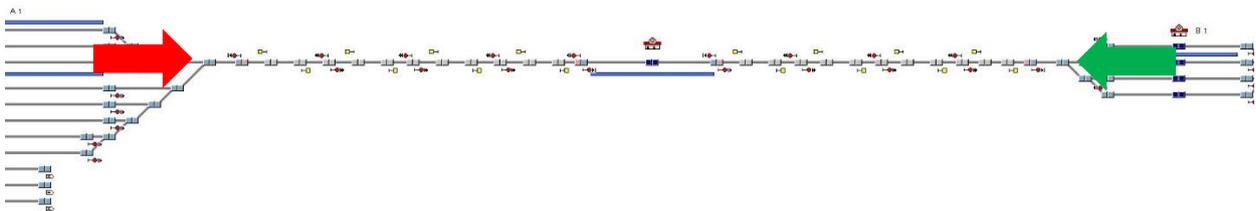


Abbildung 13: Mögliche Konflikte auf ST-Line

- *Slow Speed Zones*: Für durchgehende Hauptgleise wurde kein Geschwindigkeitsbruch vorgesehen, bei Fahrten auf weiteren Bahnhofsgleisen wurde vereinfacht eine Maximalgeschwindigkeit von 40 km/h für das Befahren der Weichen in Ablenkung vorgegeben, wie es in Österreich auch teilweise angewendet wird. Somit ergeben sich „Slow-Speed Zones“, welche bei Ausfahrten aus dem Bahnhofsbereich diese Geschwindigkeiten vorgeben, bis der Zugschluss das Ende des Weichenbereichs erreicht hat (siehe Abbildung 14).

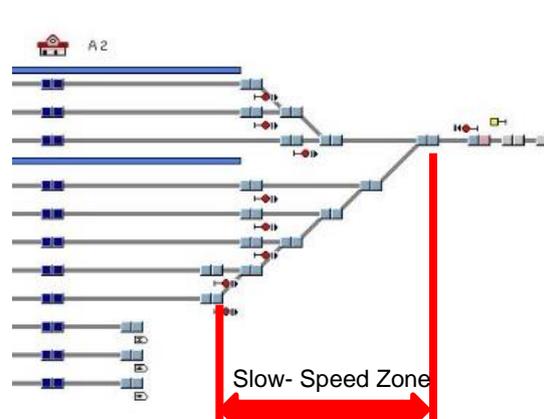


Abbildung 14: Slow Speed Zones (OpenTrack)

- *Geschwindigkeitsprofil:* Die allgemeine Streckenhöchstgeschwindigkeit beträgt 100 km/h, wobei für realitätsnahe Bedingungen Geschwindigkeitsbrüche vorgesehen wurden. Details dazu sind Anhang C (Abbildung 36) zu entnehmen.
- *Neigungsprofil:* Die häufigen Neigungsänderungen der Strecke sind unter anderem durch die Definition Österreichs als geographischen Referenzbereich begründet. Details zum Gradientenprofil finden sich ebenfalls in Anhang C (Abbildung 37).

4.2.5.2 DT-Line

Abbildung 15: Schematische Darstellung der DT-Lin zeigt die schematische Darstellung der Bahnhöfe auf der DT-Line. In Abbildung 16: DT-Line (OpenTrack) ist ebendiese in OpenTrack in der mikroskopischen Darstellung wiedergegeben.

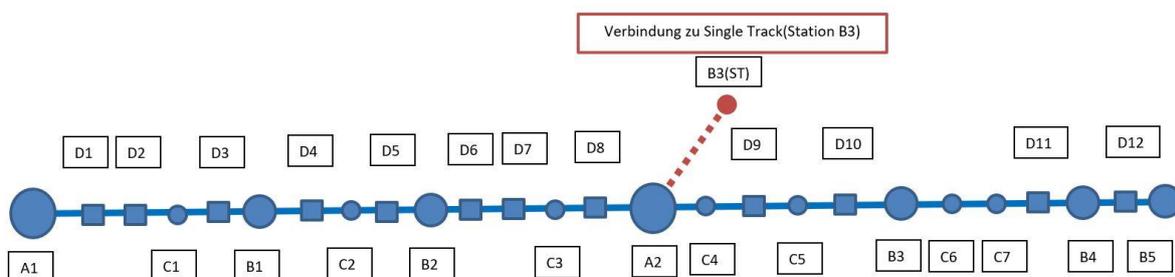


Abbildung 15: Schematische Darstellung der DT-Line

Als Systemgrenze werden ebenfalls ein A-Bahnhof sowie ein B-Bahnhof verwendet. Die Kilometrierung beginnt im Bahnhof A1 bei Kilometer 0,0 und endet in B5 bei Kilometer 153,0. Der Bahnhof A2 fungiert als Knotenpunkt und liegt ca. in der Hälfte der Strecke. Zudem wird in diesem Bahnhofsbereich die ST-Line eingebunden.

Bezüglich Signalisierung wurden dieselben Bedingungen wie im ST-Line Abschnitt angewendet. Die Strecke wird, wie bereits erwähnt, im Gleiswechselbetrieb betrieben und folglich werden beide Streckengleise in beide Richtungen signalmäßig ident ausgestattet.

Nachfolgend werden einzelne Aspekte der DT-Line näher beschrieben, wobei in manchen Bereichen idente Annahmen zur ST-Line getroffen wurden:

- *Bahnhofsabstände:* Die Bahnhofsabstände auf der DT-Line sind ebenfalls entsprechend der Referenzstrecken gestaltet. Bei den Bahnhöfen C5 und C6 ist anzumerken, dass diese erst im weiteren Verlauf der Simulation in OpenTrack von einer Haltestelle ohne Ausweichmöglichkeit zu einem Bahnhof geändert wurden. Die Notwendigkeit wurde während der Erstellung des gewünschten Fahrplans ersichtlich. In Anhang C – Details der ST-Lin finden sich Details zu den Kilometrierungen und relativen Entfernungen der Bahnhöfe und Haltestellen.

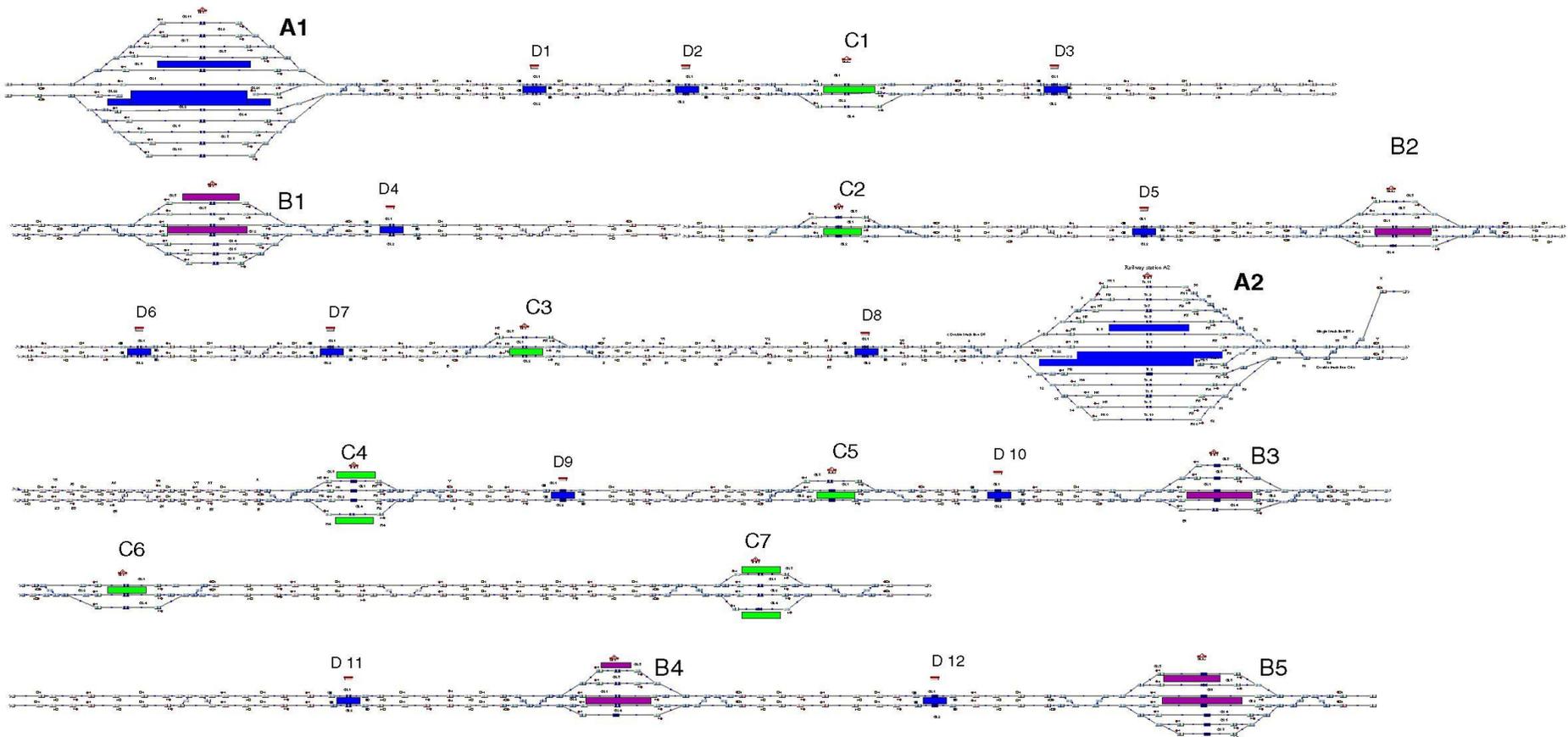


Abbildung 16: DT-Line (OpenTrack)

- *Blocklängen:* Der mittlere Signalabstand auf freier Strecke beträgt auf den Referenzstrecken 2148 m, wobei wiederum innerhalb 1400 m und 5500 m variiert wurde. Zusammen mit der Variation der Bahnhofsabständen sollte durch die unterschiedlichen Blocklänge auch die Bereiche in urbanen Raum mit engeren Abständen und höhere Bahnhofsichte und ländlichen Raum mit größeren Distanzen differenziert werden.
- *Überleitstellen:* Aufgrund der Zweigleisigkeit und des Gleiswechselbetriebs wurden hier zudem Überleitstellen auf freier Strecke vorgesehen. Dies ermöglicht eine flexiblere Betriebsführung und erhöht die Anzahl an möglichen Simulationsszenarien.
- In Bezug auf Überleitstellen wurden die höheren Geschwindigkeiten auf der offenen Strecke berücksichtigt und folglich die Länge der Weichenverbindungen erhöht. Für die Simulation wurden jedoch weiterhin passive Annahmen bezüglich zulässiger Geschwindigkeiten ($V_{\max} = 60 \text{ km/h}$) in den Überleitstellen getroffen.
- *Geschwindigkeitsprofil:* Die Streckenhöchstgeschwindigkeit wird aufgrund der Verwendung von PZB auf 160 km/h begrenzt, wobei analog zur ST-Line Geschwindigkeitsbrüche eingebaut wurden. Ein Geschwindigkeitsprofil der DT-Line ist in Anhang C ersichtlich.
- *Neigungsprofil:* Beim Neigungsprofil wurde von einer vielbefahrenen Hauptstrecke in tendenziell flacheren Gebieten ausgegangen. Man kann also davon ausgehen, dass die Lage der Strecke eher in Ostösterreich anzusiedeln ist. Im Voralpenraum beziehungsweise auf Bergstrecken würden sich deutlich mehr Neigungen finden. Dies wiederum wirkt sich auf die Anfahr- und Bremsvorgänge aus, was einerseits zu höherem Energieverbrauch führt, aber auch die Beschleunigung von schweren Güterzügen an sich verlängern würde. Das Neigungsprofil der DT-Line ist ebenfalls Anhang C zu entnehmen.

4.2.6 Verbindungsstrecke ST/DT-Line

Zur Erhöhung der möglichen Szenarien sollen in der Simulation die beiden fiktiven Simulationsstrecken miteinander verbunden werden. Dafür wird die ST-Line an einem Ende verlängert und mit dem Bahnhof A2 auf der DT-Line verknüpft. Dieser Verknüpfungsstrecke ist eingleisig und mündet im Bahnhofsbereich direkt in ein Einfahrgleis der zweigleisigen Strecke ein.

Abbildung 17 zeigt ebendiese Verknüpfung in schematischer Form. In der Realität könnte diese Verknüpfung jedoch unterschiedlich ausgestaltet sein, beispielsweise könnte die ST-Line im letzten Abschnitt bereits zweigleisig ausgeführt sein und die Einbindung in die DT-Line niveaufrei erfolgen oder eben nur über eine Weiche, welche von der DT-Line abzweigt und eingleisig Richtung Bahnhof B3 verläuft. Daher ist an dieser Stelle die Darstellung mittels makroskopischer Ansicht nicht genügen aufschlussreich.

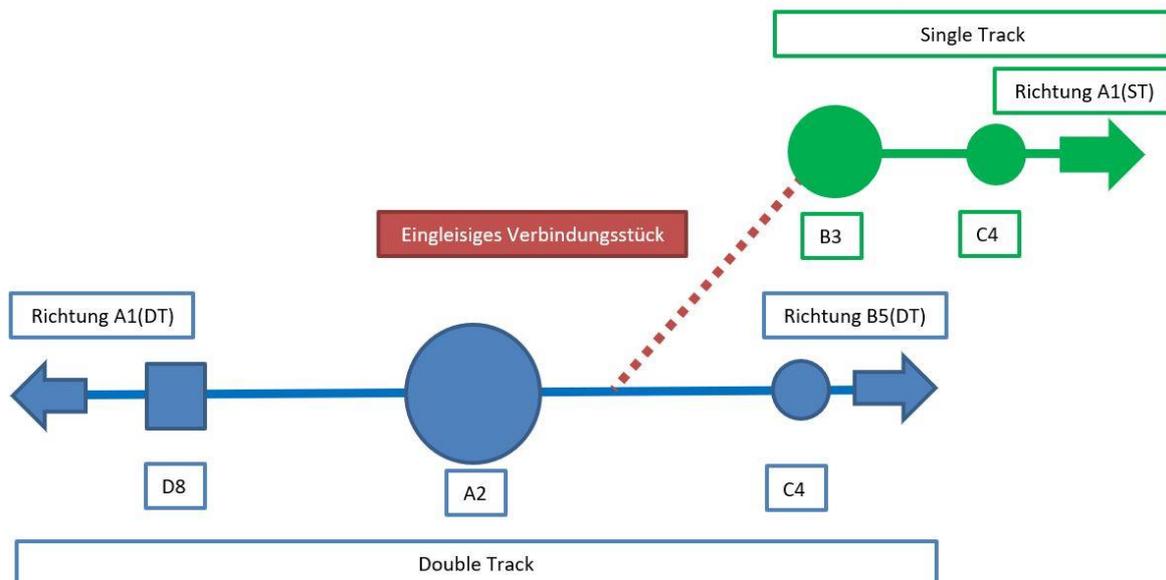


Abbildung 17: Schematische Darstellung der Verknüpfung ST/ DT-Line

Um diesem Fakt entgegenzuwirken, wird eine mikroskopische Ansicht ergänzt, welche aus der Simulationssoftware OpenTrack entnommen ist. In Abbildung 18 wird so deutlich, wie die Verknüpfung der beiden Strecken im Detail durchgeführt wurde.

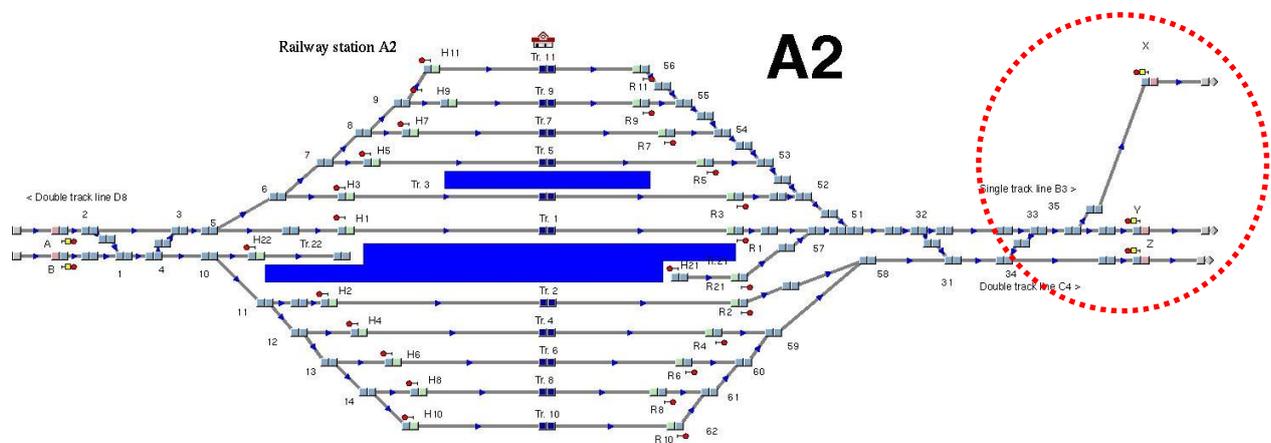


Abbildung 18: Verknüpfung ST/DT-Line (OpenTrack)

4.3 Fahrplanvarianten

Gemäß den erstellten Anforderungen für den Personenverkehr wurde ein Fahrplan in der Simulation erstellt. Die entsprechende Linientaktkarte ist in Abbildung 10 ersichtlich. Zur besseren Verständlichkeit soll jedoch kurz nochmal zusammengefasst werden, welche Takte im Personenverkehr eingepflegt wurden. Zusätzlich wird an dieser Stelle jedoch bereits der Güterverkehr implementiert. Die Fahrplanerstellung wurde in diesem Projekt in zwei Phasen eingeteilt, die Entwurfs- und Planungsphase sowie die Simulationsphase. In letzterer wurden die erstellten Fahrpläne auf Robustheit bzw. Fahrbarkeit getestet und notwendige Änderungen durchgeführt. Änderungen sind an dieser Stelle als Verschieben der jeweiligen Zugtrasse im Bildfahrplan zu verstehen. Es können jedoch auch zusätzliche Halte zur Überholung oder Kreuzung angeordnet werden ebenso wie die Wahl eines alternativen Bahnhofsgleises im Güterverkehr. Im Personenverkehr wurde auf außerplanmäßige Bahnsteigwechsel verzichtet. Diese sind nicht nur für Kund*innen unangenehm, sondern auch aufgrund der limitierten Anzahl an Bahnsteigen schlicht nicht an jedem Bahnhof oder jeder Haltestelle möglich.

4.3.1 Fahrplanerstellung

In der ersten Arbeitsphase wurde für das Modell der DT-Line ein neuer Fahrplan entworfen und hinsichtlich der folgenden Anforderungen validiert:

- Personenverkehr
 - Stundentakt des Fernverkehrs (RJ - Railjet) mit symmetrischem Knoten in A2 um 00 und Halt in A1, A2 und B1
 - Stundentakt im Regionalverkehr - REX (Regionalexpress) mit Halt in allen Bahnhöfen A und B mit Taktknoten um 30 in A2

- Halbstündlicher S-Bahn-Takt, wobei diese als Zubringerzug fungiert (bringt die Fahrgäste zum REX/RJ) um 55/25 und Abfahrt 05/35 und Halt in allen Stationen
- Güterverkehr
 - Güterzüge jede Stunde und Richtung

Für das Modell der ST-Line wurde der Fahrplan unter Berücksichtigung folgender Anforderungen entworfen und validiert:

- Personenverkehr
 - Zwei-Stunden-Takt des Fernverkehrs mit Zielbahnhof in DT-A2 und Ausgangsbahnhof in ST-A1.
 - Stundentakt im Regionalverkehr mit Ausgangsbahnhof in ST-B1 und Endbahnhof in DT-A2.
- Güterverkehr
 - Zweistundentakt im Güterverkehr je Richtung und zusätzlich ein weiterer Güterzug in eine der beiden Richtungen alle zwei Stunden möglich

4.3.2 Problemanalyse

Basierend auf der durchgeführten Simulation ergab sich in Arbeitsphase 2 weiterer Handlungsbedarf. Insbesondere durch das Einfügen von Güterverkehrstrassen wurden verschiedene Probleme ersichtlich. Die Analyse der Simulationsergebnisse nach der Einführung zeigte bestimmte Probleme in der bestehenden Infrastruktur und deren Nutzung auf. Somit konnte durch Veränderungen im Fahrplan und geringfügige Anpassungen an der Infrastruktur bzw. der Fahrstraßen kontinuierlich an der Verbesserung gearbeitet und die festgestellten Probleme erfolgreich beseitigt werden. Während dieses Kreislaufprozesses wurden folgenden Maßnahmen ergriffen:

- Im westlichen Weichenkopf des Bahnhofes ST-A2 wurde eine Doppelkreuzungsweiche hinzugefügt. Dies wurde durchgeführt, um eine unnötig lange Belegung von Infrastrukturabschnitten zu vermindern. Dadurch konnten die Züge für die Einfahrt beide Gleise gleichzeitig nutzen.
- Es wurde ein neuer Fahrplan für den Güterzug 73000 erstellt, sodass dieser im Bahnhof DT-C6 auch das dritte Gleis anstatt nur dem ersten Gleis benutzen kann.
- Eine Analyse ergab, dass einige Regionalzüge mit geraden Zugnummern ab dem Bahnhof ST-B3 vermehrt Verspätungen aufwiesen. Der Grund hierfür konnte in der verlängerten Wartezeit bei der Kreuzung mit Gegenzügen gefunden werden. Im Konkreten handelt es sich dabei um die Kreuzungen mit den Güterzügen ungerader Zugnummern (GV 7800x) im Bahnhof ST-B3. Daher wurde die Kreuzung mit ebendiesen

Zügen in den Bahnhof ST-C3 verlegt. Dazu wurde in den Fahrplan der Güterzüge eingegriffen und der Fahrplan der vertakteten Regionalzüge beibehalten.

- Der Laufweg der Züge GV 79002, 79004, 79006 sowie 79008 wurde abgeändert. Diese Züge nutzten daraufhin im Bahnhof B1 das erste Gleis anstelle des fünften Gleises. Das fünfte Gleis war zuvor durch andere Güterzüge der Zugnummernreihe GV 7800x belegt. Auf diese Weise wurde die Verspätung dieser Züge nicht mehr auf andere Züge, insbesondere des Personenverkehrs, übertragen. Somit konnte die Pünktlichkeit der Fernverkehrszüge und Regionalzüge gesteigert werden, wobei die Verbesserung insbesondere Railjet Züge mit ungerader Zugnummer aber auch Regionalexpress Züge betrifft.
- Die Laufwege aller Regionalzüge mit geraden Zugnummern (5000, 5002, 5004, ...) wurden angepasst. Diese benutzten daraufhin in C-Bahnhöfen durchgehende Streckengleise sofern vorhanden.
- Ein neuer Laufweg für Güterzüge mit ungeraden Zugnummern (78001, 78003, ...) wurde erstellt. Daraufhin benutzten sie in DT-C6 Gleis 3 statt Gleis 1, wo diese Züge auf die geradzahligen REX-Züge (5004, 5008, 5012...usw.) warteten. Zusätzlich wurde eine neue Fahrplanverbindung für diese Güterzüge eingefügt, so dass die Kreuzung von Güter- und REX-Zügen von C1 nach C6 verlegt wurde, um Verspätungen im Ausmaß von 441 Sekunden der Regionalzüge zu vermeiden. In diesem Szenario hatten die Regionalzüge mit Ursprungsbahnhof im ST-B1 kurz nach diesen Kreuzungen eine anfängliche Verspätung von 360 Sekunden, die jedoch sehr bald wieder vollständig aufgeholt wurde, da diese Züge ohnehin im Bahnhof B2 auf Kreuzungen mit RJ-Zügen warten mussten.
- Die Fahrpläne aller RJ-Züge mit geraden Nummern wurden in Bahnhof DT-C5 geändert. Daraufhin benutzten diese Züge das erste Gleis anstelle des dritten Gleises. Auf diese Weise konnte die Simulation realistischer gestaltet werden.
- Die Fahrpläne aller REX-Züge wurden generell geändert, so dass sie nicht mehr ohne triftigen Grund andere Gleise als das Hauptgleis benutzten, um Bahnhöfe zu passieren. Auf diese Weise fuhren die Züge effizienter und die Simulation wurde realistischer.

Die Erstellung des Grundfahrplans wurde in der ersten Arbeitsphase unter schlechten Adhäsionsbedingungen durchgeführt, so kann zu jeglichen Bedingungen der Grundfahrplan sichergestellt sein. Die darauf aufbauende Arbeitsphase 2 wurde in weiterer Folge unter normalen Adhäsionsbedingungen simuliert.

4.3.3 Fazit des Fahrplans

Bei der detaillierten Betrachtung des Fahrplans zeigt sich, dass bereits bei einem relativ überschaubaren Personenverkehrstakt die freien Trassen für Güterzüge begrenzt sind. Anzumerken ist, dass in den gewählten Modellzügen insbesondere auf der ST-Line kein markanter Geschwindigkeitsunterschied zwischen dem Güter- und Personenverkehr besteht. Auf der DT-Line ist dieser Unterschied größer, jedoch wird auch hier durch die vermehrten Halte besonders im S-Bahn Verkehr eine sich annähernde Durchschnittsgeschwindigkeit erreicht.

Trotz alledem handelt es sich um einen Mischverkehr mit unterschiedlichen Haltemustern. Dies soll in einer vertiefenden Betrachtung noch genauer analysiert werden. Dabei wird untersucht, welche Auswirkungen die Interaktion zwischen einem Personenzug und einem Güterzug in Bezug auf die Fahrzeit und den Energieverbrauch hat.

Es kann also subsumiert werden, dass trotz verschiedener Ansätze im Personenverkehr wenig Trassen für den Güterverkehr vorhanden sind. Die theoretischen vier bis fünf Güterzugtrassen pro Richtung und Stunde auf der DT-Line, bzw. alle zwei Stunden ein Güterzug je Richtung auf der ST-Line inklusive einem zusätzlichen alle zwei Stunden in eine der Richtungen sind daher als eher theoretischer Richtwert zu verstehen. Diese sind insbesondere in der Realität nicht fahrbar, da es gerade im Güterverkehr zu stärkeren Fahrplanabweichungen als beim Personenverkehr kommt.

Die Simulation des 24-Stunden Werktags hat daher gezeigt, dass der Fahrplan deutlich robuster erscheint, wenn die Anzahl der fix verplanten Trassen reduziert wird und dadurch mehr Möglichkeiten für Ad-hoc Verkehre beziehungsweise für verspätete Güter- oder Personenverkehrszüge besteht. Diese Möglichkeit bleibt jedoch limitiert, weshalb konkludiert werden kann, dass ohne zusätzliche Infrastrukturmaßnahmen, insbesondere entsprechend kurze Blocklängen und Ausweichgleise, nur in beschränktem Ausmaß Verkehr auf der vorhandenen Infrastruktur gesteigert werden kann.

4.4 Szenarien

Neben den verschiedenen Varianten bzw. Simulationsanalysen im Zuge der Fahrplanentwicklung wurden drei weitere Szenarien im Detail getestet. Diese konnten aus den allgemeinen Simulationen abgeleitet werden, da sich beispielsweise Schwachpunkte an verschiedenen Stellen der Infrastrukturgestaltung aufzeigten - Schwachpunkte, welche durchaus in der Realität vorkommen und entsprechend auch in regulären Eisenbahnbetrieb zu Einschränkungen führen, sofern eine gewisse Anzahl an Zügen erreicht wird. Es sei an dieser Stelle auch noch auf die Wartezeitenfunktion in Bezug auf das Level-of-Service hingewiesen. Dort zeigt sich auch der Zusammenhang mit steigender außerplanmäßiger Wartezeit bei einem Anstieg der Zugfahrten in einem Untersuchungsraum (BÜKER, 2013).

Die drei gewählten Szenarien stachen deshalb hervor, da diese insbesondere zur Verkehrsverlagerung einen hohen Stellenwert haben können. Dazu zählt die Einbindung von Nebenstrecken in einen Knotenbahnhof, die Anordnung von Kreuzungsbahnhöfen auf eingleisigen Strecken, sowie Güterzugüberholungen durch den Personenverkehr. Diese drei Szenarien stellen somit Problematiken dar, welche auf verschiedenen realen Strecken bzw. Eisenbahnnetzen auftreten können. Insbesondere jenes Beispiel mit der Güterzugüberholung hat einen direkten Einfluss auf die Qualität des Verkehrs. So wird es für einen Auftraggeber weniger attraktiv sein, wenn ein Güterzug auf einem Abschnitt von ca. 100 km mehrmals von Personenzügen überholt wird. Dadurch entsteht neben erhöhten Energiekosten schlichtweg eine längere Fahrzeit, welche auch zum Teil unplanbar ist.

Für die verschiedenen Szenarien wurde unterschiedliches Rollmaterial verwendet. Tabelle 4, Tabelle 6 sowie Tabelle 7 zeigen das Rollmaterial im Detail. Im Szenario der Güterzugüberholung wurde zudem ein Güterzug kurz getestet. Dieser ist in

Tabelle 5: Beschreibung Güterzug kurz ersichtlich.

Tabelle 4: Beschreibung Güterzug

Güterzug				
Art	Name	Anzahl	Gewicht [t]	Länge [m]
Triebfahrzeug	1116	1	88	20
Wagen	2582	30	86	17
Gesamtzug		31	2668	530
Höchstgeschwindigkeit	Beschleunigung	Verzögerung	Bremshundertstel	
100 km/h	3 m/s ²	0,6 m/s ²	100%	
				
<p><i>Güterzug mit Triebfahrzeug der ÖBB-Baureihe 1116. Foto: © Adrian Wagner</i></p>				

Tabelle 5: Beschreibung Güterzug kurz

Güterzug (kurz)				
Art	Baureihe	Anzahl	Gewicht [t]	Länge [m]
Triebfahrzeug	1116	1	88	20
Wagen	2582	13	86	17
Gesamtzug		14	947	262
Höchstgeschwindigkeit	Beschleunigung	Verzögerung	Bremshundertstel	
100 km/h	3 m/s ²	0,6 m/s ²	100%	
				
<p><i>Güterzug mit Triebfahrzeug der ÖBB-Baureihe 1116. Foto: © Adrian Wagner</i></p>				

Tabelle 6: Beschreibung Schnellzug

Schnellzug				
Art	Baureihe	Anzahl	Gewicht [t]	Länge [m]
Triebfahrzeug	1116	1	88	20
Wagen	445	7	51	26
Gesamtzug		8	445	202
Höchstgeschwindigkeit	Beschleunigung	Verzögerung	Bremshundertstel	
230 km/h	3 m/s ²	0,6 m/s ²	100%	
				
<p><i>Railjet mit Triebfahrzeug der ÖBB-Baureihe 1116. Foto: © Adrian Wagner</i></p>				

Tabelle 7: Beschreibung Regionalzug

Regionalzug				
Art	Baureihe	Anzahl	Gewicht [t]	Länge [m]
Triebzug	4744	1	144	75
Gesamtzug		1	144	75
Höchstgeschwindigkeit	Beschleunigung	Verzögerung	Brems Hundertstel	
160 km/h	3 m/s ²	0,6 m/s ²	100%	
				
<i>CityJet Siemens Desiro ML. Foto: © Adrian Wagner</i>				

Die folgenden betrieblichen Definitionen werden berücksichtigt, um die Auswirkungen für jedes definierte Szenario realitätsgetreu darzustellen:

- *Fahrwege und Trassen:* Die Strecken und Trassen des ursprünglichen Modells bleiben unverändert.
- *Fahrplan:* Die Einhaltung des jeweiligen Fahrplans wird für alle beteiligten Fahrten berücksichtigt. Dadurch werden Überholvorgänge zwischen den Zügen vermieden und die tatsächlichen Auswirkungen eines Zuges auf einen anderen bewertet. Es wird berücksichtigt, dass in der Realität auch eine Dispositionsentscheidung der Verkehrsleitzentrale (VLZ) notwendig sein kann, um die Kapazität des Systems und die Verfügbarkeit von Zeitnischen zu optimieren. Die Berechnung der Kantenfahrzeit erfolgt zwar durch OpenTrack, jedoch werden als Fahrzeitreserven entsprechend dem Regelwerk UIC 451-1 Pufferzeiten eingeplant. Für die Wendezeiten werden Werte entsprechend der gängigen Schienennetznutzungsbedingungen im D-A-CH Raum angewandt.
- *Bewertung:* In jedem Szenario wird zur Bewertung der unmittelbaren Auswirkung eine entsprechende Abfahrtszeit festgelegt, welche es vereinfacht, verschiedene Zugfahrten zu vergleichen (z.B. zur vollen Stunde). Somit können Mindestzugfolgezeiten oder Fahrzeitverlängerungen betrachtet werden.

4.4.1 Einbindung in den Knotenbahnhof A2

Für diese Untersuchung wurde die DT-Line herangezogen, mit dem Knotenbahnhof DT-A2, welcher dann entsprechend mit der ST-Line B3 verknüpft ist. Das Signalsystem entspricht den aktuellen Anforderungen und der Konfiguration des Signalsystems in Österreich (Abstand zwischen den Signalen, Art der Signale, Blockgröße, betriebliche Regeln). Für Einfahrten von der ST-Line auf das Stumpfgleis, Gleis 21, ist beispielsweise ein Einfahrbereich von 1650 m

zwischen dem Einfahrsignal und dem Fahrstraßenauflösepunkt am Gleis 21. Dies wurde im weiteren Verlauf auch mit alternativen Punkten zur Teilfahrstraßenauflösung adaptiert.

Abbildung 19 zeigt die Einbindung der ST-Line in die DT-Line. Anzumerken sei, dass bereits ab dem Einfahrsignal auf der ST-Line eine Reduktion der Geschwindigkeit stattfindet. Wäre der Geschwindigkeitsbruch erst an der Weichenspitze, so wäre die entsprechende Fahrzeit kürzer.

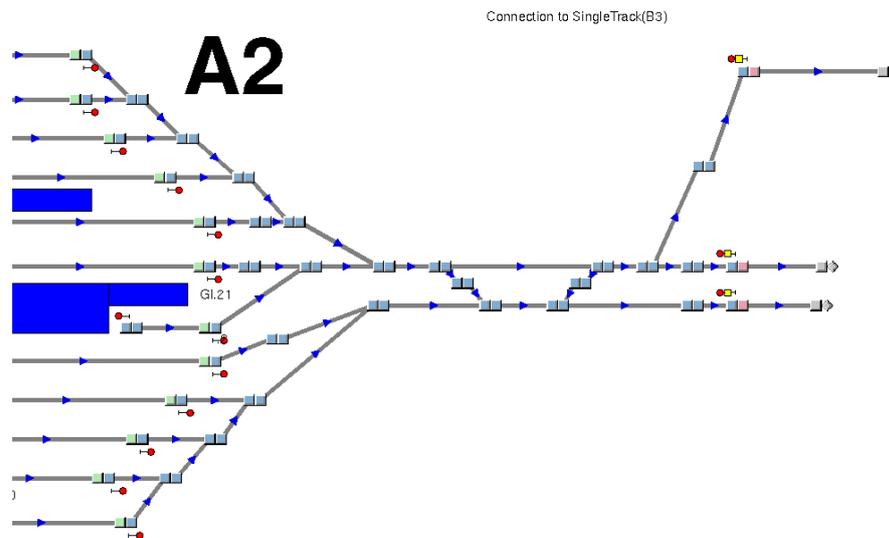


Abbildung 19: Ausfahrbereich Bahnhof A2

Es zeigt sich, dass über den Weichenbereich von Gleis 1, welcher zur eingleisigen Strecke führt, alle vier verwendeten Zugkategorien verkehren (Fernverkehr, Regionalverkehr, S-Bahn, Güterverkehr). Daraus ergibt sich, dass mit der Betrachtung der jeweiligen Fahrtrichtung jeweils zehn unterschiedliche Zugtypen verkehren. Dabei wurde die Abzweigweiche als Referenzpunkt gesehen, weshalb S-Bahnen, welche von A2 abfahren und auf der DT-Line bleiben, nicht in dieser Anzahl miteinberechnet sind.

Diese Untersuchung zeigt auf, dass insbesondere Züge, welche vom Knoten A2 Richtung Nebenbahn fahren, in Konflikt mit Zugfahrten der Hauptstrecke geraten. Es wäre daher sinnvoll, verschiedene Lösungsmöglichkeiten für dieses Problem im Detail aufzuzeigen. Dazu ist es notwendig, die verschiedenen Varianten mit ihren jeweiligen Effekten zu betrachten.

4.4.2 Blockabschnitte auf der ST-Strecke

Im folgenden Szenario fährt ein Regionalzug von A1 nach B1 und ein zweiter Regionalzug fährt von B1 nach A1. Beide Züge halten in D1. Bei diesem Streckenabschnitt handelt es sich um einen eingleisigen Abschnitt ohne Kreuzungsmöglichkeit, wie in Abbildung 20 ersichtlich.

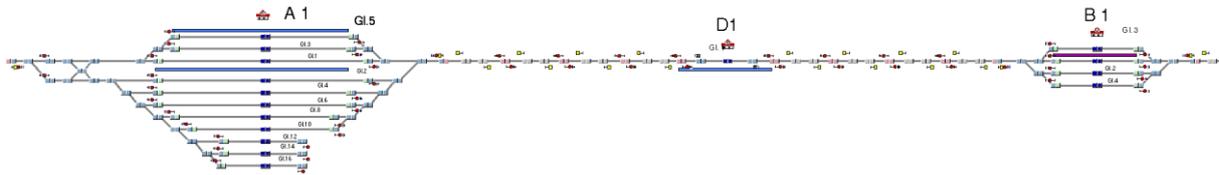


Abbildung 20: Abschnitte ST-Line

Tabelle 8 zeigt die gewählten Annahmen zu den Abfahrtszeiten der beiden REX Züge.

Tabelle 8: Annahme Abfahrtszeiten

Zug	Abfahrtszeit
Regionalexpress 4030	08:01:00
Regionalexpress 4031	08:45:00

Tabelle 9 führt die jeweiligen Fahrzeiten für die beiden Regionalzüge an.

Tabelle 9: Fahrzeitberechnungen des REX 4030 sowie REX 4031

Station	REX 4030				REX 4031			
	Plan - Ankunft	Plan - Abfahrt	Ist - An- kunft	Ist - Ab- fahrt	Plan - Ankunft	Plan - Abfahrt	Ist - An- kunft	Ist - Ab- fahrt
A1	-	08:01:00	-	08:01:00	09:23:00	-	09:22:37	-
D1	08:19:00	08:19:30	08:18:54	08:19:30	09:05:00	09:05:30	09:04:32	09:05:30
B1	08:39:00	08:40:00	08:38:08	08:40:00	-	08:45:00		08:45:00

Es zeigt sich in diesem Szenario bereits, dass die Zugfolgezeit in dieselbe Fahrtrichtung über eine Stunde beträgt und somit nur sehr eingeschränkt Zugverkehr möglich ist. Eine Lösungsmöglichkeit für diese Problematik wäre eine zusätzliche Kreuzungsmöglichkeit in der Haltestelle ST-D1 zu schaffen. Alternativ könnte auch ein selektiver zweigleisiger Ausbau eine Option sein, um die Kreuzungen fliegend stattfinden zu lassen. Dies erfordert jedoch einen hohen Pünktlichkeitsgrad. Eine Verdichtung von Blockabständen bzw. eine frühere Auflösung von Fahrstraßen würde in diesem Beispiel nur eine Verbesserung bringen, wenn Züge in dieselbe Fahrtrichtung unterwegs sind, nicht jedoch bei entgegengesetzten Richtungen.

4.4.3 Einschränkungen des Güterverkehrs durch den Personenverkehr

Für diese Betrachtung wurden drei konkrete Szenarien herangezogen:

- *Basisszenario*: Ein Güterzug fährt ohne einen vorausfahrenden Zug. Dieser Fall spiegelt den optimalen Fall wider.

- *Szenario 1:* Ein Güterzug fährt hinter einem Fernverkehrszug. In diesem Szenario werden die Auswirkungen der Fahrt hinter dem Personenverkehrszug mit schnellerer Fahrzeit und weniger Halten gezeigt.
- *Szenario 2:* Ein Güterzug fährt hinter einer S-Bahn. In diesem Szenario werden die Auswirkungen der Fahrt hinter einem S-Bahn Zug (langsamer und mit Halt in allen Stationen) gezeigt.

In einer zusätzlichen Variante wird darüber hinaus untersucht, welche Auswirkungen es hat, wenn ein Güterzug kürzer (und leichter) ist und somit eine höhere Geschwindigkeit erreicht und beibehält. Damit sollen die Auswirkungen ermittelt werden, die Personenzüge auf die nun leichteren Güterzüge haben können.

4.4.3.1 Fahrzeiten

Als Abfahrtszeit für den Güterzug, den Schnellzug und den Regionalzug wird in etwa die gleiche Zeit gewählt, um Konflikte hervorzurufen. In diesem Szenario wird angenommen, dass der Güterzug mit 100% Leistung verkehrt und der Schnellzug ebenso wie der Regionalzug 95%. Hinsichtlich Fahrzeiten ist festzuhalten, dass beim Szenario des langen Güterzuges die Gesamtfahrzeit bei allen Varianten in etwa zwei Stunden beträgt (maximale Abweichung zwei Minuten).

Beim Kurzzug zeigt sich jedoch, bereits in den Fahrzeiten ein deutlicher Unterschied. So beträgt die Gesamtfahrzeit in der Basisvariante 1:36:36, beim Szenario 1 nur eine Minute und 31 Sekunden länger. Auffallend ist jedoch hier die deutliche Verlängerung beim Nachfahren hinter einer S-Bahn. Hier beträgt die Fahrzeit 1:59:45.

4.4.3.2 Energieverbrauch

Beim längeren Güterzug konnten, wie auch schon bei den Fahrzeiten, beim Energieverbrauch keine Unterschiede in den drei Szenarien entdeckt werden.

Da sich bereits in den Fahrzeiten signifikantere Unterschiede beim kurzen Güterzug gezeigt haben, wird dies auch beim Energieverbrauch detaillierter betrachtet. Auch hier sind bereits bei einer groben Betrachtung Unterschiede erkennbar, da es durch Einschränkungen durch den Personenverkehr im Szenario 1 und 2 zu einem zusätzlichen Energieverbrauch aufgrund von Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgängen kommt. Somit wurden der Energiebedarf über das Leistungsaufnahme/Entfernungsdigramm (kW-Km) ermittelt. Die entsprechenden Diagramme sind in Anhang E ersichtlich. Für den kürzeren Güterzug zeigt Abbildung 21 alle drei Szenarien. Im oberen Bereich ist dabei ein Diagramm für die Leistungsaufnahme entsprechend der Distanz und im unteren Bereich die Energieaufnahme/Distanz für die drei Szenarien ersichtlich. Dabei ist in Blau das Basisszenario, in Gelb das Szenario 1 und in Rot das Szenario 2 abgebildet. Man sieht hier entsprechend auch die Steigerungen in der kumulativen Energieverbrauchskurve (Energieaufnahme/Distanz). So wird ersichtlich, dass in Szenario 1 bereits 7% mehr Energie benötigt werden. In Szenario 2 wird verglichen mit dem Basisszenario sogar um 34% mehr Energie benötigt.

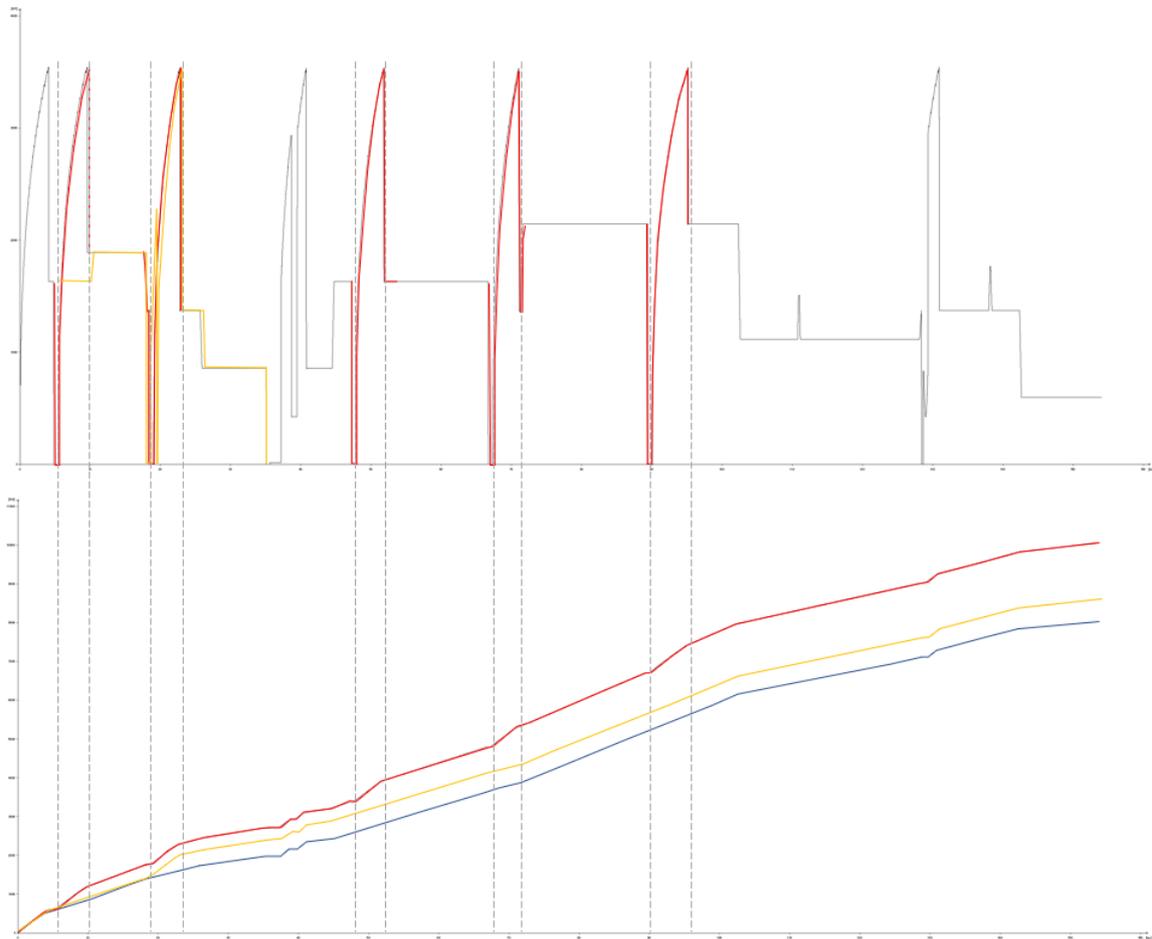


Abbildung 21: Relative Leistungsaufnahme/Distanz (kW - km) und Energieaufnahme/Distanz (MJ - km) für Basis, Szenario 1 und Szenario 2.

Es zeigt sich dadurch, dass jede Dispositionsentscheidung entsprechende Auswirkungen auf die Fahrzeit, den Energieverbrauch und somit auch auf die Kosten und die Qualität einer Zugfahrt haben kann. Hierbei wäre es durchwegs sinnvoll, bereits vor solchen Entscheidungen Abschätzung zu haben, welche Folgen eine Vor- oder Nachreihung eines Zuges haben kann.

5 Conclusio

Auf Basis von Literaturrecherche, Expert*inneninterviews und Eisenbahnbetriebssimulationen wurden im Projekt NITOB Optimierungspotentiale zur Förderung des Bahngüterverkehrs erhoben und bewertet. Dabei hat sich gezeigt, dass einige aus Praxissicht wichtige Themen wie Verlässlichkeit, Transparenz und ein durchgehender Informationsfluss in der wissenschaftlichen Literatur wenig Niederschlag finden, während in der Forschung oft benannte Themen wie mathematische Modelle zur Optimierung von Routingentscheidungen etc. aus Praxissicht zwar durchaus wichtig aber nicht an vorderster Stelle genannt wurden. Gerade die erstgenannten Themen könnten auch mit relativ geringem Aufwand umgesetzt werden und so eine stärkere Verlagerung des Güterverkehrs auf die Bahn unterstützen.

Nichtsdestotrotz haben die durchgeführten Simulationen gezeigt, dass für eine signifikante Verlagerung von Güterverkehr auf die Bahn ein Kapazitätsausbau erforderlich ist, der zu einem gewissen Grad durch Potentiale in der Automatisierung erzielt werden kann, schlussendlich aber infrastrukturelle Maßnahmen erforderlich machen wird. Kurz gesagt: Ein Kapazitätsausbau ohne Infrastrukturausbau ist in ausreichendem Maße nicht möglich!

Im Projekt NITOB konnten somit interessante Ansätze für konkrete F&E-Projekte aufgezeigt werden, die im Folgenden aufgelistet sind:

- Abschätzung der Zeit von Ankunft der Wagen bis zur tatsächlichen Verfügbarkeit (estimated time of availability)
- Durch künstliche Intelligenz unterstützte Dispositionsentscheidungen unter Betrachtung des Gesamtnetzes
- Abfalltransport im Einzelwagenladungsverkehr
- Automatisierung zur Abfederung des Personalmangels
- Dokument mit Hintergrundinformationen zum Bahnverkehr zur Unterstützung von (politischen) Entscheidungsträger*innen

Literaturverzeichnis

- AHUJA, RAVINDRA K. ; JHA, KRISHNA C. ; LIU, JIAN: Solving Real-Life Railroad Blocking Problems. In: *INFORMS Journal on Applied Analytics* Bd. 37, INFORMS (2007), Nr. 5, S. 404–419
- AMBROSINO, DANIELA ; ASTA, VERONICA ; CRAINIC, TEODOR GABRIEL: Optimization challenges and literature overview in the intermodal rail-sea terminal. In: *Transportation Research Procedia, 23rd EURO Working Group on Transportation Meeting, EWGT 2020, 16-18 September 2020, Paphos, Cyprus*. Bd. 52 (2021), S. 163–170
- AMBROSINO, DANIELA ; CABALLINI, CLAUDIA: New solution approaches for the train load planning problem. In: *EURO Journal on Transportation and Logistics* Bd. 8 (2019), Nr. 3, S. 299–325
- AMBROSINO, DANIELA ; SCIOMACHEN, ANNA: Investment evaluation in seaports for increasing the rail split modality in multimodal freight networks. In: *2017 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics (SOLI)*, 2017, S. 181–186
- ARCHETTI, CLAUDIA ; PEIRANO, LORENZO ; SPERANZA, M. GRAZIA: Optimization in multimodal freight transportation problems: A Survey. In: *European Journal of Operational Research* Bd. 299 (2022), Nr. 1, S. 1–20
- BAYKASOĞLU, ADIL ; SUBULAN, KEMAL: A multi-objective sustainable load planning model for intermodal transportation networks with a real-life application. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* Bd. 95 (2016), S. 207–247
- BOHLIN, MARKUS ; HANSMANN, RONNY ; ZIMMERMANN, UWE T.: Optimization of Railway Freight Shunting. In: BORNDÖRFER, R. ; KLUG, T. ; LAMORGESE, L. ; MANNINO, C. ; REUTHER, M. ; SCHLECHTE, T. (Hrsg.): *Handbook of Optimization in the Railway Industry, International Series in Operations Research & Management Science*. Cham : Springer International Publishing, 2018 — ISBN 978-3-319-72153-8, S. 181–212
- BOYSEN, NILS ; EMDE, SIMON ; FLIEDNER, MALTE: The basic train makeup problem in shunting yards. In: *OR Spectrum* Bd. 38 (2016), Nr. 1, S. 207–233
- BOYSEN, NILS ; FLIEDNER, MALTE ; JAEHN, FLORIAN ; PESCH, ERWIN: Shunting yard operations: Theoretical aspects and applications. In: *European Journal of Operational Research* Bd. 220 (2012), Nr. 1, S. 1–14
- BOŽEJKO, WOJCIECH ; GRYMIN, RADOSLAW ; JAGIEŁŁO, SZYMON ; PEMPERA, JAROSŁAW: Robust Tabu Search Algorithm for Planning Rail-Truck Intermodal Freight Transport. In: SAEED, K. ; HOMENDA, W. (Hrsg.): *Computer Information Systems and Industrial Management, Lecture Notes in Computer Science*. Cham : Springer International Publishing, 2016 — ISBN 978-3-319-45378-1, S. 289–299

- BRUCK, BRUNO P. ; CORDEAU, JEAN-FRANÇOIS ; FREJINGER, EMMA: Integrated inbound train split and load planning in an intermodal railway terminal. In: *Transportation Research Part B: Methodological* Bd. 145 (2021), S. 270–289
- BÜKER, N.: Methods of assessing railway infrastructure capacity. In: *Engineering Science and Technology, an International Journal (JESTECH)* Bd. 16 (2013), Nr. 2
- CAVALLARO, FEDERICO ; NOCERA, SILVIO ; SOMMACAL, GIULIA: Appropriateness of the “small-scale corridor terminals” scheme for rail-road combined transport: Evidence from the Brenner axis. In: *Research in Transportation Economics, Transport Infrastructures: Investments, Evaluation and Regional Economic Growth*. Bd. 88 (2021), S. 100995
- CHEN, CHONGSHUANG ; DOLLEVOET, TWAN ; ZHAO, JUN: One-block train formation in large-scale railway networks: An exact model and a tree-based decomposition algorithm. In: *Transportation Research Part B: Methodological* Bd. 118 (2018), S. 1–30
- CHEN, XINGHAN ; ZUO, TIANSHUAI ; LANG, MAOXIANG ; LI, SHIQI ; LI, SIYU: Integrated optimization of transfer station selection and train timetables for road–rail intermodal transport network. In: *Computers & Industrial Engineering* Bd. 165 (2022), S. 107929
- DB CARGO AG: *Güterwagenkatalog Eanos-x 052*. URL <https://gueterwagenkatalog.dbcargo.com/katalog/nach-gattung/e-offene-wagen/Eanos-x-052-5830640>. - abgerufen am 2022-11-07
- DIENDORFER, ANTON: Lauftechnik und Fahrdynamik von Zügen.
- DOTOLI, MARIAGRAZIA ; EPICOCO, NICOLA ; SEATZU, CARLA: An improved technique for train load planning at intermodal rail-road terminals. In: *2015 IEEE 20th Conference on Emerging Technologies Factory Automation (ETFA)*, 2015, S. 1–4
- EUROPEAN COMMISSION, DIRECTORATE-GENERAL FOR MOBILITY AND TRANSPORT: *EU transport in figures: statistical pocketbook 2022*. LU : Publications Office of the European Union, 2022 — ISBN 978-92-76-53698-7
- EUROPEAN UNION: *EU Transport in Figures: Statistical Pocketbook 2020*. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2020. — publisher: Publications Office of the European Union — ISBN 9789276175650 9789276175667
- GHANE-EZABADI, MOHAMMAD ; VERGARA, HECTOR A.: Decomposition approach for integrated intermodal logistics network design. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* Bd. 89 (2016), S. 53–69
- GILLE, A. ; KLEMENZ, M. ; SIEFER, TH.: Applying multiscaling analysis to detect capacity resources in railway network. In: *Timetable Planning and Information Quality* (2010). — Google-Books-ID: BbWtfTuTHwcC
- GIUFFRIDA, MARIA ; PEROTTI, SARA ; TUMINO, ANGELA ; VILLOIS, VINCENZO: Developing a Prototype Platform To Manage Intelligent Communication Systems in Intermodal Transport. In: *Transportation Research Procedia, 14th International scientific conference on sustainable, modern and safe transport*. Bd. 55 (2021), S. 1320–1327

- GIUSTI, RICCARDO ; MANERBA, DANIELE ; BRUNO, GIORGIO ; TADEI, ROBERTO: Synchronodal logistics: An overview of critical success factors, enabling technologies, and open research issues. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* Bd. 129 (2019), S. 92–110
- HE, YAN ; WU, TAO ; ZHANG, CANRONG ; LIANG, ZHE: An improved MIP heuristic for the intermodal hub location problem. In: *Omega* Bd. 57 (2015), S. 203–211
- HU, QU ; LUAN, XIAOJIE ; CORMAN, FRANCESCO ; LODEWIJKS, GABRIEL: A Tabu Search Algorithm for Inter-terminal Container Transport. In: *IFAC-PapersOnLine, 14th IFAC Symposium on Control in Transportation SystemsCTS 2016*. Bd. 49 (2016), Nr. 3, S. 413–418
- HU, QU ; WIEGMANS, BART ; CORMAN, FRANCESCO ; LODEWIJKS, GABRIEL: Integration of inter-terminal transport and hinterland rail transport. In: *Flexible Services and Manufacturing Journal* Bd. 31 (2019), Nr. 3, S. 807–831
- HÜRLIMANN, DANIEL: OpenTrack. Betriebssimulation von Eisenbahnnetzen Version 1.9.
- HŽ INFRASTRUKTURE D.O.O.: Nacrt novog HŽ voznog reda za željeznički promet za 2021./2022. 4a (ČAPLJINA) – dg – METKOVIĆ – PLOČE (svi vlakovi) [In Croatian: Bildfahrplan für den neuen Fahrplan von 2021./2022. 4a (ČAPLJINA) – Ländergrenze – METKOVIĆ – PLOČE (Alle Züge)].
- INTERNATIONALER EISENBAHNVERBAND: UIC-Kodex 451-1 VE. In den Fahrplänen vorzusehende Fahrzeitzuschläge, um die pünktliche Betriebsabwicklung zu gewährleisten - Fahrzeitzuschläge.
- JACOBSSON, STEFAN ; ARNÄS, PER OLOF ; STEFANSSON, GUNNAR: Automatic information exchange between interoperable information systems: Potential improvement of access management in a seaport terminal. In: *Research in Transportation Business & Management, Modal shift and logistics integration in intermodal transport networks' in Research in Transportation, Business and Management*. Bd. 35 (2020), S. 100429
- JAEHN, FLORIAN ; RIEDER, JOHANNES ; WIEHL, ANDREAS: Minimizing delays in a shunting yard. In: *OR Spectrum* Bd. 37 (2015a), Nr. 2, S. 407–429
- JAEHN, FLORIAN ; RIEDER, JOHANNES ; WIEHL, ANDREAS: Single-stage shunting minimizing weighted departure times. In: *Omega* Bd. 52 (2015b), S. 133–141
- KREUTZBERGER, EKKI ; KONINGS, ROB: The challenge of appropriate hub terminal and hub-and-spoke network development for seaports and intermodal rail transport in Europe. In: *Research in Transportation Business & Management, Port Competitiveness: Issues and Challenges*. Bd. 19 (2016), S. 83–96
- LIN, BOLIANG ; WANG, ZHENYU ; ZHAO, YINAN: *A Train Formation Plan with Elastic Capacity for Large-Scale Rail Networks and Simulated Annealing Algorithm*, 2021
- LJUNGGREN, FREDRIK ; PERSSON, KRISTIAN ; PETERSON, ANDERS ; SCHMIDT, CHRISTIANE: Railway timetabling: a maximum bottleneck path algorithm for finding an additional train path. In: *Public Transport* Bd. 13 (2021), Nr. 3, S. 597–623

- MANCERA, ALBERT ; BRUCKMAN, DIRK ; WEIDMANN, ULRICH: Single Wagonload Production Schemes Improvements Using GüterSim (Agent-based Simulation Tool). In: *Transportation Research Procedia, 18th Euro Working Group on Transportation, EWGT 2015, 14-16 July 2015, Delft, The Netherlands*. Bd. 10 (2015), S. 615–624
- MAYRING, PHILIPP: *Qualitative Inhaltsanalyse. Grundlagen und Techniken* : Beltz, 2010
- MICHAELSEN, RAIMO: Simulation von Eisenbahnnetzen - Theorie.
- MOSTERT, MARTINE ; CARIS, AN ; LIMBOURG, SABINE: Intermodal network design: a three-mode bi-objective model applied to the case of Belgium. In: *Flexible Services and Manufacturing Journal* Bd. 30 (2018), Nr. 3, S. 397–420
- MÜLLER, JAN PHILIPP ; ELBERT, RALF ; EMDE, SIMON: Intermodal service network design with stochastic demand and short-term schedule modifications. In: *Computers & Industrial Engineering* Bd. 159 (2021), S. 107514
- MUÑOZURI, JESÚS ; DOMÍNGUEZA, ISMAEL ; BERROCAL, MIGUEL A. ; ESCUDERO, ALEJANDRO: An allocation-scheduling heuristic to manage train traffic in an intermodal terminal. In: *Computers in Industry* Bd. 82 (2016), S. 196–204
- NOLD, MICHAEL ; CORMAN, FRANCESCO: Dynamic train unit coupling and decoupling at cruising speed: Systematic classification, operational potentials, and research agenda. In: *Journal of Rail Transport Planning & Management* Bd. 18 (2021), S. 100241
- ÖBB INFRASTRUKTUR AG: ÖBB Netzkarte.
- ÖBB PRODUKTION AG: *Triebfahrzeugdatenblatt Baureihe 2070*. URL https://produktion.oebb.at/dam/jcr:eece5136-6d9c-4f8e-9f0b-4f75561a4795/Datenblatt_Tfz_2070.pdf. - abgerufen am 2022-10-25
- POLLEHN, TOBIAS ; RUF, MORITZ ; KÖNIG, RAINER: Evaluating the effects of automation components in service networks of rail freight. In: *Journal of Rail Transport Planning & Management* Bd. 20 (2021), S. 100267
- QUAGLIETTA, EGIDIO ; WANG, MENG ; GOVERDE, ROB M. P.: A multi-state train-following model for the analysis of virtual coupling railway operations. In: *Journal of Rail Transport Planning & Management, Best Papers of RailNorrköping 2019*. Bd. 15 (2020), S. 100195
- RAILNETEUROPE: *Redesign of the International Timetabling Process (TTR) - Project results* (Nr. Version 0.6). Wien, Bern : RNE, k.D.
- REISCH, JULIAN ; KIEWER, NATALIA ; ULLRICH, MARTIN ; PÖHLE, DANIEL: Bestimmung der Kapazitätssteigerung durch Einführung der Mittelpufferkupplung und ep-Bremse. In: , 2021, S. 37–40
- RICCI, STEFANO ; CAPODILUPO, LUIGI ; MUELLER, BARBARA ; KARL, JUERGEN ; SCHNEBERGER, JENS: Assessment Methods for Innovative Operational Measures and Technologies for Intermodal Freight Terminals. In: *Transportation Research Procedia, Transport Research Arena TRA2016*. Bd. 14 (2016), S. 2840–2849

- ROCHARD, B P ; SCHMID, F: A review of methods to measure and calculate train resistances. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* Bd. 214 (2000), Nr. 4, S. 185–199
- SANTOS, BRUNO F. ; LIMBOURG, SABINE ; CARREIRA, JOANA S.: The impact of transport policies on railroad intermodal freight competitiveness – The case of Belgium. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* Bd. 34 (2015), S. 230–244
- SCHEIER, BENEDIKT: Eisenbahnbetriebssimulation. Ein Vergleich der Tools OpenTrack und RailSys.
- SCHÖBEL, ANDREAS ; SCHÖBEL, CHRISTIAN: Data converter from OpenTrack into Kronecker. In: *Proceedings of the International Scientific Conference “Science and Traffic Development” (ZIRP 2018)* (2018), S. 8
- SCHULZ, ARNE ; FLIEDNER, MALTE ; FIEDRICH, BENEDIKT ; PFEIFFER, CHRISTIAN: Levelling crane workload in multi-yard rail-road container terminals. In: *European Journal of Operational Research* Bd. 293 (2021), Nr. 3, S. 941–954
- SCHWANHÄÜßER, WULF: *Die Bemessung der Pufferzeiten im Fahrplangefüge der Eisenbahn*. Aachen, RWTH Aachen, 1974
- SEWCYK, BERND ; KETTNER, MICHAEL ; PRINZ, ROBERT: NEMO - Netz-Evaluations-Modell bei den ÖBB | Eurailpress Archiv. In: *ETR – Eisenbahntechnische Rundschau* (2001), Nr. 03, S. 117–121
- SHIN, SEUNGJIN ; ROH, HONG-SEUNG ; HUR, SUNG-HO: Technical Trends Related to Intermodal Automated Freight Transport Systems (AFTS) *. In: *The Asian Journal of Shipping and Logistics* Bd. 34 (2018), Nr. 2, S. 161–169
- SÖRENSEN, KENNETH ; VANOVERMEIRE, CHRISTINE ; BUSSCHAERT, SYLVIE: Efficient metaheuristics to solve the intermodal terminal location problem. In: *Computers & Operations Research* Bd. 39 (2012), Nr. 9, S. 2079–2090
- STROMMER, JOHANNES: *Zugkraftrechner für Zugkraft & Leistung bzw. Geschwindigkeit*. URL <https://www.johannes-strommer.com/rechner/zugkraft-und-leistung-geschwindigkeit/>. - abgerufen am 2022-11-07. — Website von Johannes Strommer
- UMWELTBUNDESAMT: ekz_pkm_tkm_verkehrsmittel.pdf.
- VAKTHEL, SERGEY: *Rechnerunterstützte analytische Ermittlung der Kapazität von Eisenbahnetzen*. Aachen, RWTH Aachen, 2002
- VCÖ: *Güterverkehr auf Klimakurs bringen - Mobilität mit Zukunft* (Factsheet Nr. 3/2020). Wien : VCÖ, 2020
- WAGNER, ADRIAN: Lückenschluss Friedberg - Szombathely. Infrastrukturanalyse und Betriebssimulation.
- WIEBERNEIT, NICOLE: Service network design for freight transportation: a review. In: *OR Spectrum* Bd. 30 (2008), Nr. 1, S. 77–112

WIESŁAW, KRASOŃ ; TADEUSZ, NIEZGODA ; MICHAŁ, STANKIEWICZ: Innovative Project of Prototype Railway Wagon and Intermodal Transport System. In: *Transportation Research Procedia, Transport Research Arena TRA2016*. Bd. 14 (2016), S. 615–624

WOXENIUS, JOHAN ; PERSSON, JAN A. ; DAVIDSSON, PAUL: Utilising more of the loading space in intermodal line trains – Measures and decision support. In: *Computers in Industry, Decision Support for Intermodal Transport*. Bd. 64 (2013), Nr. 2, S. 146–154

ZHU, ENDONG ; CRAINIC, TEODOR GABRIEL ; GENDREAU, MICHEL: Scheduled Service Network Design for Freight Rail Transportation. In: *Operations Research* Bd. 62, INFORMS (2014), Nr. 2, S. 383–400

Anhang A – Taktarten und Blocklängen

Tabelle 10 zeigt die gewählten Taktangaben auf den beiden Strecken, diese zusammengefassten Taktangaben beziehen sich pro Richtung für den Zeitraum 5:00 bis 23:00 Uhr.

Tabelle 10: Taktarten

Strecke/Verkehrsart	Fernverkehr (Long Distance)	Regionalverkehr (Regional)	Schnellbahn (Suburban)
ST-Line	120 min	60 min	-
DT-Line	60 min	60 min	30 min

Tabelle 11 und Tabelle 12 beschreiben die auf den Referenzstrecken erhobenen Blocklängen auf der freien Strecke und innerhalb der Betriebsstellengrenzen.

Tabelle 11: Blocklänge (freie Strecke)

	Mindestblocklänge [m]	Maximale Blocklänge [m]	Mittlere Blocklänge [m]
204 01-Pyhrnbahn (ST)	1315	6745	3305
		Durchschnitt ST	3305
105 01- Südbahn (DT)	1078	4050	1859
205 01- Passauer Bahn (DT)	1208	3722	2135
118 01- Ostbahn (DT)	1092	6244	2451
		Durchschnitt DT	2148

Tabelle 12: Blocklänge (Betriebsstellengrenzen)

	Mindestblocklänge [m]	Maximale Blocklänge [m]	Mittlere Blocklänge [m]
204 01-Pyhrnbahn (ST)	720	1784	1186
		Durchschnitt ST	1186
105 01- Südbahn (DT)	1067	2892	1565
205 01- Passauer Bahn (DT)	925	2956	1575
118 01- Ostbahn (DT)	1092	3210	1776
		Durchschnitt DT	1638

Anhang B – Referenzbahnhöfe

Referenzbahnhöfe Kategorie A

Abbildung 22 zeigt den Gleisplan des vereinfachten A-Bahnhofes für die ST-Line.

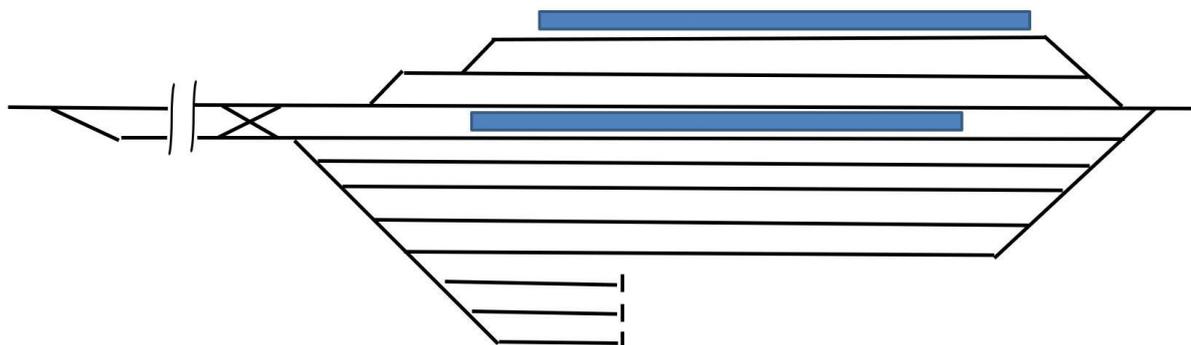


Abbildung 22: Gleisplan A-Bahnhof ST-Line (Referenz Bhf. Jesenice, vereinfacht)

Abbildung 23 zeigt einen Ausschnitt aus der Infrastrukturkarte von Österreich, auf welcher auch der Bahnhof Jesenice zu sehen ist.

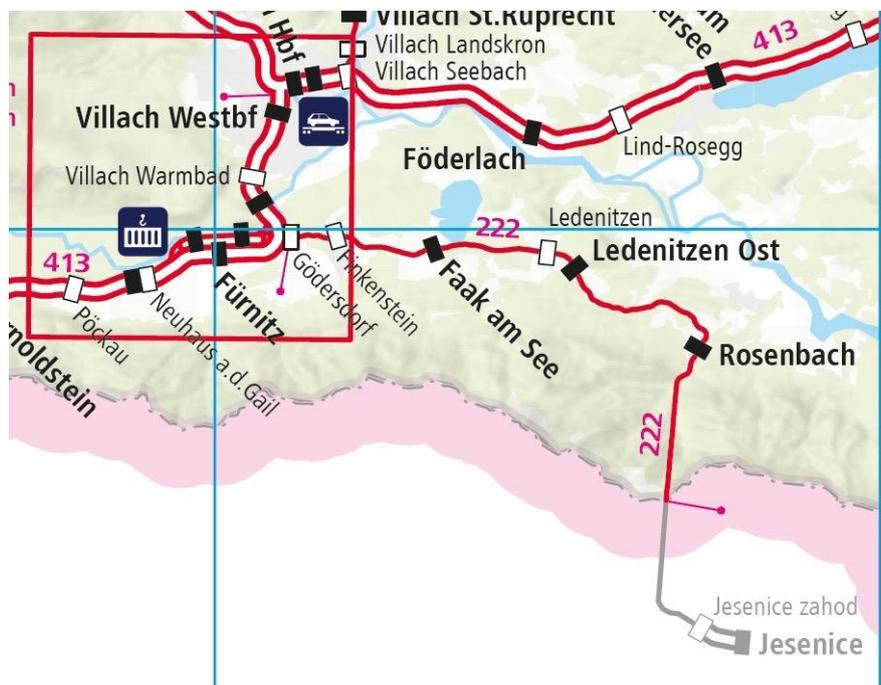


Abbildung 23: Strecke 222 Villach – Jesenice (ÖBB INFRASTRUKTUR AG, 2022)

Abbildung 24 zeigt den Gleisplan des vereinfachten A-Bahnhofes für die DT-Line.



Abbildung 24: Gleisplan A-Bahnhof DT-Line (Referenz Bhf. Brenner, vereinfacht)

Abbildung 25 zeigt einen Ausschnitt aus der Infrastrukturkarte von Österreich, auf welcher auch der Bahnhof Brenner/Brennero zu sehen ist.

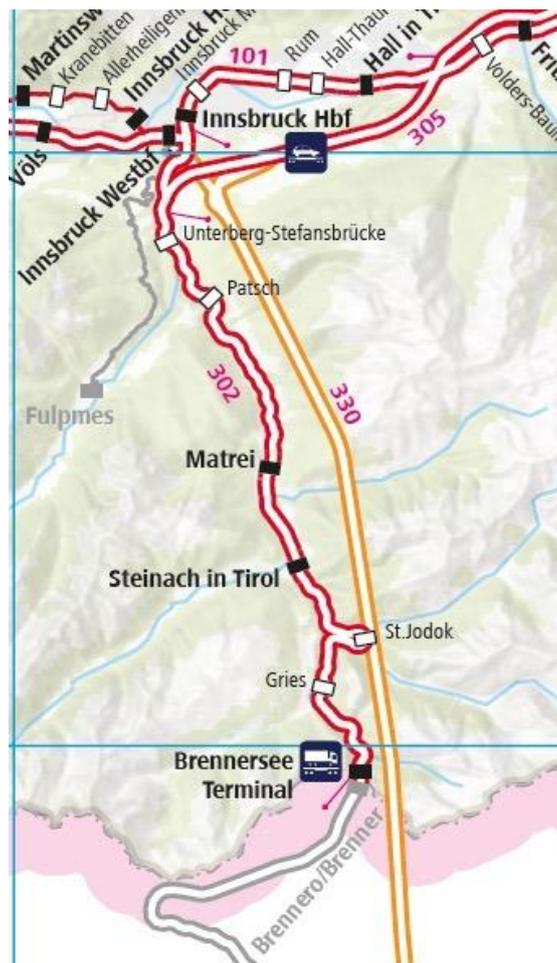


Abbildung 25: Strecke 302 Innsbruck – Brenner (ÖBB INFRASTRUKTUR AG, 2022)

Abbildung 26 zeigt einen Ausschnitt aus der Infrastrukturkarte von Österreich, auf welcher auch der Bahnhof Kufstein zu sehen ist.



Abbildung 26: Strecke 302 Wörgl – Kufstein (ÖBB INFRASTRUKTUR AG, 2022)

Referenzbahnhöfe Kategorie B

Abbildung 27 zeigt den Gleisplan des vereinfachten B-Bahnhofes für die ST-Line.

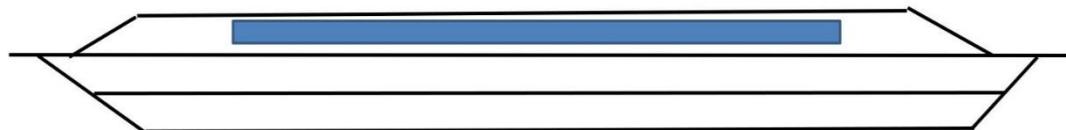


Abbildung 27: Gleisplan B- Bahnhof ST-Line (Referenz Bhf. Kirchdorf an der Krems, vereinfacht)

Abbildung 28 zeigt einen Ausschnitt aus der Infrastrukturkarte von Österreich, auf welcher auch der Bahnhof Kirchdorf an der Krems zu sehen ist.



Abbildung 28: Ausschnitt Strecke 204 Linz – Selzthal mit Bhf. Kirchdorf a. d. Kreams (ÖBB INFRASTRUKTUR AG, 2022)

Abbildung 29 zeigt den Gleisplan des vereinfachten B-Bahnhofes für die DT-Line.

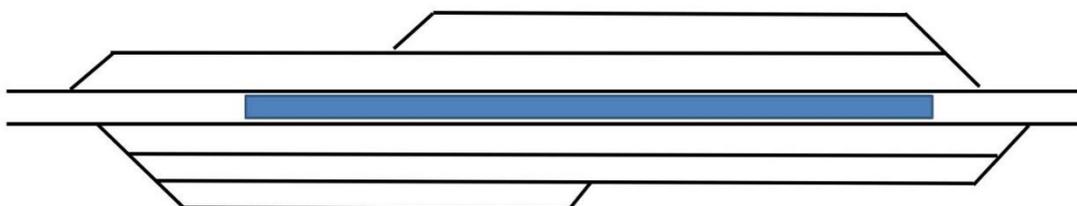


Abbildung 29: Gleisplan B-Bahnhof DT-Line (Referenz Bhf. Parndorf, vereinfacht)

Abbildung 30 zeigt einen Ausschnitt aus der Infrastrukturkarte von Österreich, auf welcher auch der Bahnhof Parndorf zu sehen ist.



Abbildung 30: Ausschnitt Strecke 118 Wien – Hegyeshalom mit Bhf. Parndorf (ÖBB INFRASTRUKTUR AG, 2022)

Referenzbahnhöfe Kategorie C

Abbildung 31 zeigt den Gleisplan des vereinfachten C-Bahnhofes für die ST-Line.



Abbildung 31: Gleisplan C-Bahnhof ST-Line (Referenz Bhf. Hinterstoder, vereinfacht)

Abbildung 32 zeigt einen Ausschnitt aus der Infrastrukturmarte von Österreich, auf welcher auch der Bahnhof Hinterstoder zu sehen ist.

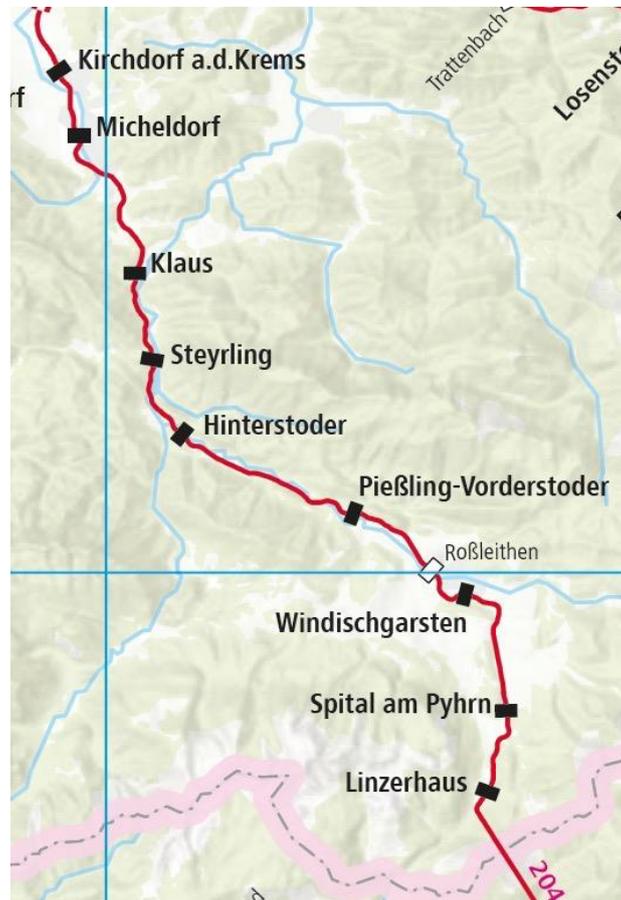


Abbildung 32: Ausschnitt Strecke 204 Linz - Selzthal mit Bhf. Hinterstoder (ÖBB INFRASTRUKTUR AG, 2022)

Abbildung 33 zeigt den Gleisplan des vereinfachten C-Bahnhofes für die DT-Line.



Abbildung 33: Gleisplan C- Bahnhof DT-Line (Referenz Bhf. Riedau, vereinfacht)

Abbildung 34 zeigt einen Ausschnitt aus der Infrastrukturkarte von Österreich, auf welcher auch der Bahnhof Riedau zu sehen ist.

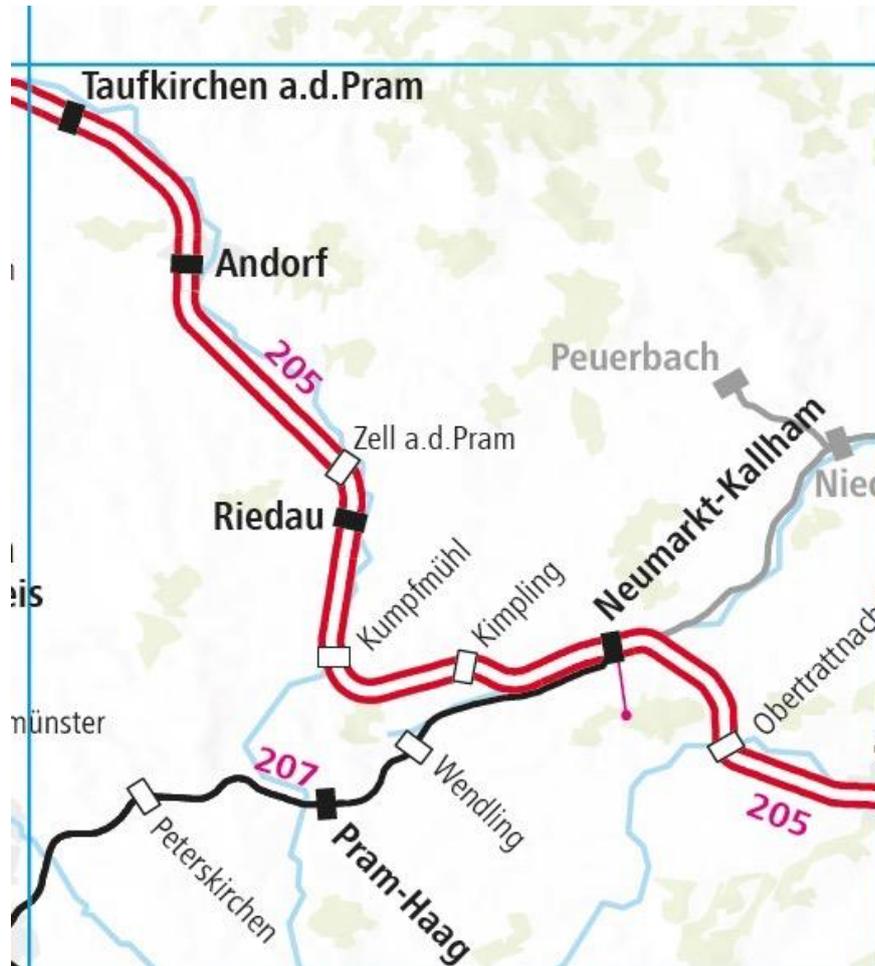


Abbildung 34: Ausschnitt Strecke 205 Wels – Passau mit Bhf. Riedau (ÖBB INFRASTRUKTUR AG, 2022)

Anhang C – Details der ST-Line

Tabelle 13 zeigt die Bahnstreckenabstände auf der ST-Line.

Tabelle 13: Bahnstreckenabstände ST-Line

Bahnhof/Haltestelle	Kilometer (absolut)	Kilometer (relativ)
A1	0,75	0,75
D1	24,90	24,15
B1	49,90	25,00
C6(former D2)	62,90	13,00
C1	76,90	14,00
D3	82,90	8,00
B2	86,90	4,00
C2	94,90	8,00
A2	104,15	9,25
C5(former D4)	110,30	6,15
C3	114,30	4,00
D5	117,30	3,00
C4	120,30	3,00
B3	127,30	7,00

Abbildung 35 zeigt die Funktion *Reserve with previous Route*, welche verwendet wird, um die entsprechenden Signale mit der vorangegangenen Fahrstraße zu stellen. So ist ein Deadlock im eingleisigen Streckenabschnitt vermeidbar.

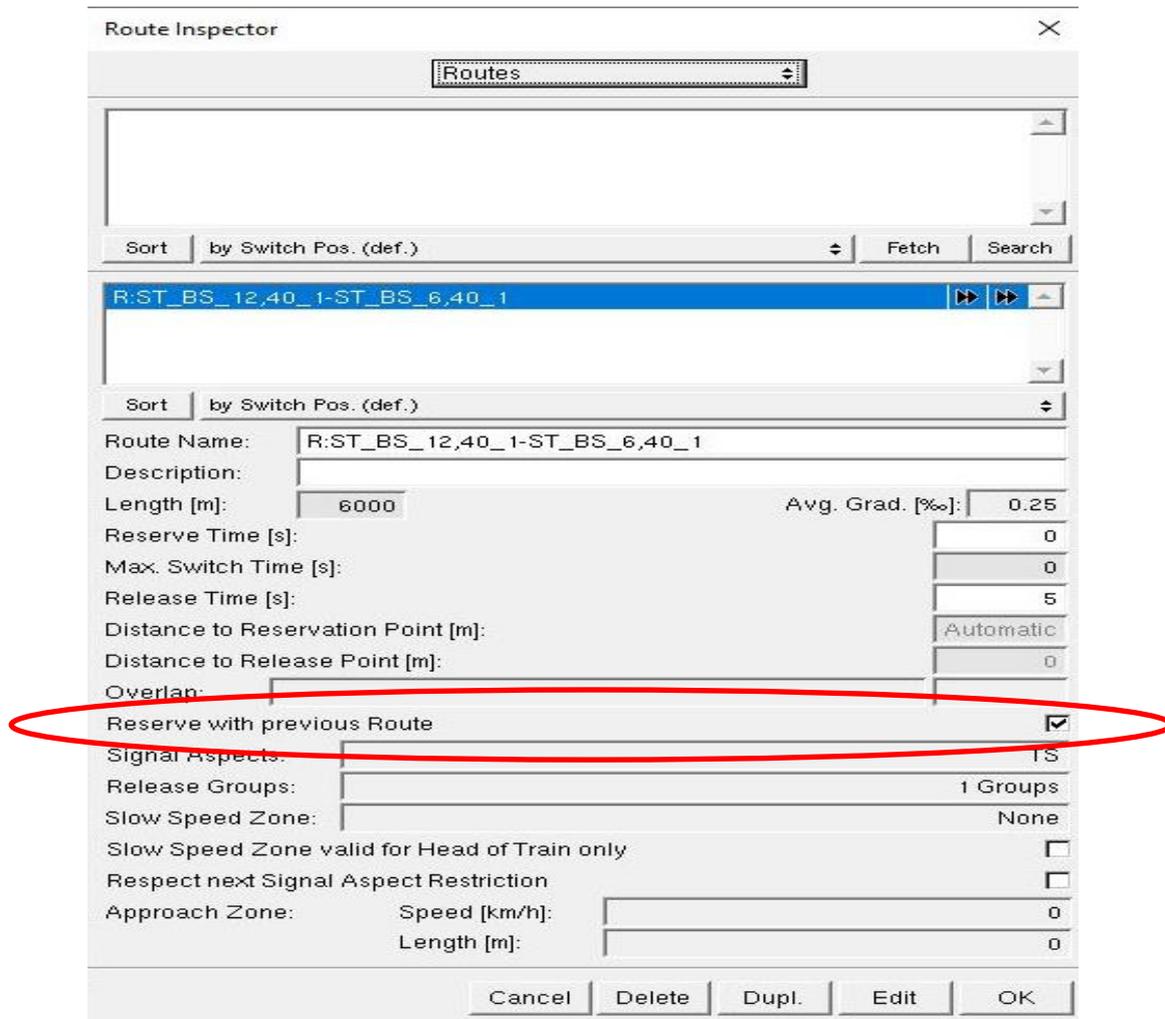


Abbildung 35: *Reserve with previous route* in OpenTrack

Abbildung 36 zeigt das Geschwindigkeitsprofil der ST-Line.

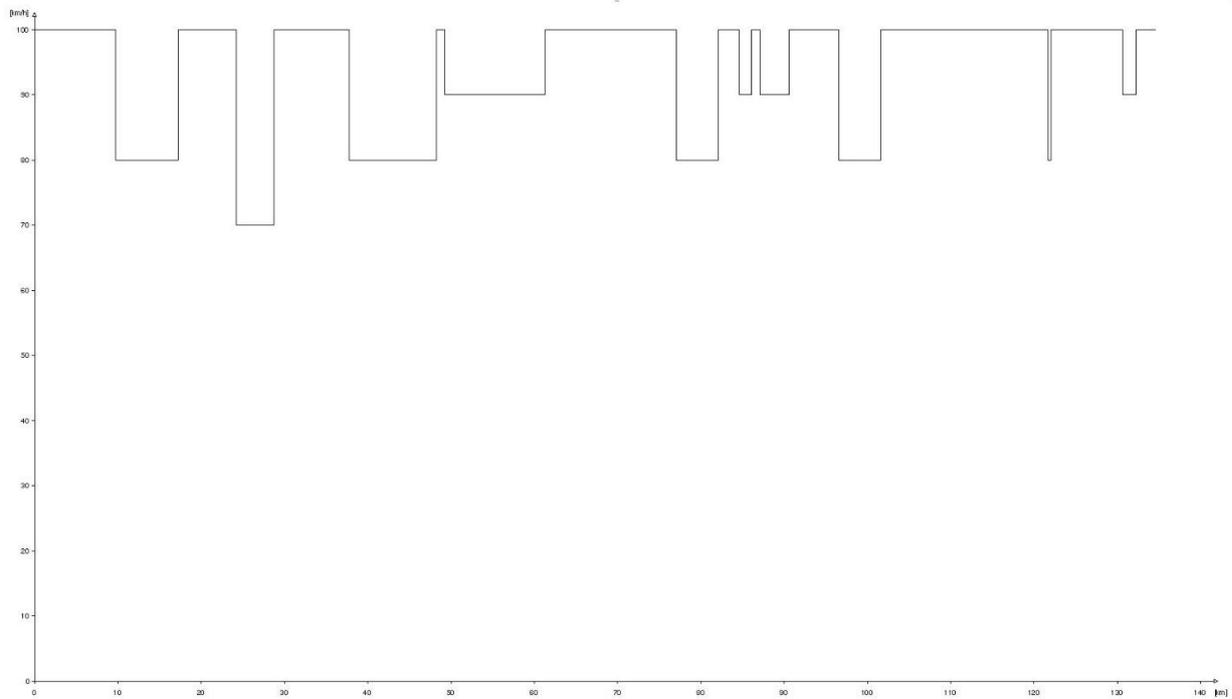


Abbildung 36: Geschwindigkeitsprofil ST-Line (OpenTrack)

Abbildung 37 zeigt das Neigungsprofil der ST-Line.

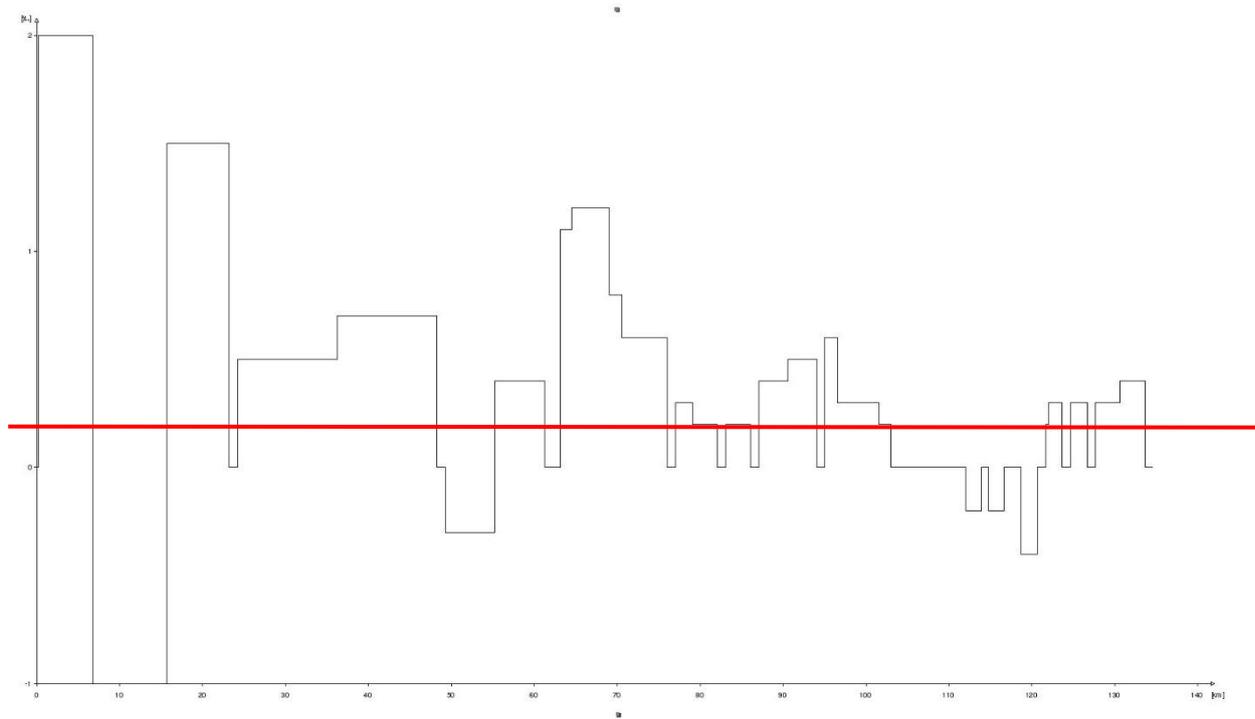


Abbildung 37: Neigungsprofil ST-Line (OpenTrack)

Anhang D – Details der DT-Line

Tabelle 14 zeigt die Bahnstabsabstände auf der ST-Line.

Tabelle 14: Bahnstabsabstände DT-Line

Bahnhof/Haltestelle	Kilometrierung (absolut)	Kilometrierung (relativ)
A1	0,00	0,00
D1	5,50	5,50
D2	8,00	2,50
C1	10,00	2,00
D3	12,50	2,50
B1	19,00	6,50
D4	20,80	1,80
C2	28,90	8,10
D5	33,50	4,60
B2	38,00	4,50
D6	45,00	7,00
D7	50,50	5,50
C3	55,00	4,50
D8	67,00	12,00
A2	68,50	1,50
C4	86,80	18,30
D9	91,00	4,20
C5	100,00	9,00
D10	105,00	5,00
B3	108,50	3,50
C6	112,30	3,80
C7	126,90	14,60
D11	136,50	9,60
B4	142,00	7,50
D12	149,00	7,00
B5	153,00	4,00

Abbildung 39 zeigt das Neigungsprofil der DT-Line.

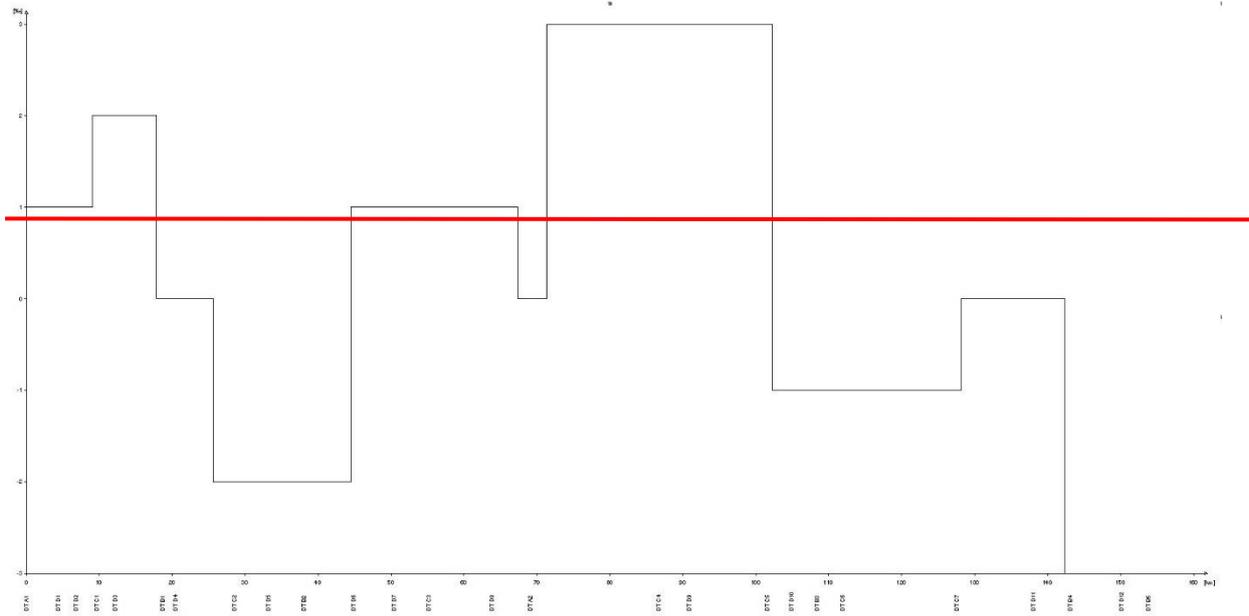


Abbildung 39: Neigungsprofil DT-Line (OpenTrack)

Anhang E – Ergebnisse aus den Szenarios

Szenario Blockabschnitt ST-Line

Um die Geschwindigkeit und Beschleunigung genauer zu betrachten, wird in Abbildung 40 ein Beschleunigungs/Weg Diagramm von REX 4031 gezeigt. Dabei wird ersichtlich, wann der Zug auf dem Abschnitt Brems- und Beschleunigungsvorgänge durchführen muss. Abbildung 41 zeigt hingegen das Geschwindigkeits/Weg Diagramm, wo auch der Halt in der Haltestelle D1 ersichtlich ist.

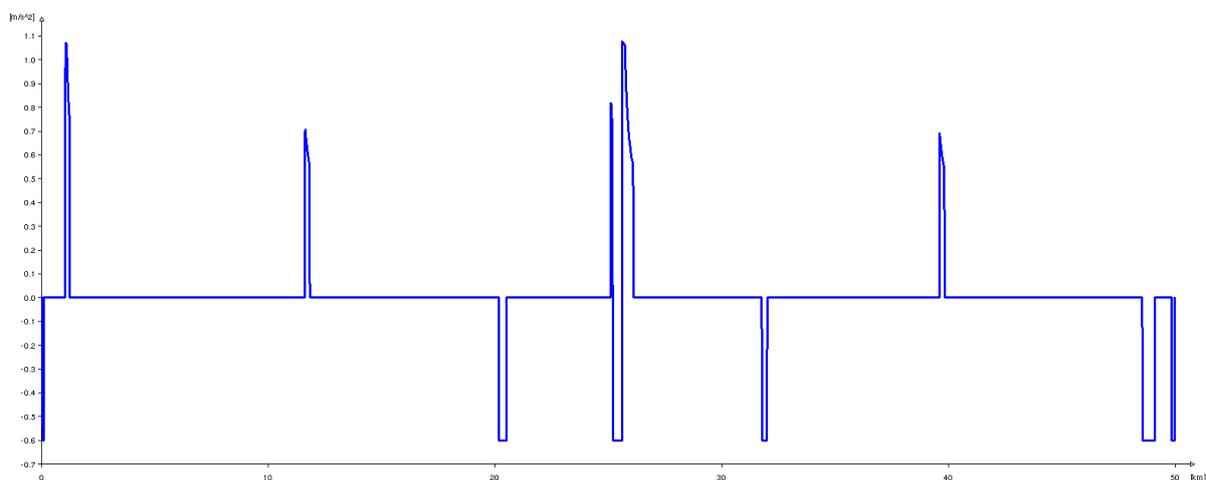


Abbildung 40: Beschleunigung Weg Diagramm REX 4031

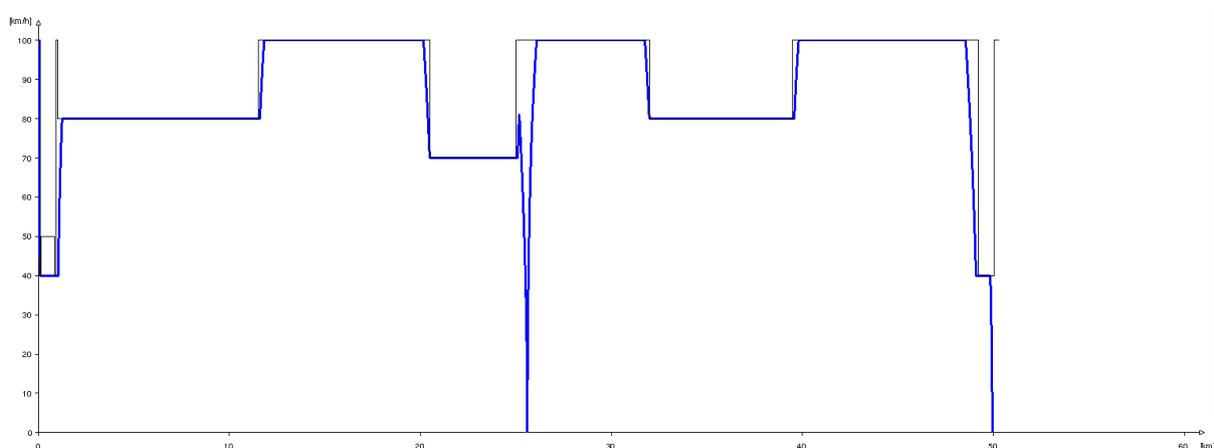


Abbildung 41: Weg-Geschwindigkeitsdiagramm REX 4031

Abbildung 42 zeigt die beiden REX zwischen den beiden Bahnhöfen. Somit wird ersichtlich, wann der nachfolgende dritte Zug abfahren kann.

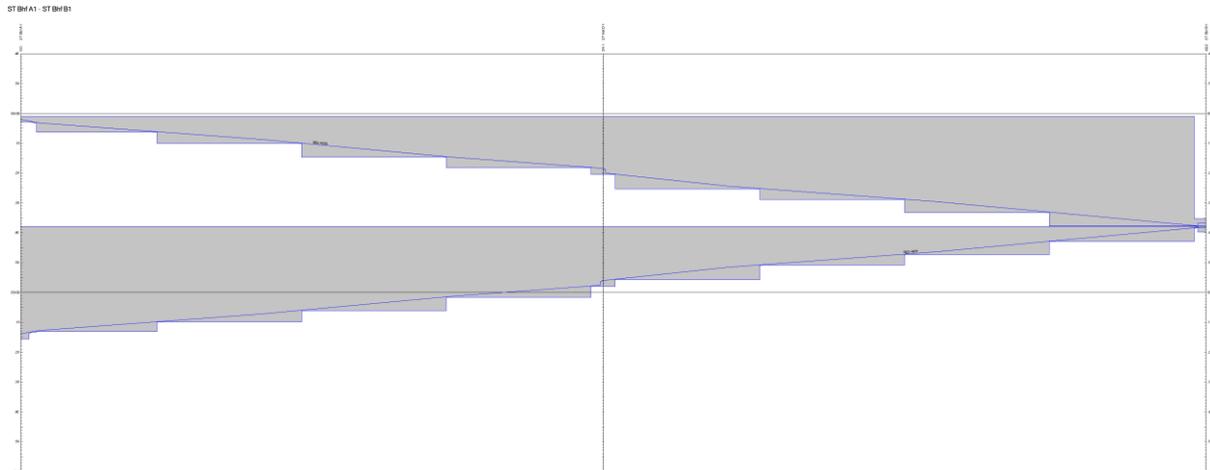


Abbildung 42: Ausschnitt Bildfahrplan zwischen den Bahnhöfen

In Abbildung 43 wird ein Bildfahrplan des simulierten Gesamtfahrplanes gezeigt. Dabei sind in Blau zwei Güterzüge sichtbar und in Rot ein Fernverkehrszug. Somit wird ersichtlich, warum in diesem Abschnitt lediglich ein geringer Fahrplan möglich ist.

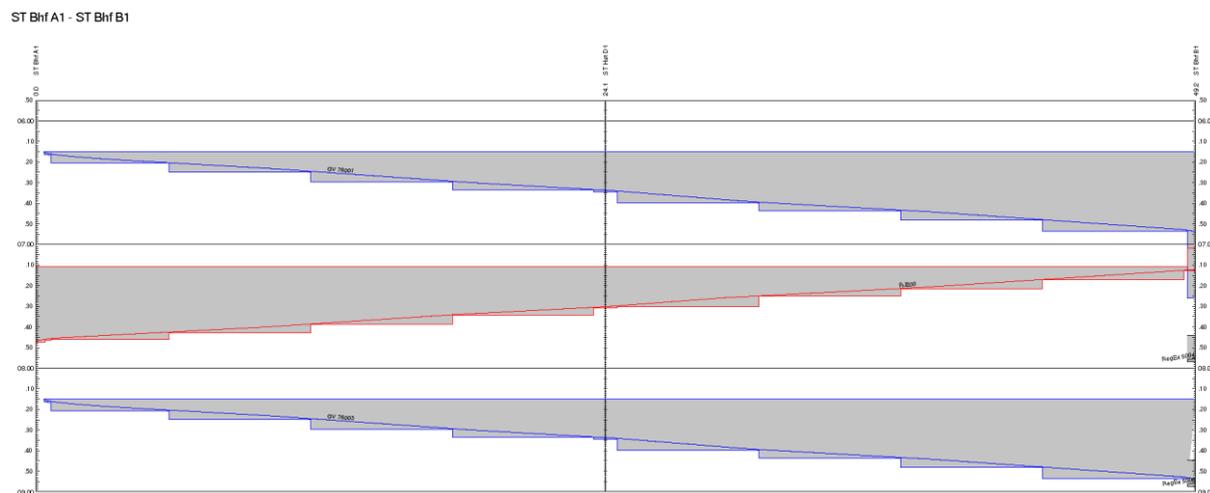


Abbildung 43: Ausschnitt simulierter Gesamtfahrplan

Szenario Einschränkungen des Güterverkehrs

Tabelle 15 zeigt die unterschiedlichen Fahrzeitberechnungen des Güterzuges für die einzelnen Szenarien: Basis, Szenario 1 und Szenario 2.

Tabelle 15: Fahrzeitberechnungen Güterzug Basisszenario, Szenario 1 & Szenario2

Güterzug									
Station	Basis			Szenario 1			Szenario 2		
	Ankunft	Abfahrt	Wartezeit	Ankunft	Abfahrt	Wartezeit	Ankunft	Abfahrt	Wartezeit
A1		06:16:00			06:18:01			06:16:18	
D1	06:23:36			06:25:37			06:23:54		
D2	06:26:03			06:28:04			06:26:21		
C1	06:28:30			06:30:31			06:28:48		
D3	06:30:37			06:32:38			06:30:55		
B1	06:36:02			06:38:03			06:36:20		
D4	06:37:26			06:39:27			06:37:44		
C2	06:42:58			06:44:59			06:43:16		
D5	06:45:48			06:47:49			06:46:06		
B2	06:50:58			06:52:59			06:51:16		
D6	06:56:31			06:58:32			06:56:49		
D7	07:00:09			07:02:10			07:00:27		
C3	07:03:21			07:05:22			07:03:39		
D8	07:09:15			07:11:16			07:09:33		
A2	07:12:47			07:14:48			07:13:05		
C4	07:26:32			07:28:33			07:26:50		
D9	07:30:32			07:32:33			07:30:50		
C5	07:41:18			07:43:19			07:41:36		
D10	07:44:25			07:46:26			07:44:43		
B3	07:47:03			07:49:04			07:47:21		
C6	07:49:23			07:51:24			07:49:41		
C7	07:58:52			08:00:53			07:59:10		
D11	07:59:22			08:08:07			08:06:24		
B4	08:09:19			08:11:20			08:09:37		
D12	08:13:31			08:16:36			08:13:49		
B5	08:15:45			08:17:46			08:16:03		

Tabelle 16 zeigt die unterschiedlichen Fahrzeitberechnungen des kürzeren Güterzuges nach den einzelnen Szenarien: Basis, Szenario 1 und Szenario 2.

Tabelle 16: Fahrzeitberechnung Güterzug kurz

Güterzug (kurz)									
Station	Basis			Szenario 1			Szenario 2		
	Ankunft	Abfahrt	Wartezeit	Ankunft	Abfahrt	Wartezeit	Ankunft	Abfahrt	Wartezeit
A1		06:16:00			06:18:01			06:16:18	
B5	07:52:36			07:56:08			08:16:03		

Mit den Diagrammen Geschwindigkeit/Entfernung und Beschleunigung/Entfernung lässt sich das Verhalten des Güterzuges (Schwerpunkt der Studie) unter dem Einfluss des Personenverkehrs auf dem Schienenkorridor gemäß den definierten Szenarien vergleichen. Für das Basisszenario fährt der Güterzug allein, und so ist es möglich, die durch die Infrastruktur vorgegebenen Grundbedingungen zu sehen, d. h. die Höchstgeschwindigkeiten und damit die spezifischen Beschleunigungs- und Verzögerungsmomente.

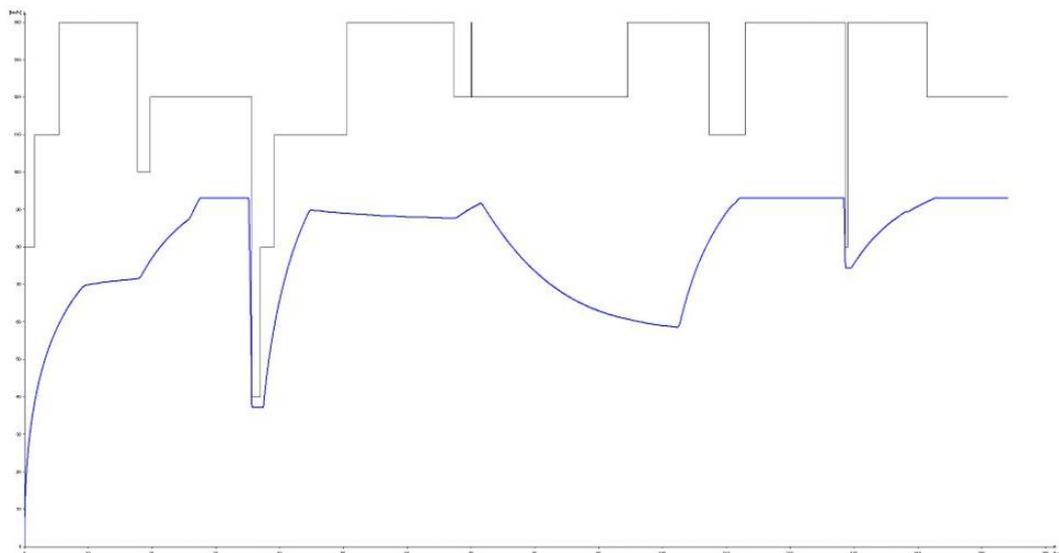


Abbildung 44: Geschwindigkeit/Distanz (km/h – km) Basis Szenario

Im Basisszenario gibt es zwei Punkte, an denen die Infrastruktur eine Geschwindigkeitsbeschränkung vorschreibt und an denen der Zug langsamer fahren muss: Die Kilometerpunkte 35 und 128. Daraus ergeben sich begrenzte Zeiträume, in denen der Zug beschleunigen und abbremsen muss.

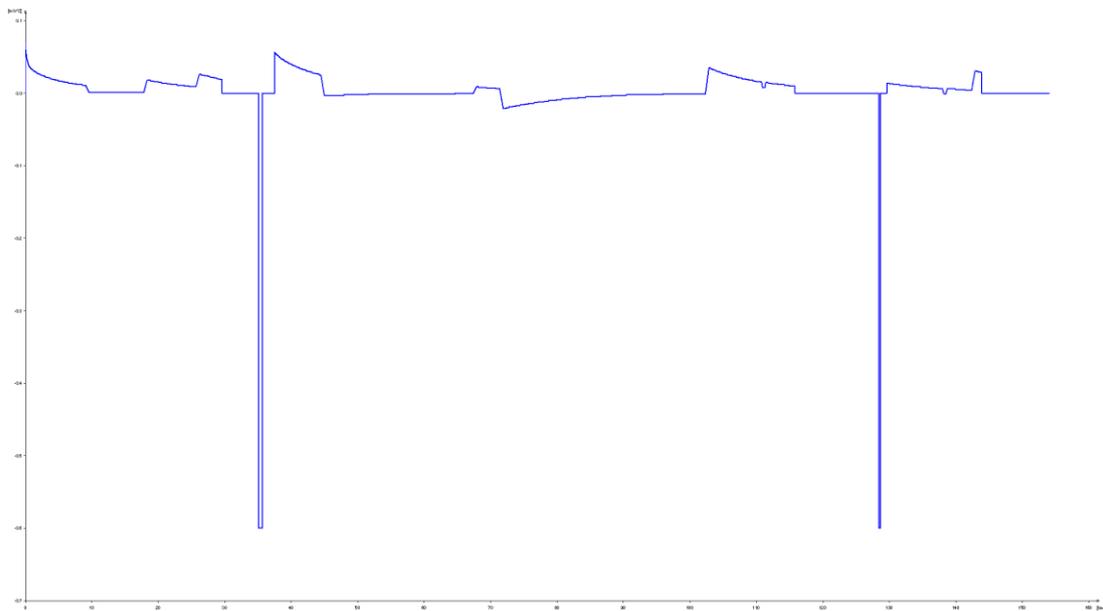


Abbildung 45: Beschleunigung/Distanz (km/h² – km) Basis Szenario

In Szenario 1, in dem der Güterzug nicht durch einen vor ihm fahrenden Intercity-Zug beeinträchtigt wird, weil der Güterzug den Personenzug nicht einholt, gibt es keine neuen weiteren Einschränkungen. Mit anderen Worten, der planmäßige Halt des Intercity-Zuges verursacht keinen zusätzlichen Halt des Güterzuges.

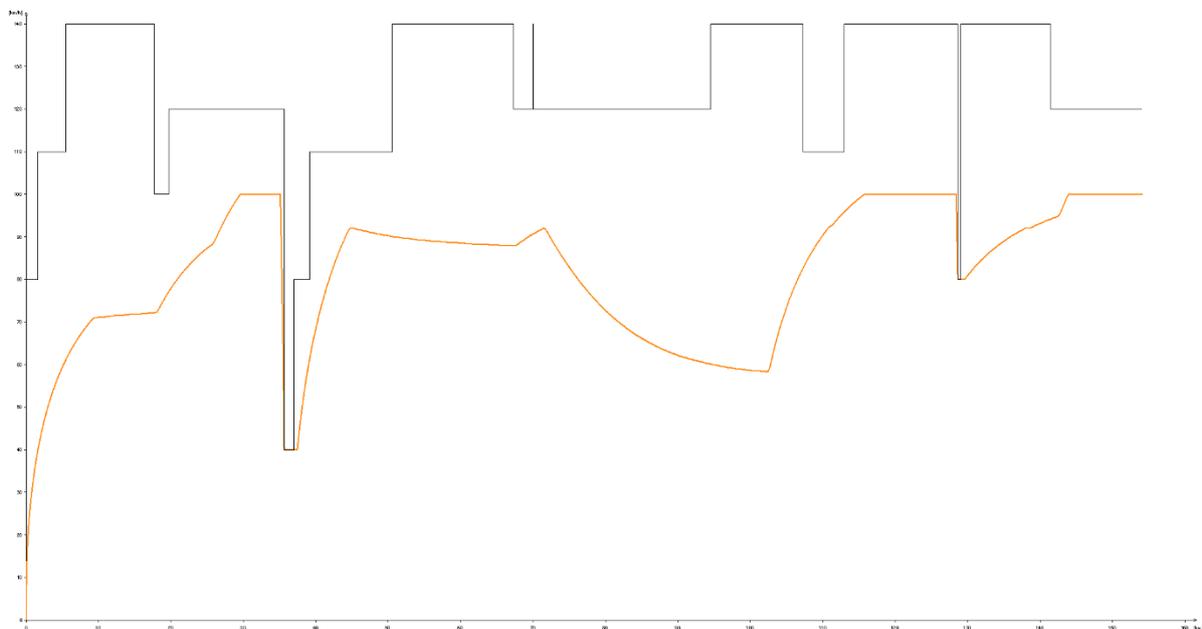


Abbildung 46: Geschwindigkeit/Distanz (km/h – km) Szenario 1

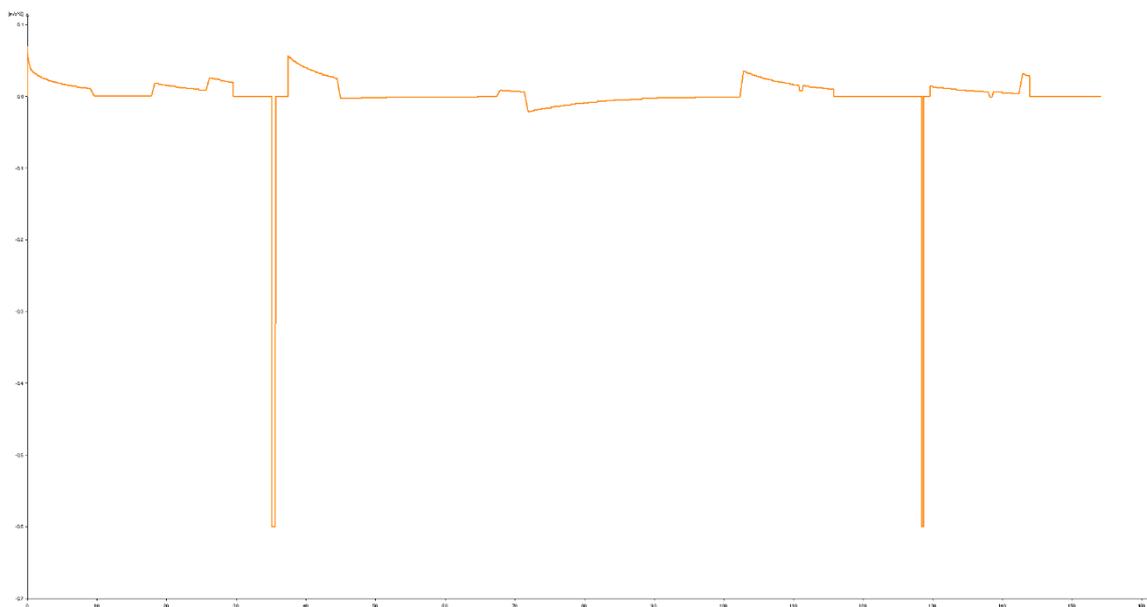


Abbildung 47: Beschleunigung/Distanz (km/h² – km) Szenario 1

Das Gleiche gilt für Szenario 2, bei dem der Güterzug nicht von einem vor ihm fahrenden Regionalzug betroffen ist, weil der Güterzug den Personenzug nicht einholt, so dass es keine weiteren Einschränkungen gibt. Mit anderen Worten, der planmäßige Halt des Intercity-Zuges verursacht keinen zusätzlichen Halt des Güterzuges.

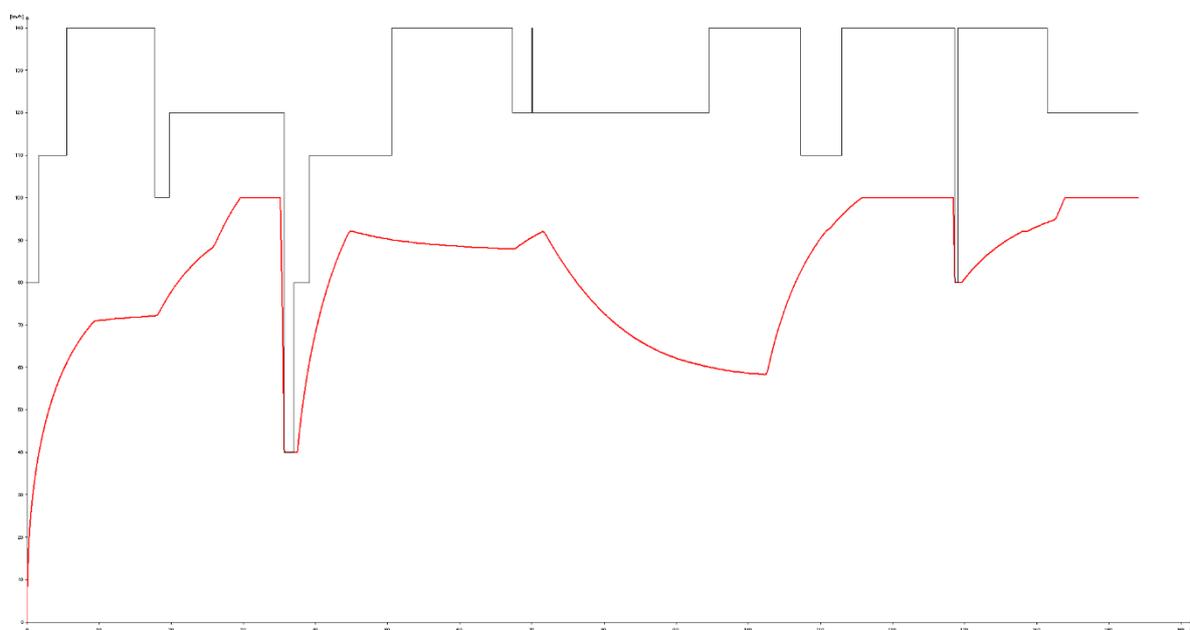


Abbildung 48: Geschwindigkeit/Distanz (km/h – km) Szenario 1

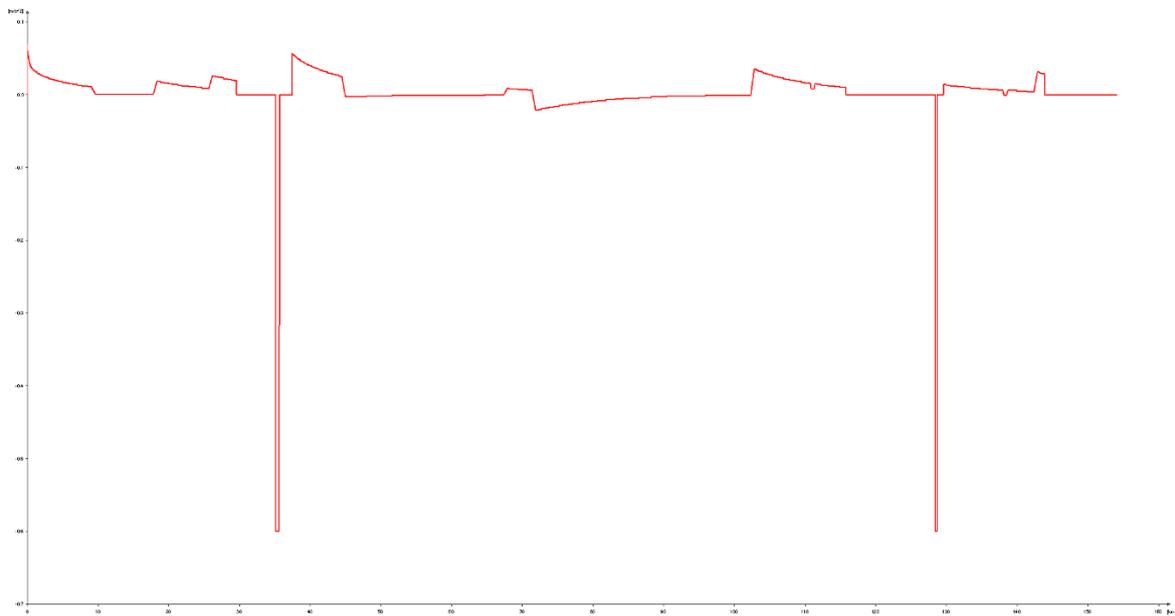


Abbildung 49: Beschleunigung/Distanz (km/h² – km) Szenario 1

In den Diagrammen sind die gleichen beiden Punkte der Geschwindigkeitsbegrenzung dargestellt: Kilometerpunkte 35 und 128.

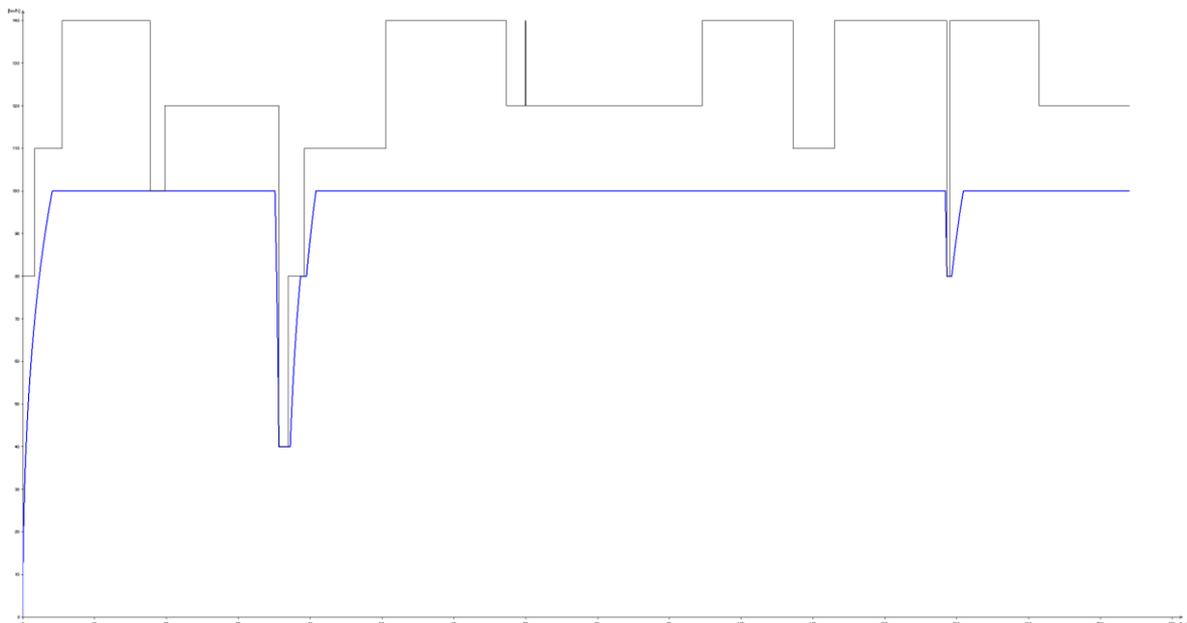


Abbildung 50: Geschwindigkeit/Distanz (km/h – km) Basisszenario (Güterzug kurz)

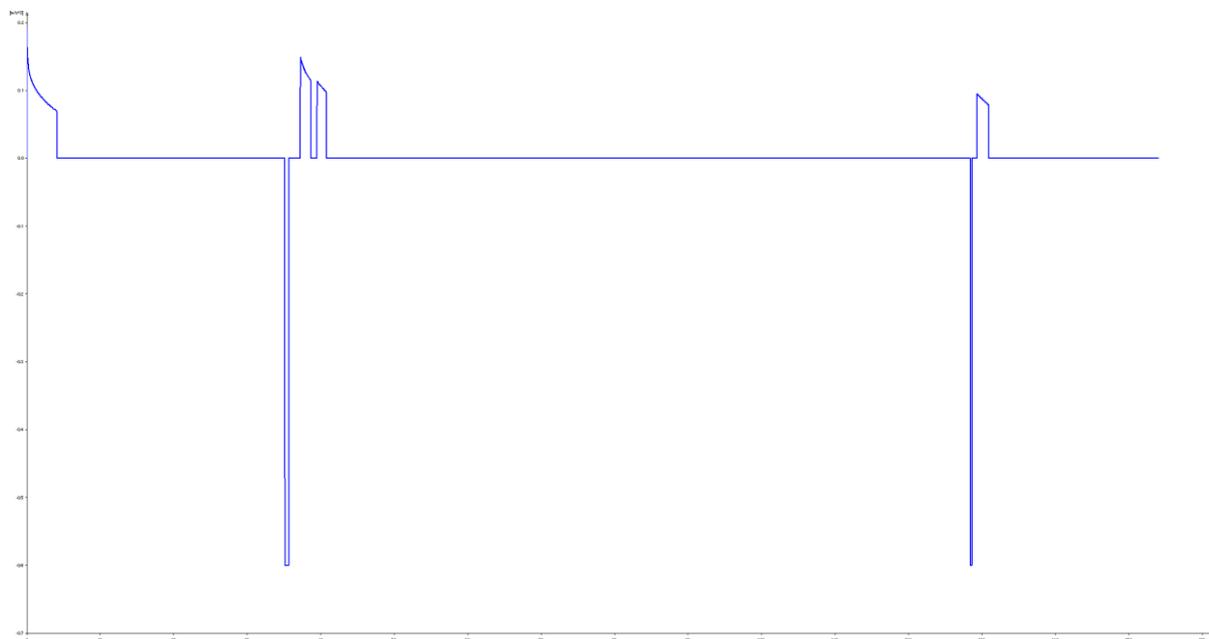


Abbildung 51: Beschleunigung/Distanz (km/h² – km) Szenario 1 (Güterzug kurz)

In Szenario 1, in dem der kürzere Güterzug durch einen vorausfahrenden Intercity-Zug beeinträchtigt wird, kommt es bei Kilometer 17 zu einem Wechsel, bei dem der Güterzug anhalten muss, weil der hintere Streckenabschnitt durch den Personenzug belegt ist. Mit anderen Worten, der erste planmäßige Halt des Intercity-Zuges führt dazu, dass der vorausfahrende kürzere Güterzug für kurze Zeit stehen bleibt. Später holt der kürzere Güterzug den Personenzug nicht mehr ein, so dass es zu keinen weiteren Einschränkungen mehr kommt.

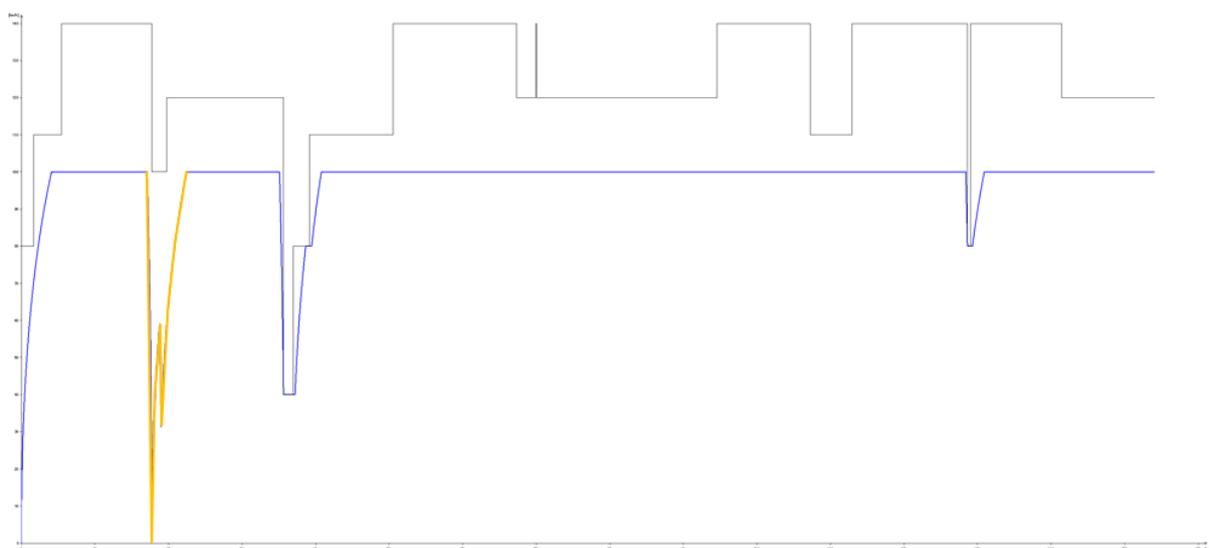


Abbildung 52: Geschwindigkeit/Distanz (km/h – km) Szenario 1 (Güterzug kurz)



Abbildung 53: Beschleunigung/Distanz (km/h² – km) Szenario 1 (Güterzug kurz)

In Szenario 2 wird der kürzere Güterzug durch die Fahrt eines entgegenkommenden Regionalzugs beeinträchtigt. Hier sind die Auswirkungen viel größer, weil der Regionalzug eine größere Anzahl planmäßiger Halte auf kürzeren Entfernungen hat als der Intercity-Zug. So gibt es vier neue Stellen, an denen der kürzere Güterzug anhalten muss (Kilometer 5, 19, 76 und 90), und eine Stelle, an der der Zug zwar nicht anhält, aber stark abbremsen muss (Kilometer 58).

Bis zum letzten neuen Beschränkungspunkt (Kilometer 90) holt der Güterzug den Personenzug nicht mehr ein, so dass es keine neuen Beschränkungen gibt.

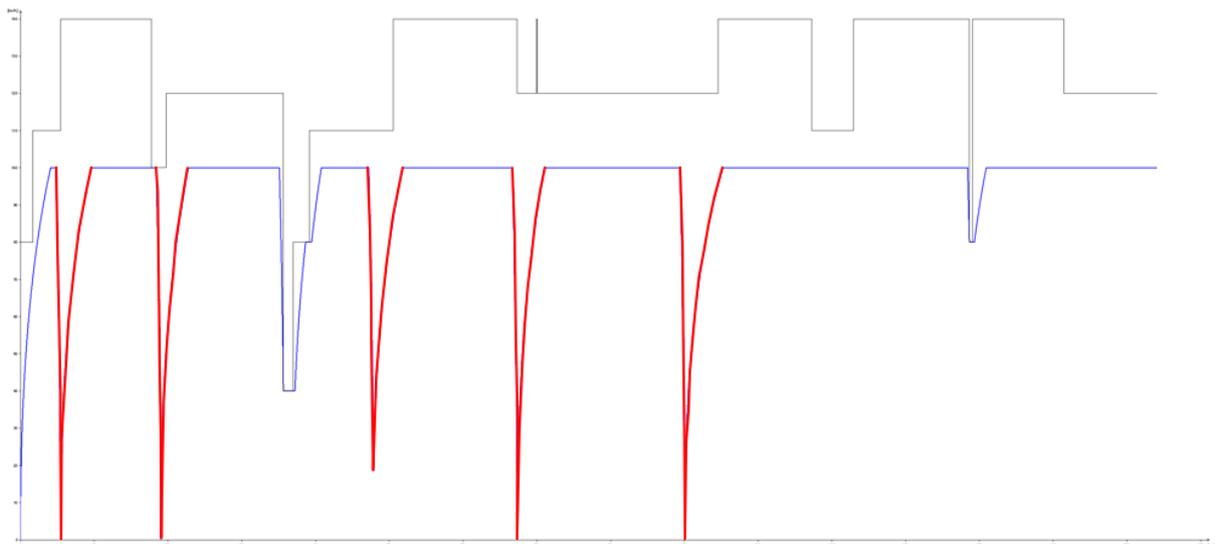


Abbildung 54: Geschwindigkeit/Distanz (km/h – km) Szenario 2 (Güterzug kurz)

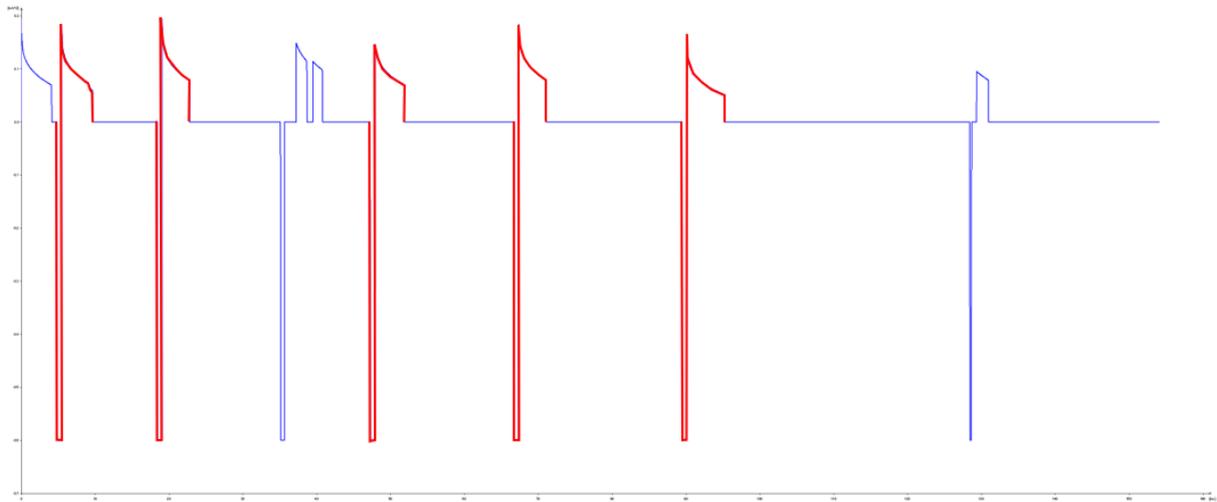


Abbildung 55: Beschleunigung/Distanz (km/h² – km) Szenario 2 (Güterzug kurz)

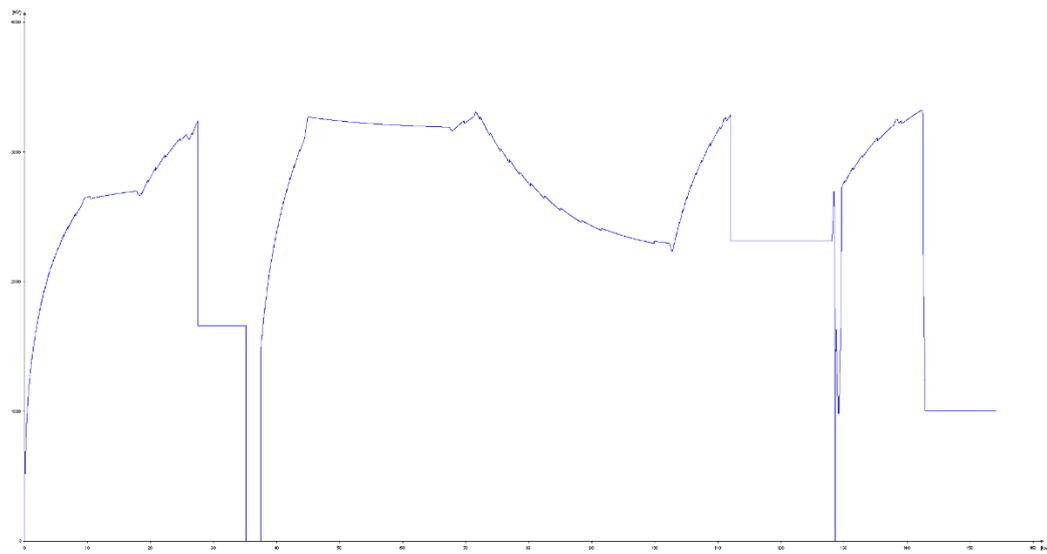


Abbildung 56: Leistungsaufnahme/Distanz (kW – km) alle Szenarien

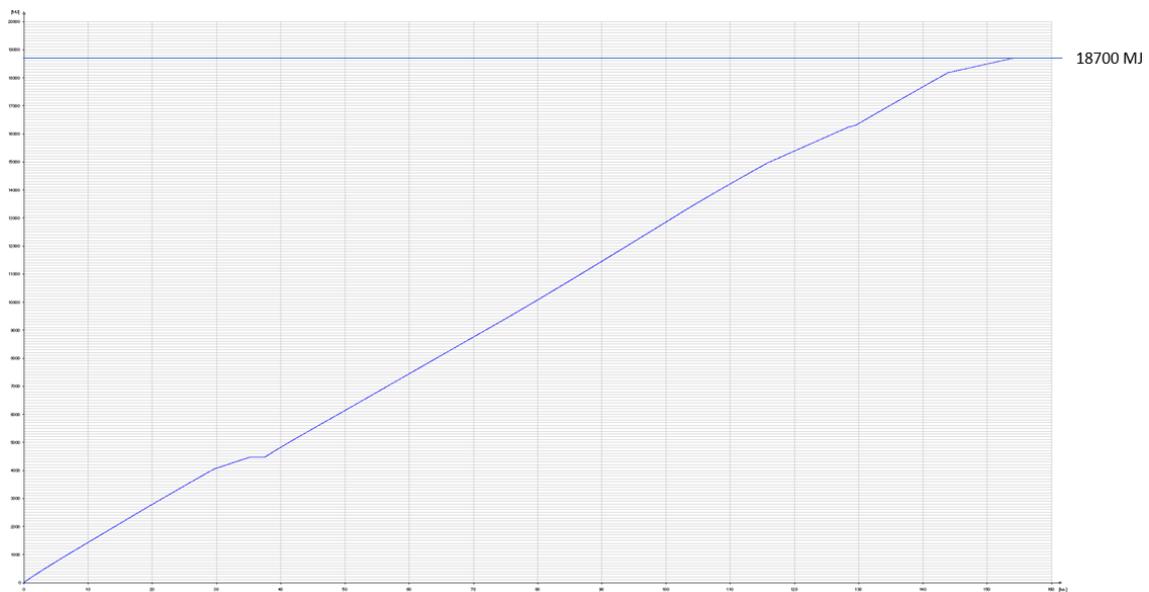


Abbildung 57: Energieaufnahme/Distanz (MJ – km) alle Szenarien

In Anbetracht des kürzeren Güterzuges (13 Waggons) gibt es Unterschiede zwischen dem Basis- und den beiden Szenarien in Bezug auf den Energieverbrauch, die mit den neuen energieaufwendigen Beschleunigungsphasen zusammenhängen.

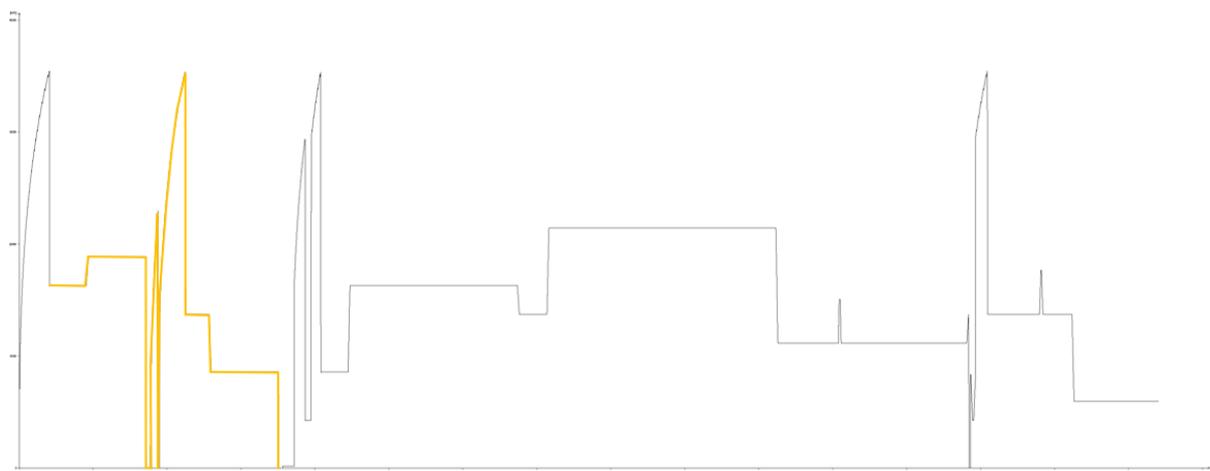


Abbildung 58: Leistungsaufnahme/Distanz (kW – km) Basis & Szenario 1 (Güterzug kurz)

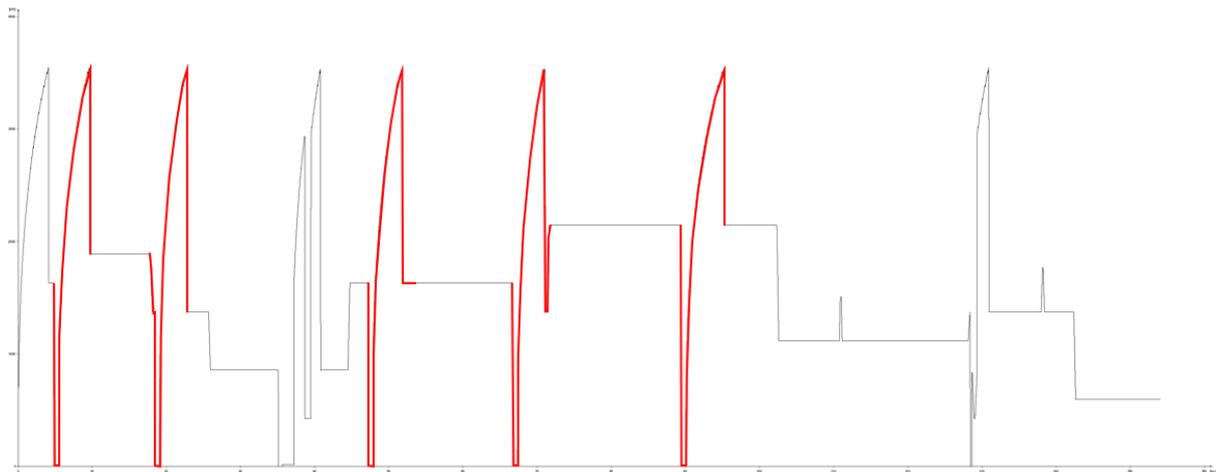


Abbildung 59: Energieaufnahme/Distanz (kW – km) Basis & Szenario 2 (Güterzug kurz)

Der Energiebedarf für die drei verschiedenen Szenarien ist in Tabelle 17 aufgeführt.

Tabelle 17: Energiebedarf langer & kurzer Güterzug - alle Szenarien

Szenario	Energie langer Güterzug (30 Wagen) [MJ]	Energie kurzer Güterzug (13 Wagen) [MJ]
Basis	18700	7890
Szenario 1	18700	8470
Szenario 2	18700	9920