

Kapazitätsanalyse von zweigleisigen Mischverkehrsstrecken

Parameteranalyse Geschwindigkeit

Masterarbeit
2012

Daniel Pirkopf, BSc
Matrikelnummer: 0931435

Betreuer:
Peter Veit
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn.
+43 316 873 6217
Peter.Veit@tugraz.at



Vorwort und Danksagung

Diese Masterarbeit entstand aufgrund des Spannungsfeldes zwischen der zunehmenden Bedeutung von Hochgeschwindigkeit im Personenfernverkehr, welche bei Realisierung auf Mischverkehrsstrecken zwangsläufig zu Kapazitätsverlusten führt, und den europäischen Entwicklungen, wie der Liberalisierung des Schienenverkehrs, die zusätzlich Kapazitäten in Form von Zugtrassen erfordern.

Das Interesse an dieser Problemstellung veranlasste mich diese Arbeit am Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft in Zusammenarbeit mit der ÖBB Infrastruktur AG zu verfassen.

Mein ganz besonderer Dank gilt demnach Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Peter Veit für die Betreuung der Masterarbeit. Sein ständiger Einsatz bei Problemen organisatorischer und fachlicher Art hat maßgeblich zum erfolgreichen Abschluss der Arbeit beigetragen.

Herzlich bedanken möchte ich mich weiters bei Herrn Dipl.-Ing. Stefan Walter für ständige konstruktive Gespräche und seine Mithilfe bei der Findung neuer Ideen und Lösungsansätze. Zudem war mir das gesamte Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft bei der Organisation und bei der Beantwortung zahlreicher Fragen behilflich.

Ein Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Dietmar Zierl und Herrn Dipl.-Ing. Mark Topal-Gökceli für die Betreuung von Seiten der ÖBB Infrastruktur AG.

An dieser Stelle möchte ich mich ganz herzlich bei meinen Eltern Priska und Wilfried Pirkopf bedanken, die mich nicht nur während meiner Studienzzeit, sondern während meines gesamten Lebens bedingungslos unterstützt haben. Ohne ihre Geduld, ihre Herzlichkeit, ihren ständigen Rat und ihre finanzielle Unterstützung wäre ein Studium in diesem Ausmaß nicht möglich gewesen.

Des Weiteren bedanke ich mich bei allen Freunden, Studienkollegen und Weggefährten, mit denen ich eine unvergessliche Studienzzeit erleben durfte.

Daniel Pirkopf, BSc

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am 01.06.2012

Kurzfassung

Diese Masterarbeit beschäftigt sich mit der Kapazitätsproblematik auf zweigleisigen Mischverkehrsstrecken bei zunehmendem Geschwindigkeitsunterschied zwischen Zügen unterschiedlicher Gattungen, insbesondere bei höheren Geschwindigkeiten im Personenfernverkehr.

Neben der Geschwindigkeitsschere zwischen ungleich schnellen Zuggattungen bestimmen zahlreiche infrastrukturbedingte und betriebliche Parameter die Kapazität eines Streckenabschnitts. Eine Kapazitätsanalyse, die unter Variation der Ausprägung der Einflussfaktoren anhand einer auf Durchschnittswerten basierenden Modellstrecke erfolgt, dient als Grundlage für eine allgemein gültige Einschätzung der Größenordnung der Einflüsse der Parameter.

Die Variationsanalyse zeigt, dass eine Anhebung der Höchstgeschwindigkeiten im Personenfernverkehr auf zweigleisigen Mischverkehrsstrecken die Kapazität zwar beschränkt, deren Einfluss auf die Kapazität jedoch im Vergleich zu weiteren Einflussgrößen gering ist. Bei Durchführung kapazitätssteigernder Maßnahmen können höhere Kapazitätsgewinne erzielt werden, als die Kapazitätsverluste bei Anhebung der Geschwindigkeiten des Personenfernverkehrs ausmachen.

Bei ausschließlicher Betrachtung der Streckenkapazitäten sind demnach Geschwindigkeitserhöhungen im Personenfernverkehr auf zweigleisigen Mischverkehrsstrecken gekoppelt mit kapazitätserhöhenden Maßnahmen realisierbar.

Abstract

This Master's thesis deals with capacity problems on double tracked mixed traffic train sections, due to an increasing difference in speed between different types of trains.

In addition to the speed differential between different train types, the capacity of a train section is determined by a number of infrastructural and operational parameters. A capacity analysis varying the dimensions of the influencing factors was carried out. The analysis is based on average parameters of a virtual section and serves as a basis for a generally applicable assessment of the magnitude of the parameters' influences.

The analysis shows that the increase of maximum speeds of long-distance passenger trains on double tracked mixed traffic sections limits the capacity. However, compared to other influencing factors its effects are minor. Capacity-enhancing measures can lead to gains in capacity higher than the capacity loss due to increased speeds of long-distance passenger trains.

Exclusively considering line capacities, speed increases of long-distance passenger trains on double tracked mixed traffic sections combined with capacity-enhancing measures can be implemented.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort und Danksagung	2
Eidesstattliche Erklärung	3
Kurzfassung	4
Abstract	5
1 Einleitung	8
1.1 Ausgangslage	8
1.2 Aufgabenstellung	9
2 Nationale und europäische Entwicklungen	10
2.1 Nationale Entwicklung – Zielnetz 2025+	10
2.2 Europäische Entwicklungen	12
2.2.1 Interoperabilität	12
2.2.2 Liberalisierung des Schienenverkehrs	14
2.2.3 TEN-Netze	15
3 Relevanz und Nutzen von Hochgeschwindigkeitsverkehr	19
3.1 Verkehrsnachfrage	19
3.2 Reisezeiten	22
3.2.1 Güterverkehr	22
3.2.2 Personenverkehr	23
3.3 Taktfahrplan	26
3.4 Zusammenfassung der Erkenntnisse	28
4 Systemtechnik zur betrieblichen Abwicklung des Schienenverkehrs	29
4.1 Definitionen von Fahrweegelementen	29
4.2 Abstandhaltetechniken im Schienenverkehr	31
4.3 Zugbeeinflussung in Europa	35
4.4 Zugfolge	35
4.5 Fahrplankonstruktion	38
5 Grundlagen zur Kapazität	41
5.1 Unterschiedliche Betrachtungsstandpunkte zur Kapazität	41
5.2 Zusammenspiel von Kapazität, Infrastruktur, Produktionsplan und Qualität	42
5.3 Einflussfaktoren auf die Kapazität	45
5.3.1 Geschwindigkeitsschere	45
5.3.2 Haltestellen am Hauptgleis	47
5.3.3 Blockabstand	48
5.3.4 Pufferzeit	49
5.3.5 Brems- und Beschleunigungsvorgänge	49
5.4 Allgemeine Maßnahmen zur Erhöhung der Streckenleistungsfähigkeit	50
6 Ermittlung der Streckenkapazitäten	51
6.1 Fahrplanunabhängige Methode der SBB/ÖBB	51
6.1.1 Grundlagen zum Rechenmodell und die Ausprägungen der Einflussfaktoren	51
6.1.2 Rahmenbedingungen und Vereinfachungen für die Berechnungen	62
6.2 Betriebssimulationssoftware – RailSys	64
6.2.1 Vergleichsmethode nach Richtwerten des UIC-Kodex	64
6.2.2 Methode der Störungssimulation	66

6.3	Modellabgleich.....	67
6.3.1	Aufstellung der Eingangsdaten	67
6.3.2	Ergebnisse des Abgleichs.....	72
7	Variationsanalyse	75
7.1	Auswertungen der Analyse	75
7.1.1	Halte	75
7.1.2	Pufferzeit	77
7.1.3	Blocklänge.....	83
7.1.4	Kombinierte Betrachtung der Blocklänge und Pufferzeit.....	88
7.1.5	Längsneigung	90
7.1.6	Geschwindigkeitsschere	93
7.2	Erkenntnisse aus der Analyse	102
8	Vereinfachte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	104
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	110
	Abkürzungsverzeichnis	112
	Abbildungsverzeichnis	113
	Tabellenverzeichnis.....	115
	Literaturverzeichnis	116

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Verkehr bietet im Wesentlichen die Grundlage für die Entwicklung einer Gesellschaft und deren Wirtschaft [1]. Demnach ist es wichtig, den Anforderungen der Zeit im Eisenbahnwesen – im Güter- und Personenverkehr gleichermaßen – gerecht zu werden. Im Personenfernverkehr geht der Trend durch steigende Anforderungen an Reisezeiteinsparungen zu immer höheren Geschwindigkeiten, während im Güterverkehr bei derzeitigem Entwicklungsstand keine wesentlichen Geschwindigkeitserhöhungen absehbar sind. Eine Anhebung der Höchstgeschwindigkeit auf Bestandsstrecken, bei welchen die Trassierung dies zulässt und abschnittsweise neue Trassierungen von Streckenabschnitten, um Hochgeschwindigkeit möglich zu machen, gewinnen in Europa immer mehr an Bedeutung. Geschwindigkeitserhöhungen auf Österreichs Hochleistungsstrecken, auf welchen Mischverkehr betrieben wird, bringen betriebliche Herausforderungen für den Infrastrukturbetreiber mit sich, da durch die größer werdende Geschwindigkeitsschere mit Verlust von Kapazität zu rechnen ist.

Die Entwicklung im europäischen Eisenbahnwesen geht dahin, das nationalstaatenübergreifende Eisenbahnnetz weiter auszubauen. Diese Tatsache, die vorangeschrittene Liberalisierung des Schienenverkehrs im Güter- und Personenverkehr und die daraus resultierende Entstehung unabhängiger Eisenbahnverkehrsunternehmen wirft immer wieder die Frage nach Erhöhung der Streckenleistungsfähigkeit auf hochfrequentierten Eisenbahnstrecken auf. Eine optimierte Nutzung der Streckenabschnitte wird durch Verdichtungen der Zugintervalle, welche zu Kapazitätserhöhungen führen, erreicht. Die Schwierigkeit besteht darin zusätzliche Zugtrassen lukrieren zu können ohne die Stabilität des Fahrplans maßgebend zu gefährden.

Zusammengefasst heißt das, dass einerseits höhere Geschwindigkeiten erwünscht sind, welche auf Kosten der Kapazität möglich wären, während auf der anderen Seite zusätzliche Zugtrassen für steigende Zugzahlen lukriert werden müssen. Diese Problemstellung bildet die Grundlage dieser Masterarbeit.

1.2 Aufgabenstellung

In dieser Arbeit soll ein Überblick über die derzeitigen nationalen und europäischen Entwicklungen gegeben und auf das Potential und den Nutzen von Hochgeschwindigkeitsverkehr ($V_{\max} \geq 200\text{km/h}$) in Österreich eingegangen werden.

Kern der Arbeit ist eine Kapazitätsanalyse von zweigleisigen Mischverkehrsstrecken auf Basis eines fahrplanunabhängigen stochastischen Rechenmodells. Die Anforderung ist es zu veranschaulichen, welchen Einfluss die einzelnen Parameterausprägungen einer Strecke auf die Kapazität eines Streckenabschnitts **bei ausschließlicher Betrachtung der Streckenkapazitäten** über einen definierten Zeitraum unter spezieller Betrachtung der Variation der Ausprägung der Einflussfaktoren haben.

Mittels einer Betriebssimulationssoftware soll ein Abgleich ermittelter Kapazitätswerte erfolgen, um sicherzustellen, dass trotz vereinfachter Annahmen im stochastischen Modell realitätsnahe Ergebnisse erzielt werden.

Es ist das Ziel allgemeingültige Aussagen zu treffen, die für ein zweigleisiges Streckennetz Anwendung finden, Tendenzen der Einflüsse erkennen zu lassen und Vergleichswerte für zukünftige Kapazitätsüberlegungen zu bieten.

Eine Umlage von realen Anlagekosten auf die pro Gleis verkehrenden Züge soll als vereinfachte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung angeführt werden.

2 Nationale und europäische Entwicklungen

Durch die ständig steigenden Mobilitätsbedürfnisse der Bevölkerung ist das Verkehrsaufkommen in den letzten Jahrzehnten kontinuierlich gewachsen [2]. Da auch Prognosen für die nächsten Jahrzehnte keine Trendänderung erwarten lassen, kann auch in Zukunft von erhöhten Verkehrszahlen ausgegangen werden [3]. Demnach sollte eine Stärkung der Marktposition der Schiene erzielt werden und die Zugzahlen auf Europas Eisenbahnen gesteigert werden, was abgesehen von europaweiten Maßnahmen im Wesentlichen durch die Erhöhung der Streckenkapazitäten, die Anhebung der Streckengeschwindigkeiten und die Reduktion der Fahrzeiten realisierbar ist. Es sind daher betriebliche Maßnahmen als auch Maßnahmen an der Infrastruktur gleichermaßen für die Stärkung der Marktposition notwendig.

2.1 Nationale Entwicklung – Zielnetz 2025+

In Österreich werden Infrastrukturmaßnahmen über das Zielnetz 2025+ definiert, auf welches in aller Kürze eingegangen wird, da die Infrastruktur mit den Streckengegebenheiten die Basis für jegliche Kapazitätsüberlegungen bietet.

Unter dem Zielnetz 2025+ versteht man die Infrastrukturstrategie, bis zum Jahr 2025 ein *„strategisch konsistentes und zwischen Infrastruktur, Absatzbereichen, dem BM für Verkehr, Innovation und Technologie, sowie dem BM für Finanzen abgestimmtes Maßnahmenprogramm“* (aus [4] S. 6) zu schaffen, in welchem verbindliche Ziele für das Österreichische Bahnnetz verankert sind.

Primär soll die Stärkung der Marktposition der Bahn auch unter Betrachtung des grenzüberschreitenden Verkehrs vollzogen werden und das Güterverkehrsaufkommen auf der Schieneninfrastruktur erhöht werden. Durch eine höhere Qualität im Schienenverkehr und ein steigendes Angebot der Infrastruktur kann die Nachfrage im Personenverkehr gesteigert und zusätzliche Fahrgäste lukriert werden. Somit wird für den Personenfernverkehr angestrebt, die Fahrgastzahlen zwischen überregionalen Zentren bei hohem Nachfragepotenzial zu steigern, beziehungsweise langfristig stabil zu halten. Im Nahverkehrsbereich geht die Zielsetzung dahin, durch Streckenausbau und Ausbau von Bahnhöfen ausreichend Kapazitäten in Form von Fahrplantrassen zu schaffen, um den Nahverkehr bei steigenden Zugzahlen ausreichend bedienen zu können. Durch den Aus- und Neubau von Eisenbahnabschnitten auf internationalen Korridoren (TEN-Achsen) ist der Anspruch ein Wachstum des Güterverkehrs auf Österreichs Eisenbahnstrecken [3].

Ziel ist es, auf Basis von zukunftsorientierter Planung das Infrastrukturangebot nur an jenen Strecken zu verbessern, an denen die Verkehrsnachfrage entsprechend hoch ist. Bei Strecken, die wenig Nachfragepotenzial aufweisen und bei welchen auch in Zukunft keine wesentlichen Entwicklungsänderungen vorherzusehen sind, werden die Infrastrukturinvestitionen auf dem Schienensektor auf ein Minimum reduziert [4].

Bis zum Jahr 2025 erfolgt die Umsetzung der Zielvorstellungen des Zielnetzes. Laut dem Infrastrukturbetreiber wird die Kapazität auf Österreichs Strecken durch, die im Zielnetz definierten Errichtungs- und Modernisierungsmaßnahmen um 30 Prozent gesteigert [5].

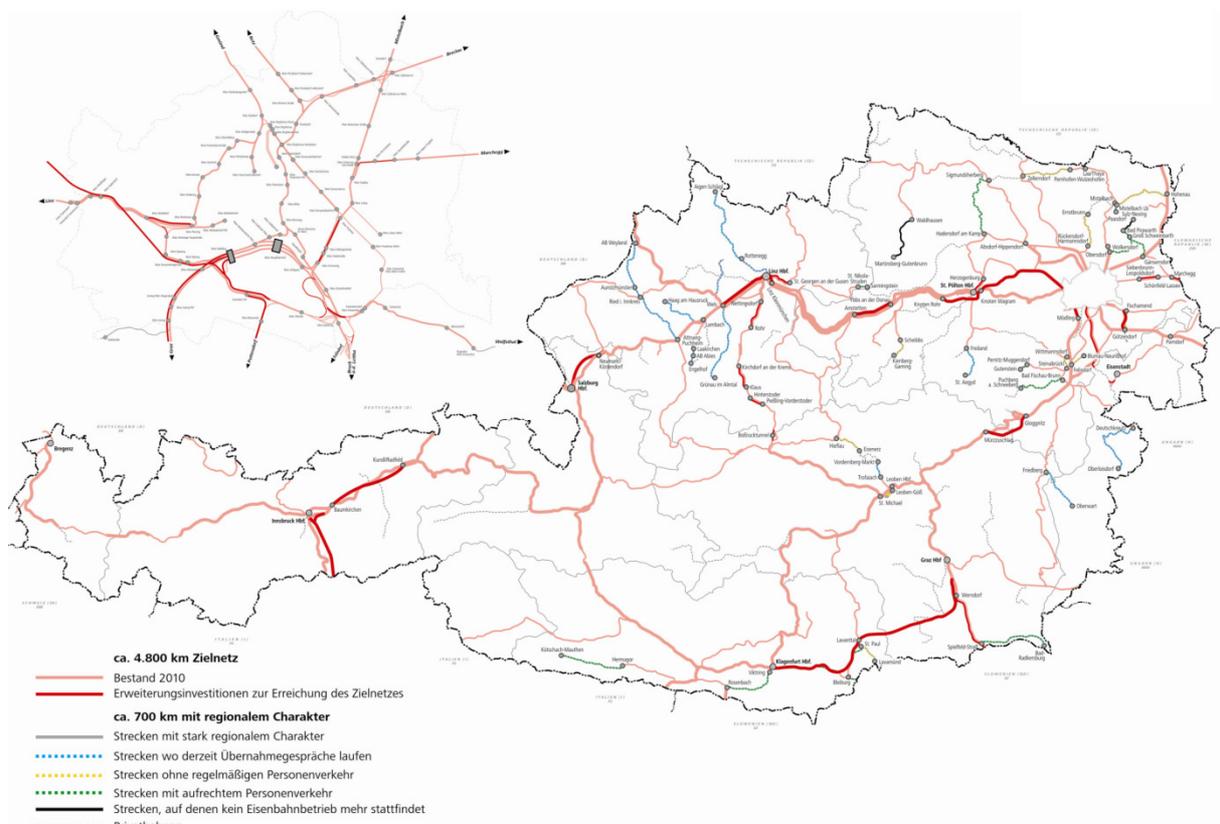


Abbildung 1 – Erweiterungsinvestitionen zur Erreichung des Zielnetzes 2025+ [4]

2.2 Europäische Entwicklungen

In der Europäischen Union haben sich durch verbindlich in die nationale Gesetzgebung einzuarbeitende EU-Richtlinien zahlreiche Vorschläge und Verpflichtungen für die Mitgliedstaaten ergeben, die dazu beitragen, das zukunftsorientierte europäische Eisenbahnwesen voranzutreiben. Dies hat mitunter dazu geführt, Hochgeschwindigkeitsverkehr zu fördern beziehungsweise Überlegungen über die best- und schnellstmögliche Abwicklung von Verkehr anzustellen. Die maßgeblichen Entwicklungen sind:

- I die Interoperabilität
- I die Liberalisierung des Schienenverkehrs und
- I das TEN-T Netz.

Jene drei Begriffe werden in den folgenden Absätzen näher behandelt. Es geht explizit darum, die Wichtigkeit der Überlegungen über Kapazitätserhöhungen verständlich zu machen, da diese Entwicklungen Einfluss auf den Anstieg der Zugzahlen und die Anzahl der erforderlichen Zugtrassen auf Streckenabschnitten in den nächsten Jahrzehnten haben.

2.2.1 Interoperabilität

Europas Bahnsysteme sind über Jahrzehnte mit unterschiedlichen nationalen technischen Standards entwickelt und errichtet worden. Unterschiedliche Systeme und Zulassungen machen einen grenzüberschreitenden Bahnverkehr kompliziert. Infrastrukturseitig bedeutet dies, dass die Staaten Europas unterschiedliche Zugsicherungssysteme, Signalsysteme, Spurweiten, usw. verwenden. Das führt dazu, dass für das Befahren der Infrastruktur mehrerer Staaten Mehrsystemfahrzeuge oder ein Lokwechsel an den Grenzen von Nöten sind. Diesem Problem versucht die Europäische Union seit 1996 mit Richtlinien entgegenzuwirken [7].

Unter Interoperabilität versteht man demnach „die Einigung des transeuropäischen Eisenbahnsystems für den sicheren und durchgehenden Zugverkehr“ (aus [7] S. 1). Um den grenzüberschreitenden Verkehr möglich und die unterschiedlichen Bahnsysteme der EU Mitgliedsstaaten für alle Eisenbahnverkehrsunternehmen befahrbar zu machen, bedarf es Festlegungen einheitlicher technischer Mindestanforderungen für Eisenbahnsysteme. Es gibt demnach technische Vorschriften, sogenannte „Technische Spezifikationen für die Interoperabilität (TSI)“, welche verbindlich auf dem europäischen Eisenbahnnetz

einzuhalten sind. Hierbei wird jedoch unterschieden zwischen den TSI des transeuropäischen Hochgeschwindigkeitsbahnsystems und den TSI des konventionellen Eisenbahnsystems.

Die technischen Vorschriften definieren als Hochgeschwindigkeitsstrecken jene mit Geschwindigkeiten größer als 200 km/h [6]. An dieser Definition wird bei Aussagen über Hochgeschwindigkeit in dieser Arbeit durchgehend festgehalten.

Jene Strecken des ausgewiesenen Hochgeschwindigkeitsbahnsystems müssen für das Befahren von Hochgeschwindigkeitszügen, die mittels Fahrzeugregister festgelegt sind, aufgerüstet werden, auch wenn diese nicht mit Hochgeschwindigkeit befahren werden können. Jene Strecken, die nicht als HGV-Strecken vorgesehen sind, jedoch von internationalen Zügen befahren werden, unterliegen den TSI für interoperable konventionelle Strecken. Die hier verkehrenden Fahrzeuge müssen im Fahrzeugregister für konventionelle Fahrzeuge festgeschrieben sein. Strecken, die nicht für international verkehrenden Eisenbahnverkehr ausgewiesen worden sind, unterliegen keinen europäischen Mindestanforderungen.

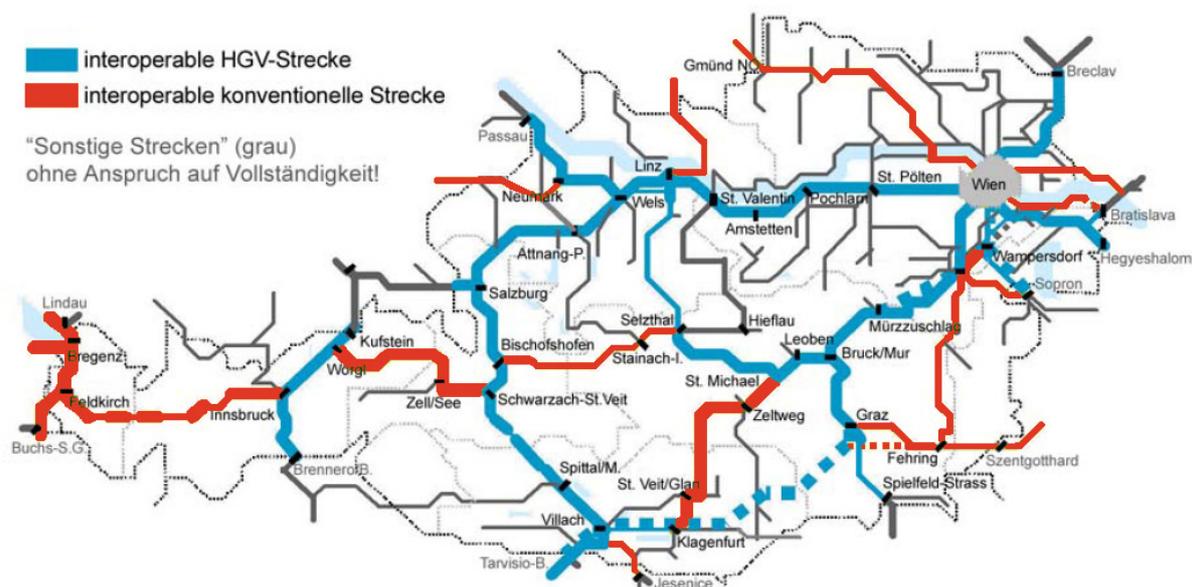


Abbildung 2 – geografischer Anwendungsbereich der Interoperabilitätsrichtlinie und der TSI ([7] S. 4)

Die Abbildung 2 zeigt, dass alle österreichischen Hauptachsen mit Ausnahme der Arlbergachse als interoperable HGV-Strecken vorgesehen sind, auch wenn diese nur zum Teil für Geschwindigkeiten über 200 km/h ausgelegt sind. Die Österreichischen Hauptachsen, die für das Befahren mit Hochgeschwindigkeitsverkehr ausgelegt werden sind somit die Westbahn, Südbahn, Brennerachse, Pyhrn-Schober-Achse und die

Tauernachse. Die Möglichkeiten, vor allem Güterverkehr durch das Wegfallen von langen Wartezeiten an Grenzübergängen mit weniger Kosten durchzuführen, lässt einen Anstieg des Güterverkehrsaufkommens auf der Schiene erwarten, was wiederum Auswirkungen auf die benötigte Kapazität der Hauptachsen haben wird.

Auf die genauen festgelegten technischen Mindestanforderungen wird in dieser Arbeit nicht näher eingegangen, da das Ziel ist den Zusammenhang von Geschwindigkeitserhöhungen und Kapazität zu behandeln und nicht Detailangaben zu technischen Problemstellungen anzuführen.

2.2.2 Liberalisierung des Schienenverkehrs

Unter Liberalisierung des Schienenverkehrs versteht man die Marktöffnung des Eisenbahnsektors für private Eisenbahnverkehrsunternehmen im Personenverkehr gleichermaßen wie im Güterverkehr. Hierbei steht der Grundgedanke eines entstehenden Marktes mit Eisenbahnverkehrsunternehmen, die marktwirtschaftlich handeln, im Vordergrund. Es sollen die Monopolstellungen der nationalen Bahnen aufgebrochen und die Schieneninfrastruktur für internationale und private Eisenbahnverkehrsunternehmen zugänglich gemacht werden. Ziel ist es, die Wettbewerbsfähigkeit der Bahn gegenüber anderen Verkehrsmitteln zu stärken. Dies bringt jedoch nicht nur organisatorische Schwierigkeiten mit sich, sondern hat maßgeblichen Einfluss auf die Trassenwünsche, Trassenvergabe und in weiterer Folge auf die Kapazität, da die Trassenvergabe und somit der Zugang von EVU zur Eisenbahninfrastruktur diskriminierungsfrei erfolgen muss. Bei der Zuweisung von Trassen wird demnach folgend vorgegangen:

Die ÖBB-Infrastruktur AG entscheidet über die Zuweisung von Zugtrassen unter Berücksichtigung der einschlägigen Rechtsvorschriften in der Reihenfolge der nachstehenden Grundsätze:

- 1. fristgerechte vor nicht fristgerechten Bestellungen*
- 2. vertraglich gebundene Zugtrassen vor Neubestellungen*
- 3. Zugtrassenbestellungen für regelmäßig verkehrende Züge vor Bestellungen für unregelmäßig verkehrende Züge*
- 4. Zugtrassenbestellungen mit längerer Laufzeit vor Bestellungen mit kürzerer Laufzeit*
- 5. Zugtrassen für lange Strecken vor Zugtrassen für kurze Strecken*
- 6. Zugtrassen für mehr Verkehrstage vor Zugtrassen für weniger Verkehrstage*

7. Zugtrassenbestellungen, die den Gegebenheiten der Schieneninfrastruktur bzw. dem Ziel einer effizienten Nutzung der Schieneninfrastruktur besser entsprechen. (aus [8] S. 4)

Da in Österreich im Personenverkehr üblicherweise der Taktfahrplan Anwendung findet, steht die Frage im Raum, ob Trassen nur zu vorgesehenen Taktzeiten erworben werden können, oder, ob EVU ausschließlich zusätzliche Trassen im Fernverkehr erwerben können, die jedoch nicht dem Taktfahrplan entsprechen. Diese Trassen würden bei Strecken mit Kapazitätsengpässen kaum Platz für Regionalzüge oder langsamere Güterzüge lassen. Die Trassenvergabe gestaltet sich demnach im Personenverkehr wesentlich schwieriger als im Güterverkehr. Es wird nur schwer möglich sein, diese reibungslos abzuwickeln [9].

Es gibt in der Europäischen Union zudem kein einheitliches Vergütungssystem und auch keine einheitlichen verursachergerechten Trassenpreise. Verursachergerechte Trassenpreise in Bezug auf die Kapazität würden bedeuten, dass Trassen für Züge, die aufgrund der Geschwindigkeiten (zu langsam oder zu schnell) die Kapazität beschränken, teurer verkauft werden müssten als Trassen für Züge mit harmonischen Geschwindigkeiten. Bei genauerer Betrachtung lässt sich daraus ableiten, dass es von enormer Wichtigkeit ist auf Strecken, die Kapazitätsprobleme aufweisen, genau zu wissen, welche Zugkategorien mit den jeweiligen Zuggeschwindigkeiten die Kapazität einer Strecke in welchem Ausmaß beschränken, um bei der Vergütung in Zukunft ein verursachergerechtes Abgabensystem zu entwickeln. Dieses ist für ein wirtschaftliches Handeln des Infrastrukturbetreibers wesentlich und macht eine effiziente Nutzung einer Strecke oder eines Streckenabschnittes möglich.

2.2.3 TEN-Netze

Ziel der Europäischen Union ist es, ein mitgliedstaatenübergreifendes Verkehrssystem zu schaffen, das über eine leistungsfähige Infrastruktur zur Stärkung der europäischen Wirtschaft verfügt, um Person- und Güterverkehr bei steigender Nachfrage auch in Zukunft ausreichend gewährleisten zu können. Auch, wenn in dieser Arbeit nur die eisenbahnrelevanten Hintergründe (oder Eisenbahnkorridore) Einzug finden, beschränken sich die TEN-Netze nicht ausschließlich auf Eisenbahnnetze. Verkehrsnetze mit umfassenden Verkehrsprojekten, wie das Straßennetz, Binnenwasserstraßennetz, Schifffahrtsweg, Flughafennetz, sowie ein Satellitennavigationssystem, sind ebenfalls Teil des transeuropäischen Verkehrsnetzes.

Dies bedeutet im Allgemeinen, dass durch Bündelung von Verkehrsprojekten innerhalb der Mitgliedstaaten ein gesamteuropäisches Verkehrsnetz entsteht. Um dieses Verkehrsnetz für Eisenbahnstrecken grenzüberschreitend zu realisieren, erfolgt ein Ausbau im Sinne von europäischen Achsen, unter Einbeziehung des Bestandsnetzes der jeweiligen Mitgliedstaaten. Es entsteht demnach ein europäisches Hochgeschwindigkeitsnetz beziehungsweise Strecken mit Hochgeschwindigkeitsverkehr, wodurch unter anderem die Attraktivität der Eisenbahn gesteigert werden soll, um gegenüber anderen Verkehrssystemen konkurrenzfähig zu bleiben [10].

Das TEN-Eisenbahnnetz besteht nach dem am 19.10.2011 von der EU-Kommission veröffentlichten Vorschlag von zehn staatenübergreifenden Korridoren aus dem „Core Network“ (Kernnetz) und dem „Comprehensive Network“ (Gesamtnetz), wobei das Kernnetz bis zum Jahr 2030 und das Gesamtnetz bis 2050 fertigzustellen ist. Bei dem Kernnetz handelt es sich primär um die Verbindungen der strategisch wichtigen und somit netzrelevanten Knotenpunkte in Europa, welche zur Abwicklung von Hauptverkehrsströmen dienen. Das Gesamtnetz wiederum dient zur Erschließung von Gesamteuropa und soll als „Zubringernetz“ zum Kernnetz fungieren. Die wesentlichsten Unterschiede zwischen dem Kernnetz und dem Gesamtnetz bestehen jedoch in den höheren technischen Anforderungen an das Kernnetz und den rechtlichen Rahmenbedingungen.

Die zehn Korridore lösen die Liste der 30 bisher definierten prioritären Projekte aus dem Jahr 2005 ab und können als Weiterentwicklung der bisherigen Projekte verstanden werden.

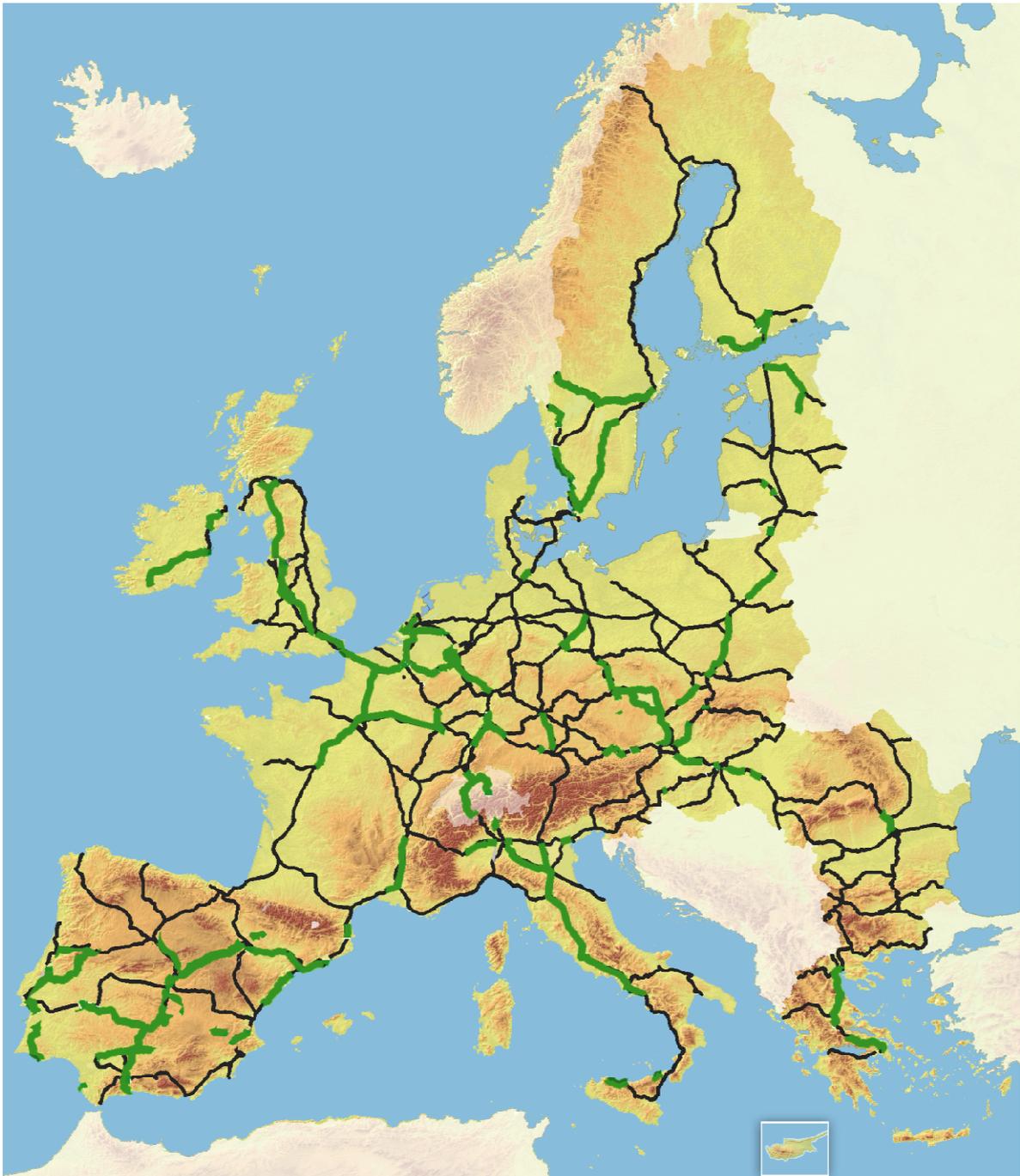


Abbildung 3 – Bereits realisierte Prioritätenprojekte im Zielnetz 2030 [11]

Die Abbildung 3 zeigt das Core Network der Europäischen Union. Die grün markierten Abschnitte sind jene früheren Prioritätenprojekte, die bis 2011 bereits realisiert worden sind, wobei die schwarz markierten Strecken das gesamte Netz zeigen. Betrachtet man die Umsetzung der priorisierten Projekte aus dem Jahr 2005 genauer, geht die Tendenz der Mitgliedstaaten dahin, Projekte von nationalem Interesse schneller zu realisieren als Projekte, die den grenzüberschreitenden Verkehr vorantreiben.

Für Österreich bedeuten die TEN-Achsen, dass drei der zehn Korridore auch innerhalb Österreichs Grenzen verlaufen. Konkret sind das die Korridore:

- I Korridor Nr. 1 – Baltisch-Adriatische Achse (Südbahn)
- I Korridor Nr. 5 – Brennerachse
- I Korridor Nr. 10 – Donau-Korridor (Westbahn)

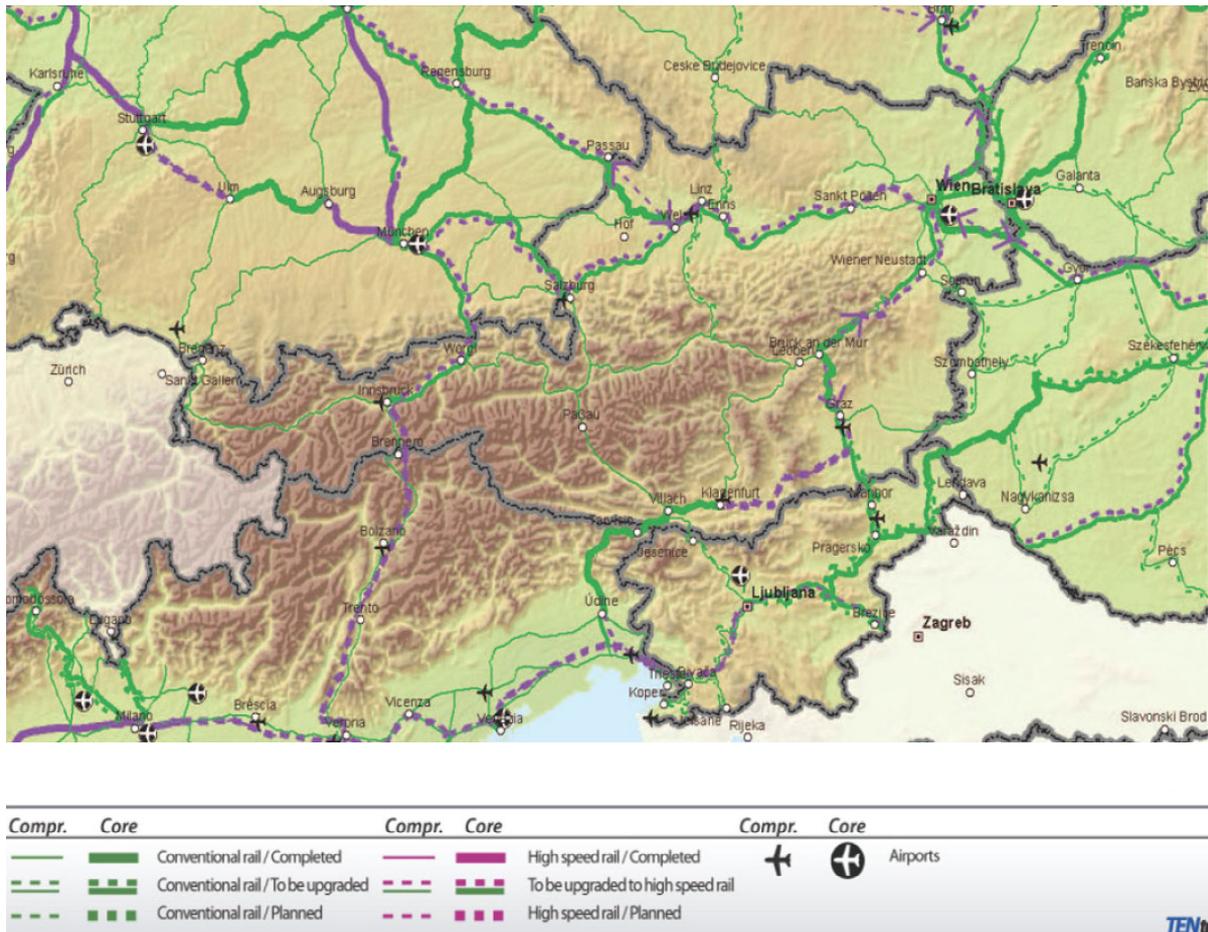


Abbildung 4 – TEN-T Achsen durch Österreich [10]

3 Relevanz und Nutzen von Hochgeschwindigkeitsverkehr

Auf Österreichs Streckennetz wird Mischverkehr betrieben. Das bedeutet, dass Güterzüge und Personenzüge auf demselben Streckennetz verkehren. Durch reine Hochgeschwindigkeitsstrecken, welche eine Trennung von langsamen und schnellen Zügen mit sich bringen würde, könnte die Kapazität auf Eisenbahnstrecken enorm gesteigert werden. Es ist demnach für weitere Überlegungen zu klären, warum in Österreich Hochleistungsstrecken und keine reinen Hochgeschwindigkeitsstrecken betrieben werden. Unter Hochleistungsstrecken versteht man Mischverkehrsstrecken, auf welchen Schnellzugverkehr gleichermaßen verkehrt wie Güter- und Regionalzüge, die wesentlich geringere Geschwindigkeiten aufweisen.

Es stellt sich demnach die Frage, welches Potenzial (Verkehrsnachfrage) grundsätzlich vorliegt, Geschwindigkeiten auf dem Bestandsnetz zwischen überregionalen Zentren in Österreich zu erhöhen oder reine Hochgeschwindigkeitsstrecken zu realisieren, und welcher Nutzen sich in Form von Reisezeiteinsparungen ergibt.

Die Einschätzung erfolgt unter der Betrachtung von relevanten Faktoren, wie

- I der Verkehrsnachfrage
 - Distanzen zwischen Zentren
 - Einwohnerzahl der Zentren
 - Netzwirkung
- I den Reisezeiterparnissen und
- I dem Taktfahrplan

3.1 Verkehrsnachfrage

Vier Faktoren sind für das Potenzial von Hochgeschwindigkeitsstrecken zwischen überregionalen Zentren maßgebend. Diese sind Geographie, Demographie, Kosten und Qualität. Da für eine rein theoretische, grundlegende Aussage über das Potenzial die beiden Faktoren Kosten und Qualität vorerst vernachlässigbar sind, wird das Potenzial aufgrund von demographischen und geographischen Daten, dargestellt [14].

Die maßgebenden demographischen Kenngrößen für Verkehrsnachfrage stellen im Allgemeinen die Motorisierung und die Bevölkerungsstruktur dar, wobei für die Betrachtung der Eisenbahn die Bevölkerungszahlen der Zentren die einflussreichsten sind. [13]

Die Auswertungen zum Potenzial für reine Hochgeschwindigkeitsstrecken sind auf Basis des Lill'schen Reisegesetzes erstellt worden. Mit dieser Methode ist es möglich das ungefähre Potenzial für das Reiseaufkommen zwischen zwei Ballungsräumen zu ermitteln.

$$V = \sum A \cdot \frac{P_A \cdot P_B}{E^{1,7}} \quad (\text{aus [15] S. 52})$$

- V ... Verkehrspotenzial
- P_A ... Einwohnerzahl des Ballungsraumes A
- P_B ... Einwohnerzahl des Ballungsraumes B
- E ... Entfernung zwischen den Ballungsräumen [km]
- A ... Entfernungsbewertungsfunktion

Mittels der Entfernungsbewertungsfunktion wird das Potenzial für im Eisenbahnfernverkehr nicht relevante Distanzen in Abhängigkeit der Geschwindigkeit gemindert. Hierbei wird davon ausgegangen, dass das höchste Potenzial des Eisenbahnfernverkehrs bei einer Reisezeit (Punkt zu Punkt) zwischen 1,5 Stunden ($V=200 \text{ km/h} \rightarrow 300 \text{ km}$) und 2,5 Stunden ($V=200 \text{ km/h} \rightarrow 500 \text{ km}$) liegt. Es wird zudem davon ausgegangen, dass Personenfernverkehr mit Hochgeschwindigkeit unter 50 Kilometern kein Potenzial hat und das Potenzial für Eisenbahnfernverkehr mit Reisezeiten über 7,5 Stunden ($V=200 \text{ km/h} \rightarrow 1500 \text{ km}$) gleich Null ist. [16]

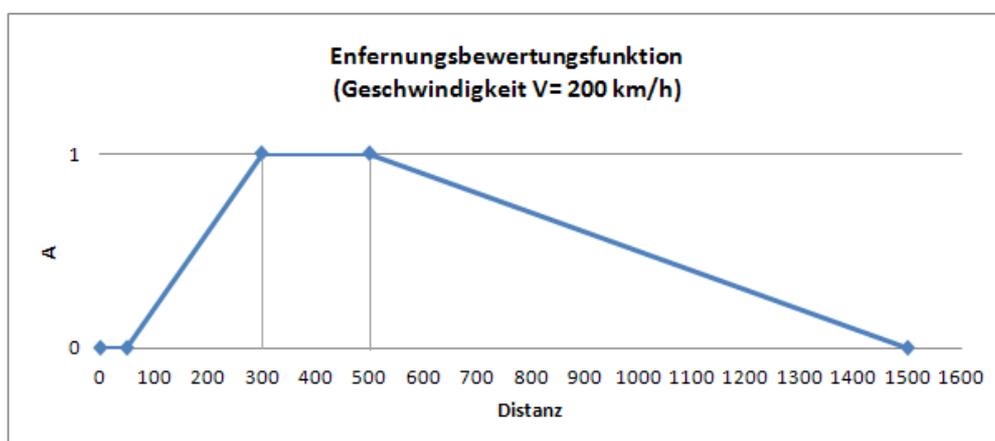


Abbildung 5 – Entfernungsbewertungsfunktion (aus [15] S.52)

Aus der Distanz, der Einwohnerzahlen und der Entfernungsbewertungsfunktion ergibt sich das Potenzial für die mittels Entfernungsbewertungsfunktion definierte Geschwindigkeit zwischen Zentren. Die in Abbildung 6 angeführten Potenziale der Mitgliedsstaaten sind die Summe aller ermittelten Einzelpotenziale innerhalb der Staatsgrenzen, normiert auf Basis der Ausgangswerte (Österreich=1). Eine Vergleichsbasis aufgrund der unterschiedlich großen Flächen der Staaten bieten die Einwohnerzahlen die ebenfalls normiert sind.

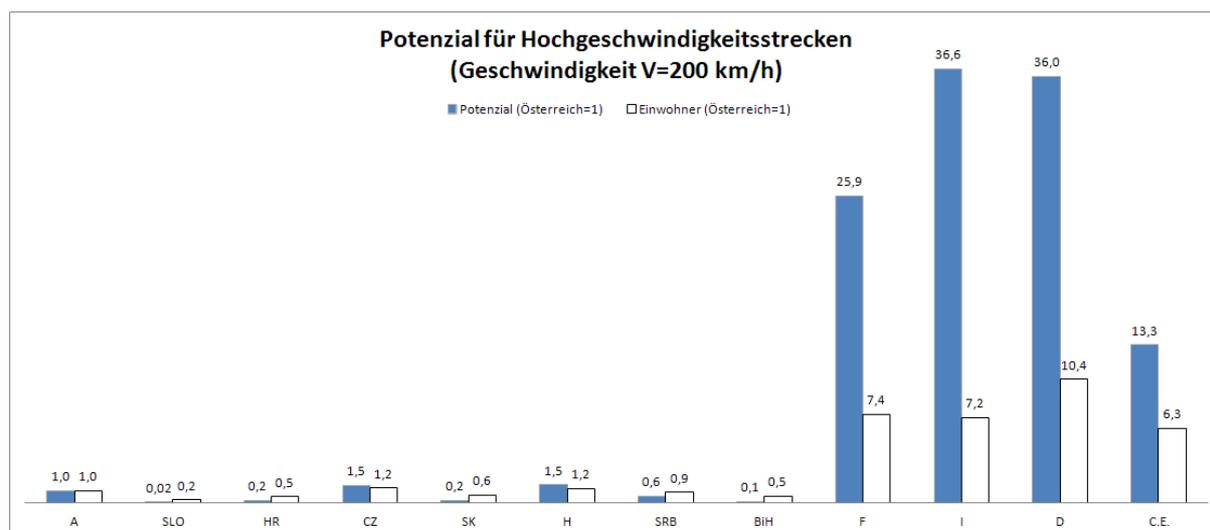


Abbildung 6 – Potenzial für Hochgeschwindigkeitsstrecken (aus [16] S.5)

Aus dieser Potenzialabschätzung ist ersichtlich, dass Österreich und auch das restliche Zentraleuropa im Vergleich zu Frankreich, Italien und Deutschland sehr wenig Potenzial für Hochgeschwindigkeitsverkehr besitzt. Es ergibt sich, dass in Österreich nicht ausreichend große Ballungszentren vorhanden sind und diese für Hochgeschwindigkeitsverkehr nicht in Entfernungen zueinander liegen, die auf eine hohe Nachfrage von Seiten der Bevölkerung schließen lassen [13].

Es ist demnach sicherlich der sinnvollste Weg, bei gewünschten kürzeren Reisezeiten die Geschwindigkeiten der Personenzüge auf Bestandsstrecken anzuheben und betriebliche Maßnahmen zur Reisezeitverkürzung zu setzen und nicht auf reinen Hochgeschwindigkeitsverkehr umzurüsten. In Österreich führt ein „Erfolg“ der Eisenbahn demnach über die verbesserte Netzwerke, infrastrukturseitig im Sinne von Vernetzung und Umsteigmöglichkeiten und betrieblich in Form eines Taktfahrplanes.

Netzwerk

Die Netzwerk ist in diesem Fall die Bedienung von Bahnhöfen/Haltestellen im Verhältnis zur Streckenlänge einer Eisenbahnverbindung, bei Miteinbeziehung der Anschlussmöglichkeiten an weitere Verkehrsverbindungen. Der Vernetzung einzelner Netzelemente kommt aufgrund von Bevölkerungsverhältnissen unterschiedlich große Bedeutung zu, was in weiterer Folge das Verkehrsangebot (Infrastruktur und Fahrplan) der Bahn bestimmt. Die wesentlichsten Einflussfaktoren für eine Fahrplangestaltung sind der Grad der Vernetzung und die Höchstgeschwindigkeit, welche wiederum im direkten Verhältnis stehen [13].

Es kann die Kernaussage getroffen werden, dass, je höher die Netzwerk sein soll, desto geringer muss die Geschwindigkeit gewählt werden. Es muss demnach im Nahverkehr mit niedrigen Geschwindigkeiten gerechnet werden, wogegen Personenfernverkehrszüge zwischen überregionalen Zentren wenige Bahnhöfe bedienen, größere Entfernungen ohne Halt zurücklegen und demnach höhere Geschwindigkeiten aufweisen können. Auf Mischverkehrsstrecken lässt sich langsamer Nahverkehr, schnellerer Personenverkehr und Güterverkehr auf einer Strecke bewerkstelligen, wogegen auf reinen Hochgeschwindigkeitsstrecken ausschließlich Personenfernverkehr abgewickelt wird, wodurch eine geringe Netzwerk erzielt wird.

3.2 Reisezeiten

Analysiert man einen möglichen Anstieg der Fahrgastzahlen rein unter der Betrachtung der Reisezeiteinsparungen, ist zu hinterfragen, ob durch Hochgeschwindigkeitsverkehr die Reisezeit dermaßen verkürzt werden kann, dass zusätzliche Fahrgäste lukriert werden können. Um auf das Thema „Reisezeiterparnisse“ ganzheitlich einzugehen, wird zuvor auf Geschwindigkeitserhöhungen im Güterverkehr eingegangen.

3.2.1 Güterverkehr

Im Güterverkehr spielt die Fahrzeit nur eine untergeordnete Rolle, da sich die Gesamtreisedauer aus mehreren Zeiten zusammensetzt. Wesentliche Komponenten sind hierbei Manipulation, Organisation, Wartezeit, Fahrzeit, Zu- und Abtransportzeiten. Die Fahrzeit an sich nimmt bei Tagesgüterverkehren somit nur einen Teil der Gesamtreisedauer ein. Es ist daher nicht möglich, die Geschwindigkeit derart stark zu erhöhen, dass die Gesamttransportdauer wesentlich verkürzt wird [13]. Eine Erhöhung der Geschwindigkeiten im Güterverkehr ist daher nur aufgrund von Kapazitätsgründen zu rechtfertigen, wenngleich dies aus technischen Gründen und Kostengründen nur schwer

umzusetzen ist und demnach in absehbarer Zeit auch nicht vorgesehen ist. Der sinnvollste Ansatz, Güterverkehr effizient abzuwickeln, ist es Geschwindigkeiten von Güter- und Personenzügen kompatibel zu gestalten, was sich jedoch bei schnellen Fernverkehrszügen und langsamen Güterzügen als problematisch erweist. Dieser Ansatz bietet eine der Grundüberlegungen dieser Arbeit und wird im Kapitel 5.3.1 genauer erläutert.

3.2.2 Personenverkehr

Ein durchwegs differenzierteres Bild ergibt sich jedoch bei Geschwindigkeitserhöhungen im Personenfernverkehr, da die Reisezeit bei Fahrgästen ein maßgeblicher Entscheidungsgrund bei der Verkehrsmittelwahl ist. Die folgenden Berechnungen der Fahrzeiten über variierende Distanzen und Geschwindigkeiten werden auf Basis des Fahrdiagramms erstellt.

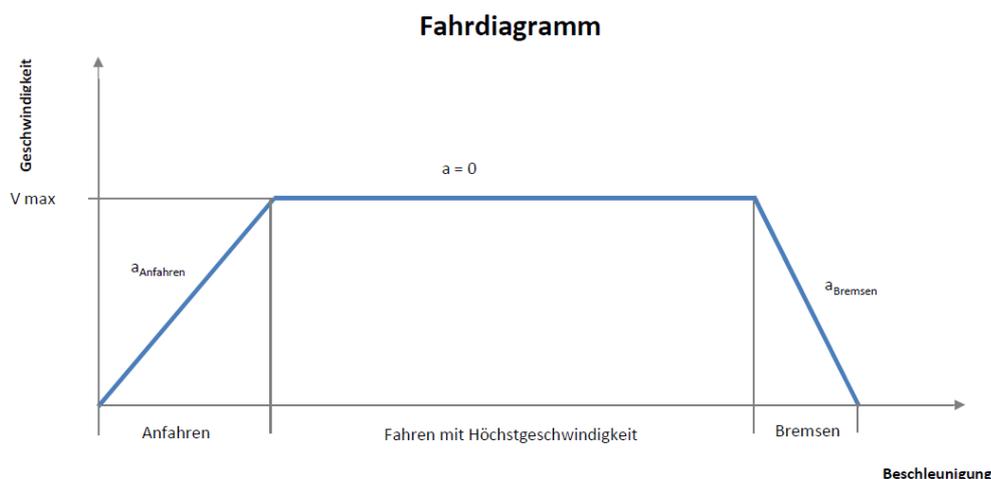


Abbildung 7 – Fahrdiagramm [17]

Das Fahrdiagramm zeigt, dass von einer idealisierten Berechnung ausgegangen wird, da der Auslaufvorgang in der Berechnung nicht berücksichtigt wird. Beim Auslaufvorgang handelt es sich um jene Zeitspanne vor dem Bremsvorgang, in welcher der Triebfahrzeugführer ohne Bremsung oder Beschleunigung den Zug „ausrollen“ lässt und der Zug nur durch die Fahrwiderstände gebremst wird. Zudem basieren die Berechnungen auf dem Fall, dass über die gesamte Strecke die maximale Geschwindigkeit gefahren werden kann und auch gefahren wird. Somit suggerieren die Ergebnisse einen größeren Gewinn an Reisezeit, als in Wirklichkeit realisiert wird.

Die Reisezeiten werden über folgende Formeln ermittelt:

Anfahrsgeschwindigkeit:

$$v = a \cdot t$$

Anfahrtszeit/Bremszeit:

$$t = \frac{2s}{v}$$

Anfahrstrecke/Bremsstrecke:

$$s = \frac{v^2}{2a}$$

- v ... Geschwindigkeit [m/s]
- a ... Beschleunigung [m/s²]
- t ... Zeit [s]
- s ... Strecke [m]

Ausgegangen wird bei den Berechnungen von Beschleunigungs- beziehungsweise Bremswerten des ÖBB railjets:

Tabelle 1 – Beschleunigungs- und Bremswerte des ÖBB-railjets (aus [18] S. 11)

Beschleunigungswerte/Bremswerte	
Anfahrbeschleunigung	$A_{\text{Anfahren}} = 0,5 \text{ m/s}^2$
Bremswert	$A_{\text{Bremsen}} = -0,6 \text{ m/s}^2$

Die Reisezeiteinsparungen werden für die Distanzen von 50 km, 100 km, 150 km, 200 km, sowie für 250 km durchgeführt, um aussagekräftige Vergleichswerte zu erlangen. Alle Werte der Tabellen sind auf ganze Minuten gerundet.

Tabelle 2 – Reisezeit bei einer Höchstgeschwindigkeit von 160 km/h

Geschwindigkeit	Reisezeit				
	50 km	100 km	150 km	200 km	250 km
160 km/h	20 min	39 min	58 min	76 min	95 min

Tabelle 3 – Reisezeitersparnis bei Anhebung der Höchstgeschwindigkeit

Zeitersparnis in Minuten bei einer Ausgangsgeschwindigkeit von 160 km/h					
Geschwindigkeit	Streckenlänge				
	50 km	100 km	150 km	200 km	250 km
170 km/h	1	2	3	4	5
180 km/h	2	4	6	8	10
190 km/h	3	6	9	12	15
200 km/h	3	7	11	15	18
210 km/h	4	9	13	17	22
220 km/h	5	10	15	20	25
230 km/h	5	11	17	22	28
240 km/h	6	12	18	24	31
250 km/h	6	13	19	26	33

Werte in [min]

Bei den in Abbildung 8 angeführten Reisezeiten handelt es sich um die Fahrzeit zwischen zwei Bahnhöfen mit einer Streckenlänge von 94 Kilometern unter Berücksichtigung des Beschleunigungs- und Bremsvorganges. Die 94 Kilometer Streckenlänge entsprechen dem durchschnittlichen Haltestellenabstand eines ÖBB railjets.

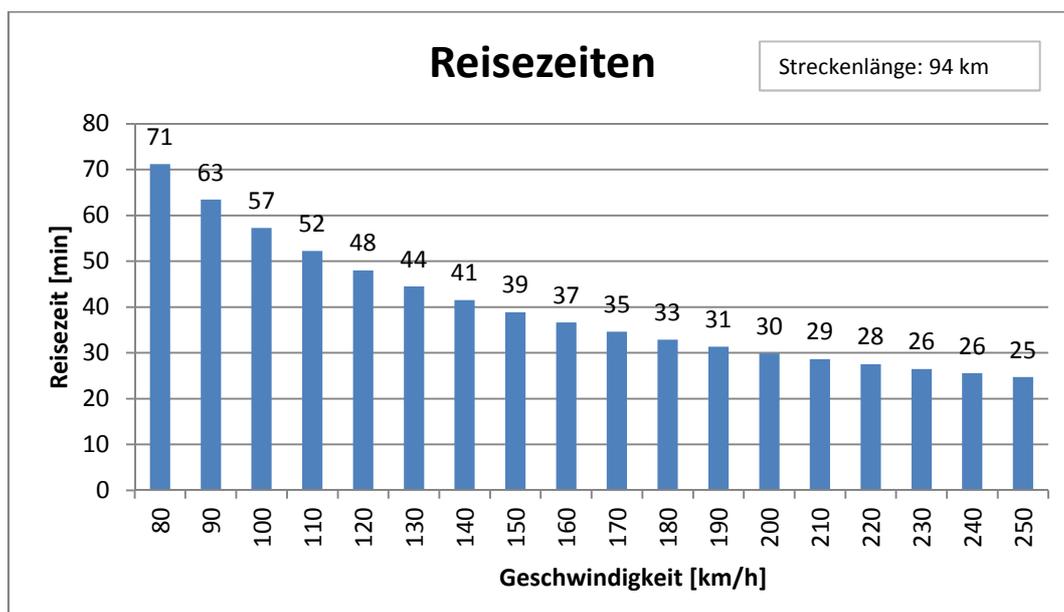


Abbildung 8 – Reisezeiten unter variierenden Höchstgeschwindigkeiten

Aus der Tabelle 3 und der Abbildung 8 kann grundsätzlich die Aussage getroffen werden, dass Reisezeiteinsparungen bei Geschwindigkeitserhöhungen ausgehend von 160 km/h weitgehend gering ausfallen. Über steigende Fahrgastzahlen durch Reisezeitersparnisse sind Hochgeschwindigkeitsstrecken daher nur schwer rechtfertigbar. Die Auswirkungen

von Reisezeitersparnissen können jedoch weitreichender sein, als es auf den ersten Blick scheint. Durch das Erreichen von optimalen Kantenfahrzeiten innerhalb eines Taktfahrplans kann die Gesamtreisezeit von umsteigenden Personen beträchtlich gesenkt und somit die Attraktivität einer Strecke enorm gesteigert werden. Es ist davon auszugehen, dass durch Steigerung der Attraktivität einer Strecke die Nachfrage erhöht wird und es in weiter Folge zur erwünschten Stärkung der Marktposition der Schiene kommt.

3.3 Taktfahrplan

Der Taktfahrplan ist ein Fahrplan, der auf Basis von Taktknoten und Fahrplansymmetrien das Umsteigen in einem Knoten von allen Richtungen in alle Richtungen in einem Zeitfenster von wenigen Minuten möglich macht. Hierfür müssen jedoch die Züge auch innerhalb dieser geringen Zeitspanne in den Bahnhöfen ankommen und wieder abfahren. Dies erfordert hohe Kapazitäten der Knotenpunkte. Es ist vorgesehen, die Intervalle zwischen Knotenpunkten im Stundentakt zu bedienen, oder einen Teiler beziehungsweise ein Vielfaches einer Stunde zu wählen [19].

Eine Anhebung von Geschwindigkeiten zwischen Knotenpunkten kann demnach nur unter Berücksichtigung der Fahrzeit zwischen den Knotenpunkten erfolgen. Diese muss dem für diese Strecke vorgesehenen Intervall entsprechen. Ist dies nicht möglich, ist eine Erhöhung der Geschwindigkeit nicht sinnvoll, da es bei Nichteinhalten der vorgesehenen Intervalle zu Wartezeiten am Taktknoten kommt, da der Zug den Knoten nicht verfrüht verlassen kann und die Gesamtreisedauer somit nicht verkürzt wird. Die in Abbildung 9 in Klammern dargestellten Fahrzeiten sind jene, erwähnten Fahrzeiten die zwar erreicht werden können, aber angesichts der Einhaltung vorgegebener Kantenfahrzeiten nicht gefahren werden.

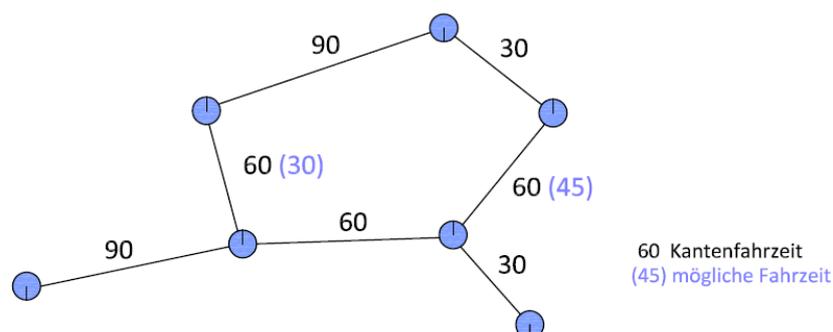


Abbildung 9 – schematische Darstellung der Kantenfahrzeit

Auch wenn durch eine Anhebung der Geschwindigkeit eine kleinere Kantenfahrzeit erreicht wird, kann diese aufgrund der Vernetzung nicht einfach gefahren werden, da das nur unter Abstimmung mit den Fahrzeiten im restlichen Netz erfolgen kann [19]. Es ist demnach sinnvoll, die Geschwindigkeiten an jenen Streckenabschnitten zu erhöhen, die der Erreichung von gewünschten Kantenfahrzeiten dienen.

Durch unterschiedlich schnelle Zugsysteme (railjet, IC, REX), wie sie auf Österreichs Streckennetz verkehren, sind auch innerhalb einer Strecke die unterschiedlichen Zugsysteme einem funktionierenden Takt unterzuordnen [19].

Für die Kapazität von Streckenabschnitten bedeutet das, dass beim Verkehren im Taktfahrplan die Abfahrts- und Ankunftszeiten in den Knoten vorgegeben sind und den Taktzeiten entsprechen müssen, was Auswirkungen auf die Kapazität eines Streckenabschnitts hat, da angesichts der Unverschieblichkeit der im Taktfahrplan verkehrenden Trassen Kapazität verloren geht.

Anzumerken ist an dieser Stelle noch, dass die Erhöhung der Zuggeschwindigkeiten nicht die einzige Möglichkeit ist, Fahrzeiten zu verkürzen, um gewünschte Kantenfahrzeiten zu erreichen. Dies ist zudem über folgende Maßnahmen möglich:

- ┆ Haltestellen zwischen Knotenpunkten nicht zu bedienen
- ┆ fahrzeugseitige Optimierung
- ┆ Infrastrukturausbau
- ┆ Verkürzung von Haltedauern
- ┆ Infrastrukturoptimierung in Bahnhofsbereichen
- ┆ fahrdynamische Optimierung

Es ist demnach eine genaue Betrachtung realer Streckenabschnitte notwendig, um eine Aussage treffen zu können, ob Geschwindigkeitserhöhungen unter Betrachtung der Reisezeiteinsparungen sinnbringend sind oder nicht. Fest steht jedoch, dass damit betriebliche Probleme verbunden sind.

3.4 Zusammenfassung der Erkenntnisse

Verkehrsnachfrage

Österreich verfügt im europaweiten Vergleich über geringes Potenzial für reine Hochgeschwindigkeitsstrecken. Bei gewünschten Hochgeschwindigkeiten sind Mischverkehrsstrecken mit Hochgeschwindigkeitszügen unumgänglich.

Netzwerkung:

Hochgeschwindigkeit ist nur zwischen überregionalen Zentren mit großen Streckenlängen ohne Halt von Relevanz.

Reisezeitersparnisse

Güterverkehr:

Eine Erhöhung der Geschwindigkeiten von Güterverkehrszügen ist nur aufgrund von Kapazitätsgründen zu rechtfertigen.

Personenverkehr:

Reisezeitersparnisse aufgrund von Geschwindigkeitserhöhungen fallen bei einer Ausgangsgeschwindigkeit von 160 km/h gering aus. Über steigende Fahrgastzahlen durch Reisezeitersparnisse ohne die Berücksichtigung eines Taktfahrplanes sind Hochgeschwindigkeitsstrecken beziehungsweise Ausbaumaßnahmen, um höhere Geschwindigkeiten zu erreichen daher, nur schwer rechtfertigbar.

Taktfahrplan

Durch die Einhaltung des integrierten Taktfahrplans kann die Gesamtreisezeit von umsteigenden Personen beträchtlich gesenkt werden und somit die Attraktivität einer Strecke enorm gesteigert werden.

Anzumerken ist, dass bei der Wahl des Verkehrsmittels weitaus mehr Faktoren eine Rolle spielen und die Attraktivität nicht ausschließlich durch Faktoren ausgehend von Geschwindigkeitserhöhungen gesteigert werden kann. Weitere maßgebende Kriterien sind sicherlich der Takt und die Pünktlichkeit (Betriebsqualität), wie in späteren Kapiteln noch erläutert wird. Vorweggenommen sei, dass die Betriebsqualität sehr stark mit der Auslastung des Streckenabschnitts zusammenhängt. Durch Geschwindigkeitserhöhungen wird die Spreizung der Geschwindigkeiten größer, wodurch Kapazität verloren geht. Es darf die Reisezeitersparnis nicht auf Kosten der Betriebsqualität „erkauft“ werden, da dies den gegenteiligen Effekt erzielen würde.

4 Systemtechnik zur betrieblichen Abwicklung des Schienenverkehrs

Dieses Kapitel gibt einen Auszug über die Zusammenhänge und Prozessabläufe in der betrieblichen Abwicklung des Schienenverkehrs auf Basis von Erklärungen und Definitionen. Es sollte somit als betriebliche Verständnisgrundlage für spätere Auswertungen im Zuge der Kapazitätsanalyse gesehen werden und nicht als Nachschlagewerk für die gesamte Systemtechnik im Schienenverkehr dienen.

4.1 Definitionen von Fahrweegelementen

Hauptgleise und Nebengleise

Das Hauptgleis stellt jenes Gleis dar, das für ein planmäßiges Befahren von Zügen vorgesehen ist. Dieses muss entsprechend mit Signalanlagen ausgestattet sein, um ein sicheres Befahren garantieren zu können [20].

Alle Gleise, die nicht für ein planmäßiges Befahren von Zügen vorgesehen sind, nennt man Nebengleise. Nebengleise werden beispielsweise für Rangierfahrten genutzt.

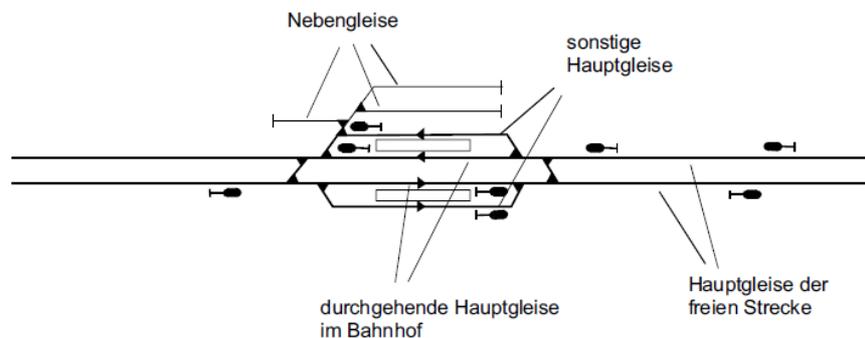


Abbildung 10 – Einteilung der Gleise (aus [22] S. 563)

Bahnhöfe

„Bahnhöfe sind Betriebsstellen, in denen Züge beginnen, enden, oder einander ausweichen können. Sie werden von Einfahrsignalen oder Trapeztafeln begrenzt.“ (aus [21] S. 102)

Freie Strecke

Als freie Strecke werden jene Hauptgleise bezeichnet, die zwischen Bahnhöfen liegen.

Blockabschnitte

Blockabschnitte (auch Blockstrecken genannt) sind Gleisabschnitte, die mittels Signaleinrichtungen begrenzt sind und ein gesichertes Hintereinanderfahren von Zügen ermöglichen. [20]

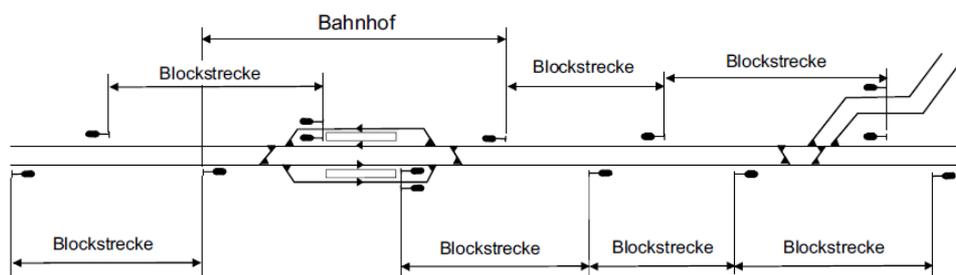


Abbildung 11 – Blockabschnitte (Blockstrecken) der freien Strecke (aus [20] S.7)

Blockstellen

Eine Blockstelle ist jene Stelle, die einen Blockabschnitt begrenzt. Blockstellen sind demnach mit Hauptsignalen ausgestattet. [21]

Überleitstellen

Blockstellen, die Zügen einen Gleiswechsel auf ein weiteres Gleis der Strecke ermöglichen werden Überleitstellen genannt. Sie sind somit Gleisverbindungen und befinden sich auf der freien Strecke des Hauptgleises.

Überleitstelle

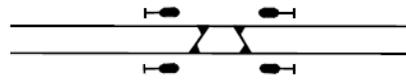


Abbildung 12 – Überleitstelle (aus [20] S. 8)

Haltestellen

Haltestellen sind Bahnanlagen, wo Züge fahrplanmäßig halten dürfen.

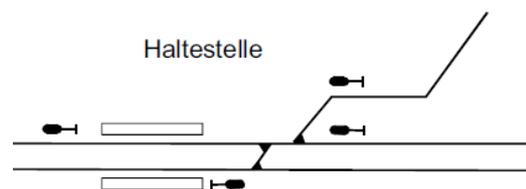


Abbildung 13 – Haltestelle (aus [20] S. 9)

4.2 Abstandhaltetechniken im Schienenverkehr [20]

- I Fahren im Sichtabstand
- I Fahren im Zeitabstand
- I Fahren im festen Raumabstand
- I Fahren im absoluten Bremswegabstand
- I Fahren im relativen Bremswegabstand

Fahren im Sichtabstand

Beim „Fahren im Sichtabstand“ folgen Züge einander mit Geschwindigkeiten, die ein Halten vor einem Hindernis (Züge) möglich machen. Die eingesehene Strecke, inklusive eines Sicherheitsabstandes, muss größer sein als der Bremsweg des Zuges. Bei der Eisenbahn findet das Fahren auf Sicht nur mehr in Störfällen und bei Rangierfahrten

Anwendung. Geschwindigkeiten über 40 km/h sind aus Sicherheitsgründen demnach nicht möglich.

Diese Abstandhaltetechnik ist für die im Zuge dieser Studie erstellten Auswertungen nicht von Relevanz.

Fahren im Zeitabstand

Das Fahren im Zeitabstand findet heute keine Anwendung mehr und wird an dieser Stelle nur mehr vollständigshalber erwähnt. Es folgen Züge einander zu einem vorgegebenen Zeitpunkt.

Fahren im festen Raumabstand

Das Fahren im festen Raumabstand ist jene Abstandhaltetechnik, die in der Regel zur Zugsicherung auf Eisenbahnstrecken angewendet wird. Hierbei wird die Strecke in Blockabschnitte unterteilt und mit einer ortsfesten Signalisierung geregelt. Die Blockabschnitte sind somit durch Hauptsignale begrenzt, welche Aufschluss über das Einfahren in einen Blockabschnitt geben. Diese signalisieren somit, ob und mit welcher Geschwindigkeit in einen Block eingefahren werden darf, da ein Blockabschnitt jeweils nur von einem Zug belegt sein kann. Ist ein Block durch einen Zug besetzt, bekommt ein zweiter, herannahender Zug keine Freigabe für das Einfahren in den darauffolgenden Block. Erst durch das vollständige Passieren des vorausfahrenden Zuges der Signalzugschlussstelle erhält der darauffolgende Zug eine Freigabe. Es ergibt sich somit für einen Blockabschnitt eine Überwachungslänge, die sich aus Blocklänge und Durchrutschweg zusammensetzt. Der Durchrutschweg kann als Schutzstrecke bezeichnet werden, die zusätzliche Sicherheit beim Überfahren haltzeigender Signale durch einen Zug bietet. Der Durchrutschweg ist in Österreich jedoch unüblich und findet in den Berechnungen dieser Studie keine Betrachtung.

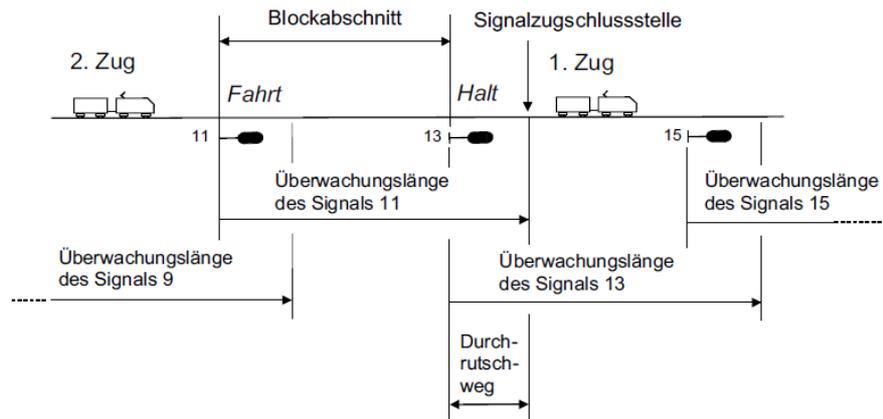


Abbildung 14 – Fahren im festen Raumabstand (aus [22] S.568)

„Die Mindestlänge eines Blockabschnitts ist bei ortsfester Signalisierung, sofern keine besonderen Signalisierungsverfahren angewendet werden, gleich dem maximalen Bremsweg“ (aus [20] S. 42). Dieser ist entsprechend abhängig vom Bremsverhalten des Zuges und der gefahrenen Geschwindigkeit im Blockabschnitt.

Um ein rechtzeitiges Anhalten vor den Signalen gewährleisten zu können, benötigt man im Eisenbahnwesen, aufgrund der langen Bremswege (Stahl-Stahl-Kontakt), eine Vorsignalisierung, welche dem nachfolgenden Zug eine Geschwindigkeitsreduktion signalisiert, sobald der Blockabschnitt durch den vorfahrenden Zug belegt ist.

Bei ortsfester Signalisierung gibt es unterschiedliche Prinzipien, die Vorsignalisierung zu regeln. Man unterscheidet zwischen Einabschnittssignalisierung und Mehrabschnittssignalisierung. Die Einabschnittssignalisierung besteht aus Haupt- und Vorsignalen, wobei sich das Vorsignal zwischen zwei Hauptsignalen befindet. Somit kann ein Vorsignal nur Aufschluss über den nächsten Block geben. Bei der Mehrabschnittssignalisierung ist das Vorsignal im Hauptsignal integriert und gibt Informationen über mindestens zwei Abschnitte.

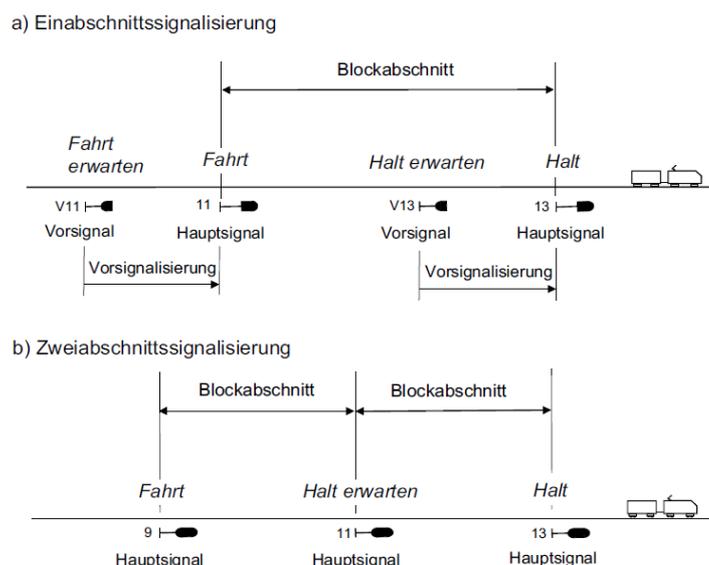


Abbildung 15 – Prinzipien der Vorsignalisierung (aus [20] S. 48)

Fahren im wandernden Block („moving block“)

Beim Fahren im wandernden Block erfolgt eine kontinuierliche Zugortung, wobei keine ortsfeste Gleisfreimeldeanlage mehr von Nöten ist. Der Standort des vorfahrenden Zuges wird kontinuierlich an den nachfolgenden Zug übermittelt, wobei sich daraus die kürzest mögliche Folgezeit unter Berücksichtigung des Bremswegabstandes zweier Züge ermitteln lässt.

I Fahren im absoluten Bremswegabstand

Der Abstand zwischen dem vorfahrenden Zug und dem nachfolgenden Zug entspricht genau dem Bremsweg des nachfolgenden Zuges. Dies ist unter realer Betrachtung nur bei Systemen mit Linienzugbeeinflussung möglich.

I Fahren im relativen Bremswegabstand

Beim Fahren in relativen Bremswegabstand entspricht der Abstand zwischen Zügen der Differenz der jeweiligen Bremswege inklusive eines zusätzlichen Sicherheitsabstandes. Das Fahren im relativen Bremswegabstand ist ebenfalls nur unter der Führerstandssignalisierung umsetzbar. Das Fahren im wandernden Block und speziell das Fahren im relativen Bremswegabstand ermöglicht höchste Kapazitäten auf den Strecken [20].

4.3 Zugbeeinflussung in Europa [28]

Um den grenzüberschreitenden Verkehr möglich zu machen, sind ein einheitliches Betriebsleitsystem, ERTMS (European Rail Traffic Management System) und ein einheitliches Zugleitsystem ETCS (European Train Control System) entwickelt worden. Das Betriebsleitsystem dient zur Schaffung von Interoperabilität und umfasst auch dynamische Fahrgastinformationen und staatenübergreifende Dispositionen. Das Zugleitsystem standardisiert die Übermittlung von Informationen zwischen Fahrweg und Fahrzeug. Es unterliegt folgenden drei Funktionsstufen (Ausbaustufen), sogenannten Levels.

I Level 1

Bei der ersten Ausbaustufe erfolgt eine punktförmige Zugsicherung, wobei ein ortsfestes Signalsystem die Basis bietet und die Züge im festen Raumabstand verkehren.

I Level 2

Bei der Ausbaustufe 2 erfolgt, wie bei Level 1, eine ortsfeste Gleisfreimeldung, mit dem Unterschied die Fahrerlaubnis an den Triebfahrzeugführer kontinuierlich über Funk (Führerstandssignalisierung) erfolgt. Auch bei dieser Ausbaustufe verkehren die Züge ebenfalls im festen Raumabstand.

I Level 3

Die mittelfristig höchste Ausbaustufe ist eine auf Funk basierende Ortung und Sicherung der Zugfolge. Es handelt sich durch kontinuierliche Fahrwegfreigaben nicht mehr um das Fahren im festen Raumabstand, sondern um das Fahren im wandernden Block (absoluter Bremswegabstand). Hierbei können wesentlich höhere Kapazitäten erzielt werden.

Diese Ausbaustufe (Level 3) findet derzeit bei keiner europäischen Strecke oder Teilstrecke Anwendung und wird demnach auch in dieser Masterarbeit nicht weiter berücksichtigt. Die Auswertungen in Kapitel – Variationsanalyse finden daher für die Ausbaustufen eins und zwei (Fahren im festen Raumabstand) statt.

4.4 Zugfolge [23]

Beim Fahren im festen Raumabstand ist die Strecke, wie bereits erläutert, in Blockabschnitte unterteilt, woraus sich bei Belegung eines Blocks eine Sperrzeit für den nachfolgenden Zug ergibt. Die Sperrzeit beginnt mit jenem Zeitpunkt, bei dem der

vorfahrende Zug das Einsehen des Vorsignals möglich macht, bis zu jenem Zeitpunkt an dem der Zug in voller Länge die Signalschlussstelle passiert und die Anlage das Signal für den darauffolgenden Zug wieder freigibt.

Die Sperrzeit setzt sich demnach, wie in Abbildung 16 ersichtlich aus folgenden Zeiten zusammen:

Fahrstraßenbildezeit

Die Fahrstraßenbildezeit ist jene technische Reaktionszeit, die benötigt wird, Signale („Frei“ auf „Halt“), Weichen und Schutzweichen zu stellen, dass ein technisch sicheres Befahren eines Streckenabschnitts gewährleistet ist.

Signalsichtzeit

Unter Signalsichtzeit versteht man jene Zeit, die vom Triebfahrzeugführer benötigt wird, um das Signal zu erkennen und zu deuten. Sie wird auch als Reaktionszeit bezeichnet und beträgt erfahrungsgemäß 0,2 Minuten (aus [20] S. 50).

Annäherungsfahrzeit

Die Annäherungsfahrzeit bildet die Zeit des Durchfahrens des Abstands zwischen Vor- und Hauptsignal.

Fahrzeit im Blockabschnitt

Sie entspricht der reinen Fahrzeit eines Zuges durch deinen Blockabschnitt.

Räumfahrzeit

Die Räumfahrzeit ist jene Zeit, die für das Durchfahren des Durchrutschweges benötigt wird. Gerechnet wird diese vom Erreichen des Hauptsignals mit der Zugfront bis zum Überfahren der Signalschlussstelle mit der letzten Achse.

Fahrstraßenauflösezeit

Die Fahrstraßenauflösezeit ist wieder jene Zeit die das System zum Herstellen des Grundzustandes benötigt.

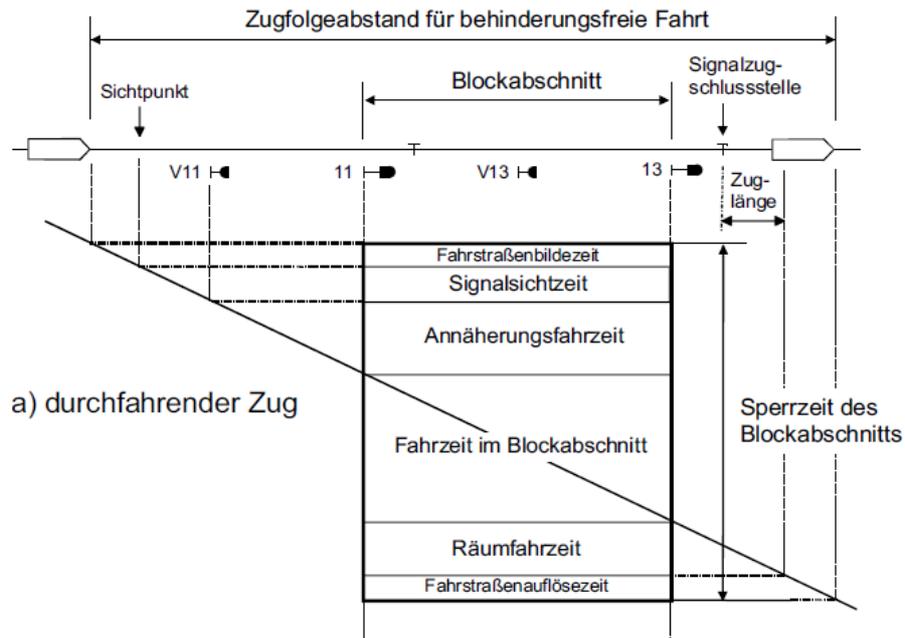


Abbildung 16 – Sperrzeit für durchfahrenden Zug (aus [20] S. 51)

Die Abbildung 17 zeigt jenen Fall, bei dem ein Zug aufgrund einer Blockbelegung vor einem Hauptsignal halten muss. Hierbei entfällt die Annäherungsfahrzeit, wobei sich jedoch die Fahrzeit durch den Block, wegen des wesentlich zeitintensiveren Anfahrvorganges, verlängert.

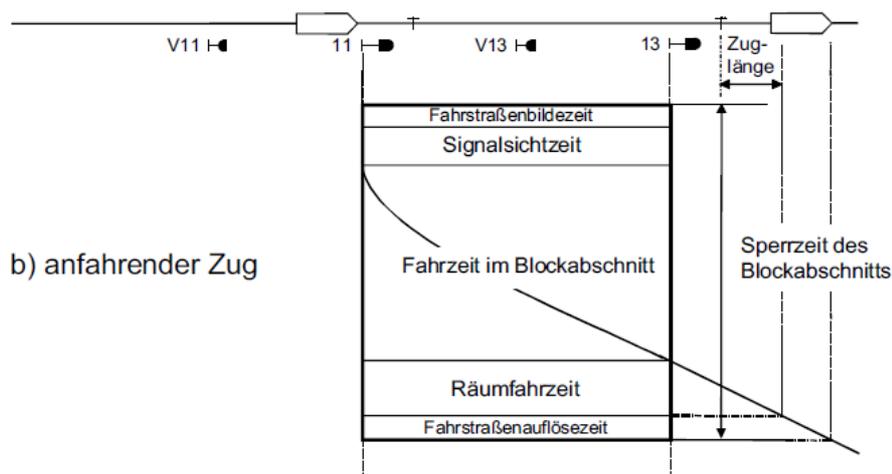


Abbildung 17 – Sperrzeit für anfährenden Zug (aus [20] S. 51)

Die Sperrzeiten der einzelnen Blockabstände, die aufgrund der abweichenden Höchstgeschwindigkeiten und Blocklängen unterschiedlich lang sind, bilden an einer Zeitachse die Sperrzeitentreppe, welche in der Regel in einem Weg-Zeit-Diagramm Darstellung findet.

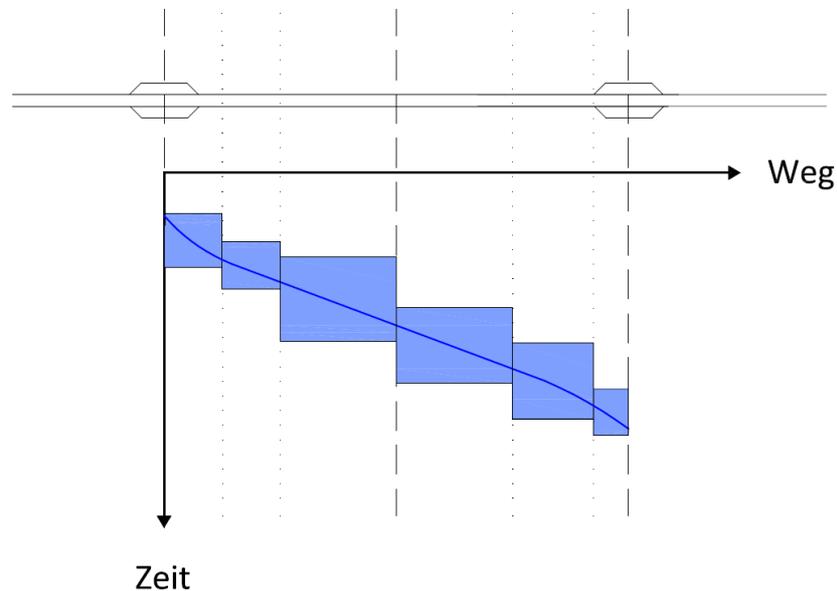


Abbildung 18 – Sperrzeitentreppe

4.5 Fahrplankonstruktion [20]

Die Konstruktion des Fahrplans und somit das Trassenmanagement einer Strecke erfolgt durch einen Bildfahrplan. Dieser ist ein Weg-Zeit-Diagramm, welches die Anzahl der Züge, die Geschwindigkeiten und die Folgezeiten der Personenzüge über einen gewählten Zeitraum wiedergibt und somit sämtliche Zugfahrten an einem Streckenabschnitt darstellt. Bei genauer Darstellung des Fahrverhaltens der Züge ergeben sich aufgrund von Anfahrts- und Bremsvorgängen Polygonzüge zwischen den Haltestellen, die bei vereinfachten Abbildungen jedoch als Geraden gezeichnet werden.

Im Regelfall werden zweigleisige Streckenabschnitte in einem Bildfahrplan dargestellt. Bei mehr als zwei Streckengleisen (Parallelführung) werden separate Bildfahrpläne erstellt, wobei auf eine eindeutige Zuordnung der Züge zu achten ist. Der Bildfahrplan ermöglicht zwar eine übersichtliche Darstellung des betrieblichen Ablaufs, erlaubt jedoch keine Rückschlüsse auf die betriebliche Inanspruchnahme der Strecke. Dies ist nur durch die erweiterte Darstellung inklusive der Sperrzeitentrepfen der verkehrenden Züge möglich. [22]

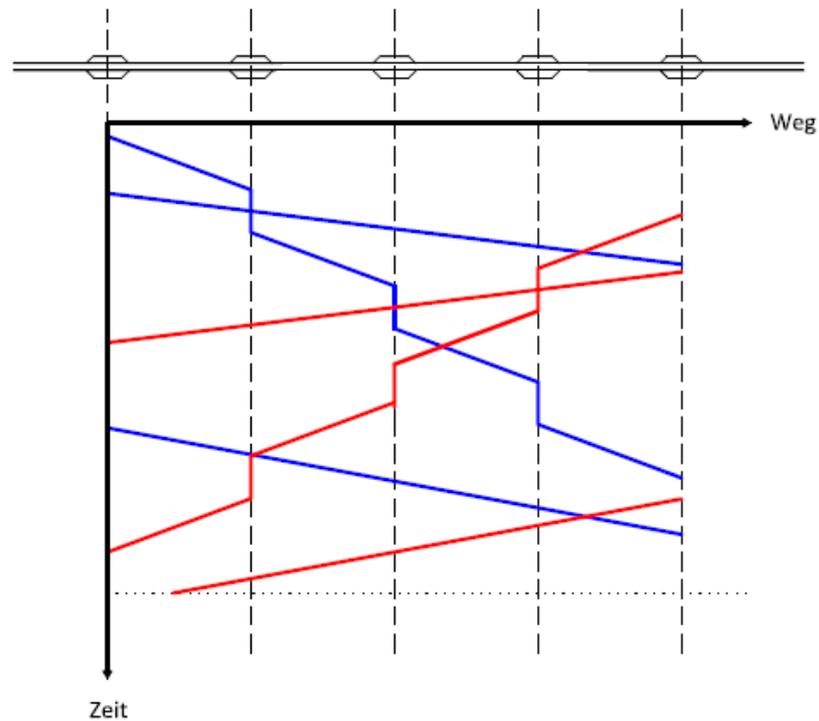


Abbildung 19 – Bildfahrplan

Die Sperrzeitentreppen der einzelnen Züge geben, wie bereits erwähnt, Aufschluss über die Belegzeiten der einzelnen Blockabschnitte und demnach auch über die kürzest mögliche Folgezeit zweier hintereinander verkehrender Züge, welche als Mindestzugfolgezeit bezeichnet wird. Die Mindestzugfolgezeit ist demnach jene Zeitspanne zwischen dem Beginn der Sperrzeitentreppe des vorfahrenden Zuges und dem schnellstmöglichen Beginn der Sperrzeitentreppe des nachfolgenden Zuges.

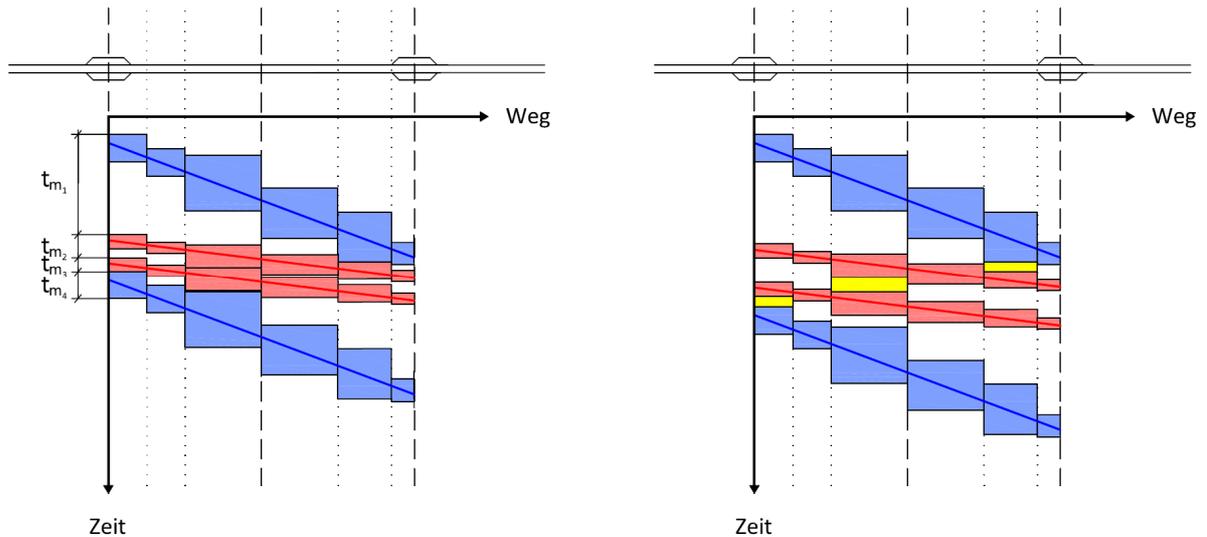


Abbildung 20 – Mindestzugfolgezeit (t_m)

Zusätzlich zur Mindestzugfolgezeit werden Zeitabschnitte, sogenannte Pufferzeiten (in Abbildung gelb markiert) im Fahrplan mitberücksichtigt, um dem Fahrplan entsprechende Stabilität zu geben und Betriebsqualität gewährleisten zu können.

Bei der Konstruktion des Fahrplans ist zusätzlich darauf zu achten, dass genügend Zeit in den Haltestellen zum Ein- bzw. Aussteigen von Fahrgästen (Haltezeiten) und Zeit zum Umsteigen der Reisenden in einen weiteren Zug (Übergangszeiten) berücksichtigt wird. Zudem sind Synchronisationszeiten, welche zur Koordination von Anschlussmöglichkeiten von Fahrgästen in Knoten dienen, zu beachten [20].

5 Grundlagen zur Kapazität

5.1 Unterschiedliche Betrachtungsstandpunkte zur Kapazität

Durch verschiedene Positionen, die von mehreren Interessensgruppen des Systems Eisenbahn eingenommen werden, gibt es verschiedene Betrachtungsstandpunkte zur Kapazität, woraus sich auch unterschiedliche Zielvorstellungen ergeben, wobei bei korrekter Betrachtung alle Berechtigung und Richtigkeit besitzen [24]. Es muss demnach bei Aussagen über Kapazitäten darauf geachtet werden, von welchen Anforderungen an die Kapazität ausgegangen wird. Die verschiedenen Betrachtungsstandpunkte und deren Ansichten sind in Tabelle 4 angeführt.

Tabelle 4 – Unterschiedliche Ansichten zur Kapazität (aus [24] S. 4)

Markt (Kundenbedarf)	Infrastrukturplanung	Planung des Fahrplans	Betrieb
Erwartete Anzahl von Zugtrassen (Spitzenwert)	Erwartete Anzahl von Zugtrassen (Durchschnitt)	Erforderliche Anzahl von Zugtrassen	Tatsächliche Anzahl von Zügen
Erwartete Mischung unterschiedlicher Verkehrsarten und Geschwindigkeiten (Spitzenwert)	Erwartete Mischung unterschiedlicher Verkehrsarten und Geschwindigkeiten (Durchschnitt)	Erforderliche Mischung unterschiedlicher Verkehrsarten und Geschwindigkeiten	Tatsächliche Mischung unterschiedlicher Verkehrsarten und Geschwindigkeiten
Erforderliche Qualität der Infrastruktur	Erwartete Infrastrukturvoraussetzungen	Vorhandene Infrastrukturvoraussetzungen	Vorhandene Infrastrukturvoraussetzungen
Möglichst kurze Fahrzeiten	Zeitreserven für erwartete Störungen	Zeitreserven für erwartete Störungen	Verspätungen durch Betriebsstörungen
	Instandhaltungsstrategien	Zeitreserven für Instandhaltung	Verspätungen durch Gleisarbeiten
		Betrieb im Netz	Abgewartete Anschlüsse
		Betrieb eines Taktfahrplans	Zusätzliche Kapazität durch nicht in Anspruch genommene Zeitreserven

„Während Kapazitätsanforderungen aus der Sicht des Marktes auf eine Erfüllung der Spitzenwerte ausgerichtet sind, muss die Infrastrukturplanung auf eine Definition der Kapazität ausgerichtet werden, die im Durchschnitt eine profitable Nutzung der Infrastruktur garantiert“ (aus [24] S.4). Das bedeutet, dass man aus Sicht des Infrastrukturbetreibers nicht von den maximal möglichen Trassen, ohne Rücksichtnahme auf die Betriebsqualität ausgehen kann, sondern von einer Anzahl von Trassen, die unter vorab definierten betrieblichen Bedingungen unter Berücksichtigung von Qualitätskriterien möglich ist.

Kapazität aus Sicht des Infrastrukturbetreibers

Vertieft versteht der Infrastrukturbetreiber unter der Kapazität: „die Gesamtanzahl von möglichen Zugtrassen in einem definierten zeitlichen Rahmen unter Berücksichtigung der derzeitigen Trassenmischung“ (aus [24] S. 4). Die Kapazität ist somit die Anzahl jener Fahrplantrassen, die nach Möglichkeit an Eisenbahnverkehrsunternehmen für die Nutzung der Infrastruktur verkauft werden können. Sie ist für den Infrastrukturbetreiber maßgebend, da der Ertrag durch einzuhebende Trassenpreise wesentlich davon abhängt. Aus dieser Überlegung heraus ist es für Streckenabschnitte, die hohe Nachfrage aufweisen, am wirtschaftlichsten, unter Berücksichtigung der geforderten Qualität möglichst viele Trassen zu schaffen und diese zu verkaufen, um die Nachfrage entsprechend zu befriedigen. Die Anzahl an Trassen von Streckenabschnitten ist von mehreren Faktoren, wie beispielsweise der geforderten Qualität von Seiten des Infrastrukturbetreibers, den Streckengegebenheiten oder dem Einhalten von vorgegebenen Betriebsprogrammen (integrierter Taktfahrplan) abhängig und variiert entsprechend der Voraussetzungen [25].

Es wird demnach in dieser Arbeit versucht, je nach Trassenmischung und variierenden Einflussfaktoren allgemeingültige Aussagen über Kapazitäten auf zweigleisigen Eisenbahnstrecken zu treffen.

5.2 Zusammenspiel von Kapazität, Infrastruktur, Produktionsplan und Qualität

Es gibt mehrere Arten von Kapazitäten, die durch verschiedene Ausgangssituationen differenzierte Aussagen liefern, wobei die theoretische Kapazität und die Plankapazität die häufigst genannten sind. „Die theoretische Kapazität einer Infrastruktur wird an der Anzahl von Zügen gemessen, die auf einer Infrastruktur pro Zeiteinheit verkehrt, wobei alle Trassen im Mindestabstand geplant sind“ (aus [26] S.9). Die theoretische Kapazität ist somit die maximale Kapazität, die unter idealisierten Voraussetzungen auf einem Streckenabschnitt, über einen definierten Zeitraum erreicht werden kann. Die idealisierten Voraussetzungen lauten:

- I Absolute Angleichung der Geschwindigkeiten und der Zugtrassen
- I Zugfolgeabstand ohne Fahrzeitreserven und Pufferzeiten

Es handelt sich hierbei um einen theoretischen Wert, da die Bedingungen real nur von Verkehrssystemen erfüllt werden können, bei welchen nur eine Verkehrsart verkehrt, wie

es beispielsweise bei Metrolinien der Fall ist [26]. Bei der Eisenbahn und speziell bei Mischbetrieb gibt es neben den unterschiedlichen Zuggattungen noch zahlreiche Kriterien, die es nicht möglich machen, die theoretische Kapazität zu erreichen. Diese sind im Wesentlichen:

- I die Prioritätenlegung bei Zusammenstellung des Zugmix aufgrund von Beförderungsanforderungen im Personenverkehr (z.B. Anzahl der geforderten Regionalzüge)
- I Wahrung der Netzzusammenhänge
- I Fahrzeitzuschläge
- I Berücksichtigung der Qualität
- I die Maßnahmen zur Instandhaltung von Streckenabschnitten [24]
- I usw.

Aussagekräftig ist für das Trassenmanagement demnach nicht die theoretische Kapazität, sondern nur die Plankapazität, die an den Produktionsplan, die Betriebsqualität und die Infrastruktur gebunden ist. Die Definition der Plankapazität lautet demnach: *„Die Plankapazität einer Infrastruktur wird an der Anzahl an Zügen gemessen, die pro Zeiteinheit mit dem Grad an Betriebsqualität verkehren, der statistisch dem gewünschten Grad entspricht“* (aus [26] S. 9).

Produktionsplan

Der Produktionsplan enthält die realen Maßnahmen für den Bahnbetrieb und definiert in Form von Fahr- und Umlaufplänen die Zuggattungen (Zugmix) mit den entsprechenden Fahrplangeschwindigkeiten. Zudem werden Einflussfaktoren, wie die Zuglänge, Brems- und Beschleunigungsvorgänge dieser Zugzusammenstellungen und die damit real verkehrenden Züge definiert. Er umfasst demnach auch die Fahrzeiten, Haltezeiten, Pufferzeiten und Zuschläge, wie den bei Fahrplänen üblichen Fahrzeitzuschlag. Der Produktionsplan ist demnach maßgeblich für den reibungslosen Eisenbahnbetrieb verantwortlich und bestimmt somit die Ausnutzung der Kapazität von Betriebsanlagen (Strecke und Knoten) [26].

Infrastruktur

Zur Infrastruktur zählen alle Anlagen, die für die Abwicklung von Eisenbahnverkehr unumgänglich sind, wobei hier Strecken und Bahnhöfe gleichermaßen von Relevanz sind

wie die Signaltechnik und das Zugsicherungssystem. Sie definiert somit die grundlegenden Einflussfaktoren für die Kapazität eines Streckenabschnitts. Die maßgebendsten Einflussfaktoren von Seiten der Infrastruktur sind daher die Anzahl der Gleise, die Überholbahnhöfe, Überleitstellen, Weichen, Blockabstände und die Art der Zugbeeinflussung [26]. Bei Infrastrukturinstandhaltungsmaßnahmen ist die Infrastruktur nur begrenzt nutzbar, wobei diese Störfälle demnach ebenfalls zu den infrastrukturseitigen Einflussfaktoren zählen. Störfälle finden in dieser Studie jedoch keine weitere Betrachtung.

Qualität

Für die Qualität des Gesamtsystems ist die Stabilität der schienengebundenen Verkehrsabwicklung, die in Form von Fahrzeitreserven und Pufferzeiten gewährleistet wird, der wesentlichste Indikator. Über Fahrzeitreserven, die üblicherweise bei der Fahrplangestaltung als Zuschlag zu Basisfahrzeit hinzugerechnet werden, können kleinere Verspätungen eines Zuges auf einem Streckenabschnitt kompensiert werden. Ohne Fahrzeitreserven würde ein verspäteter Zug die Verspätungsminuten über den gesamten zu fahrenden Streckenabschnitt beibehalten.

Pufferzeiten zwischen Zügen sorgen hingegen dafür, dass sich Verspätungen des vorfahrenden Zuges nicht oder nur bedingt auf die Pünktlichkeit der darauffolgenden Züge auswirken. Je mehr Pufferzeiten zwischen den zu vergebenden Trassen berücksichtigt werden, desto stabiler funktioniert der Bahnbetrieb über einen längeren Betrachtungszeitraum und desto unwahrscheinlicher sind Verspätungsverschleppungen auf Folgezüge. Zu große Pufferzeiten schaffen zwar hohe Qualität, begrenzen die Kapazität jedoch maßgeblich. Es ist daher darauf zu achten, einen ausgeglichenen Fahrplan zu gestalten, der den Anforderungen der Kapazität gerecht wird und gleichermaßen einen ausreichend stabilen Eisenbahnbetrieb zulässt. Der Infrastrukturbetreiber setzt den Grad der Pünktlichkeit an und definiert die Qualitätsanforderungen an den Streckenabschnitt, wobei der Markt und die Vorstellungen der Eisenbahnverkehrsunternehmen Berücksichtigung finden. Das bedeutet grundsätzlich, dass der Infrastrukturbetreiber festlegt, wie viele Trassen unter welchem Pünktlichkeitsniveau betrieben werden, um so auf die Nachfragesituation zu reagieren.

5.3 Einflussfaktoren auf die Kapazität

Die Kapazität ist, wie in den vorhergegangenen Kapiteln eruiert, eine Größe, die von mehreren Einflussfaktoren abhängt. Ein wesentlicher Faktor sind Infrastrukturausbaumaßnahmen, die in der Regel zu Kapazitätssteigerungen führen. Neben dem Ausbau der Infrastruktur gibt es jedoch Parameter, die für die betriebliche Abwicklung eines zweigleisigen Streckenabschnitts im Sinne von Kapazitätseinbußen beziehungsweise Kapazitätssteigerungen von Relevanz sind. Jene Parameter werden nachfolgend näher erläutert und deren Auswirkungen veranschaulicht.

5.3.1 Geschwindigkeitsschere

Wie bereits mehrmals erwähnt, ist die Geschwindigkeitsschere, welche beim Verkehren von ungleich schnellen Zügen auftritt, für Kapazitätsverluste verantwortlich. Die Geschwindigkeitsschere entsteht, weil die Abschnitte einer Strecke unterschiedlich lange von Zügen belegt sind, da ein langsamer Zug einen Streckenabschnitt länger belegt als ein schneller.

Die Größe der Geschwindigkeitsspreizung und somit die Höhe des Kapazitätsverlusts hängt im Wesentlichen von zwei Einflussgrößen ab:

- I der Geschwindigkeiten der hintereinander verkehrenden Züge
- I der betrachteten Streckenlänge

Es fließen jedoch prinzipiell alle Parameter, die das Fahrverhalten der Züge und die Mindestzugfolgezeit beeinflussen, in die Geschwindigkeitsschere ein. Zu diesen Parametern zählen grundsätzlich die Blocklänge, der Vorsignalabstand, die Zuglänge, die Beschleunigung- und Bremsvorgänge und die Längsneigung des Streckenabschnitts.

Parameter, die im Grunde genommen nicht der Geschwindigkeitsschere zugerechnet werden können, jedoch Auswirkungen auf die Mindestzugfolgezeit hintereinanderfahrender Züge haben sind sicherlich das Halten am Hauptgleis und die Pufferzeit.

Geschwindigkeiten der hintereinander verkehrenden Züge

Zusammenhang mit der Kapazität: Je homogener die Geschwindigkeiten, desto höher ist die Kapazität.

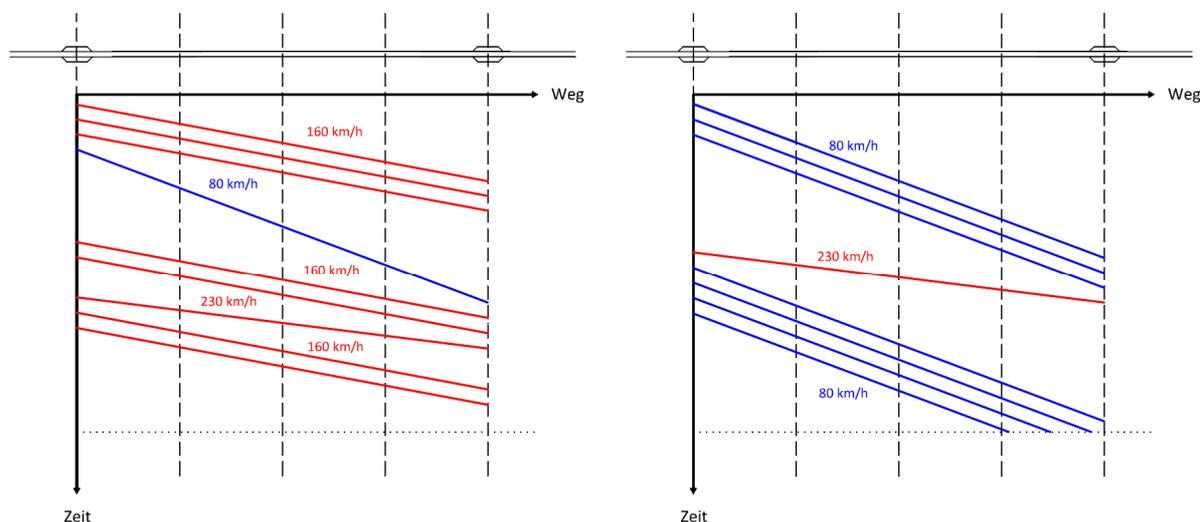


Abbildung 21 – Geschwindigkeitsschere – Geschwindigkeitsunterschiede

Bei den in den Abbildungen blau markierten Trassen handelt es sich um Trassen langsamerer Züge, wobei die roten Markierungen schnellere Züge darstellen.

Die rein schematische Abbildung 21 zeigt, dass es beim Hintereinanderfahren von Zügen mit ungleich hohen Geschwindigkeiten zwangsläufig zu Kapazitätsverringern kommt. Daraus geht hervor, dass Mischverkehr grundsätzlich nur unter Kapazitätseinbußen betrieben werden kann. Durch betriebliche Maßnahmen ist es jedoch möglich die Kapazität zu steigern. Es ist, wenn es der Fahrplan zulässt, am effektivsten, Züge mit ähnlich hohen Geschwindigkeiten gebündelt verkehren zu lassen. Bei Möglichkeit der Trennung von Güterzügen und schnellen Personenzügen auf Grund von mehreren Gleisen, wie es auf der österreichischen Westbahn der Fall ist, führt bei reiner Betrachtung von Kapazitätsgründen kein Weg an der Trennung dieser Zuggattungen vorbei, da die Kapazität enorm gesteigert werden kann.

Streckenlänge zwischen Überholvorgängen

Zusammenhang mit der Kapazität: Je länger der Streckenabschnitt ohne Überholvorgang ist, desto stärker wird die Kapazität beschränkt.

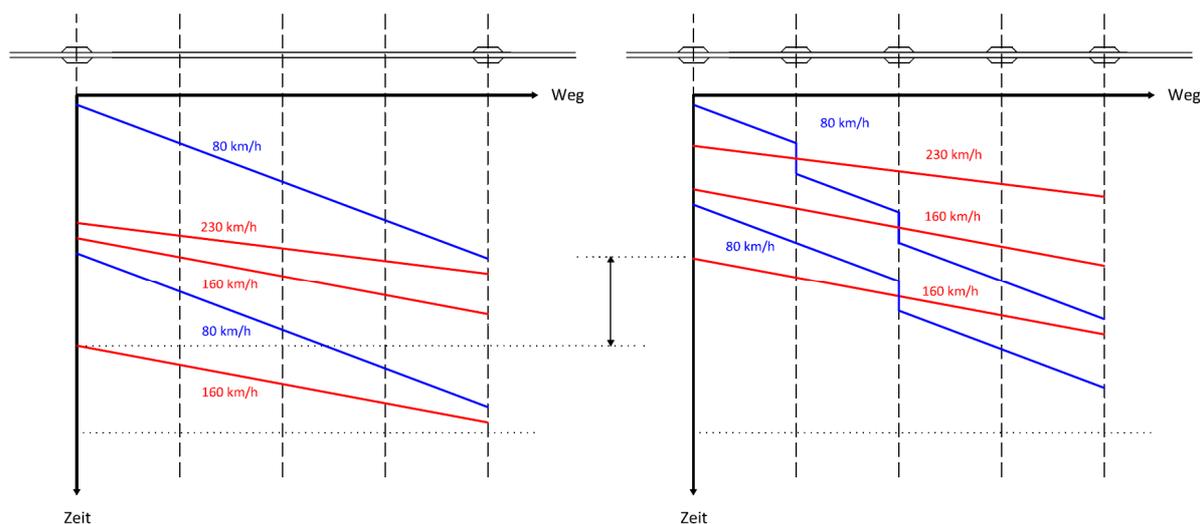


Abbildung 22 – Geschwindigkeitsschere – Länge zwischen Überholvorgängen

Die Abbildung 22 stellt auf der linken Seite einen längeren Streckenabschnitt ohne zusätzliche Überholmöglichkeiten dar. Durch Überholmöglichkeiten, die in der rechten Darstellung durch Überholbahnhöfe sichergestellt werden, kann die Mindestzugfolgezeit massiv verkürzt werden, weil ein Überholen langsamerer Züge somit ermöglicht wird. Die langsamen Züge werden dabei jedoch deutlich aufgehalten. Deshalb ist ein Überholen von langsamen Personenzügen im Gegensatz zu Güterzügen nur im Taktknoten sinnvoll.

5.3.2 Haltestellen am Hauptgleis

Zusammenhang mit der Kapazität: Je länger ein Zug auf dem Hauptgleis hält, desto geringer ist die Kapazität.

Durch das Halten von Zügen auf dem Hauptgleis wird die Kapazität in den meisten Fällen beschränkt, da das Vorbeifahren von schnelleren Zügen nicht möglich ist und der

Streckenabschnitt durch den haltenden Zug länger belegt ist. Bei „günstiger“ Zugfolge (z.B.: Güterzug – S-Bahn – Güterzug) ist dies jedoch nicht der Fall, da ein kurzer Halt durch die Möglichkeit einer früheren Abfahrt am „Ausgangsbahnhof“ kompensiert werden kann. Für eine Aussage über den Zusammenhang zwischen Kapazitätsverlust und Halten am Hauptgleis bedarf es demnach einer Betrachtung im Einzelfall, wodurch sich allgemeine Auswertungen als schwierig erweisen.

Bei Geschwindigkeiten über 160 km/h ist das Halten am Hauptgleis auf freier Strecke nicht mehr gestattet und daher für die Auswertungen von $V_{max} > 160$ irrelevant.

5.3.3 Blockabstand

Zusammenhang mit der Kapazität:

Je länger der Blockabschnitt ist, desto geringer ist die Kapazität.

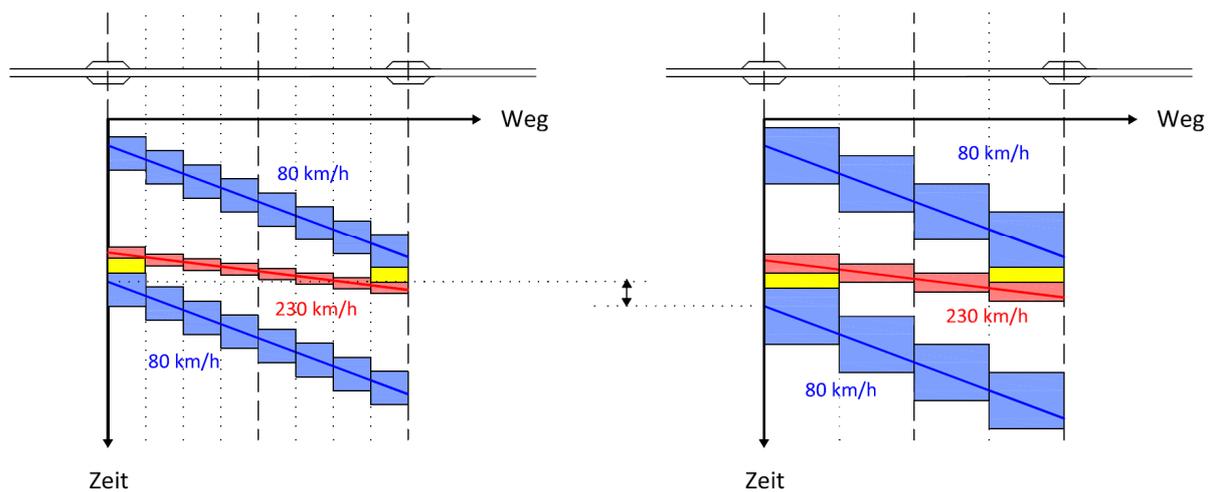


Abbildung 23 – Einfluss des Blockabstands auf die Kapazität

Bei den angeführten Beispielen sind, um die Auswirkungen der Blocklänge auf die Mindestzugfolgezeit darzustellen, die Blocklänge und der Vorsignalabstand der rechten Abbildung doppelt so groß gewählt worden, wie die der linken. In den Darstellungen haben alle Blockabstände dieselbe Länge, wobei dies auf Bestandsstrecken meist nicht der Realität entspricht. Bei Verkürzung der Blockabschnitte auf fahrgleiche Abschnitte kann auf die höchste Kapazität erzielt werden.

Alle gewählten Beispiele spiegeln das „Fahren im festen Raumabstand“ wider. Wird dies durch das „Fahren im wandernden Block“ ersetzt, welches der kontinuierlichen Zugüberwachung entspricht, kann die Kapazität massiv gesteigert werden. In diesem Fall sind alle Überlegungen über Blocklängen und Vorsignalabstände hinfällig.

5.3.4 Pufferzeit

Zusammenhang mit der Kapazität: Je größer die Pufferzeiten gewählt werden, desto größer ist der Kapazitätsverlust.

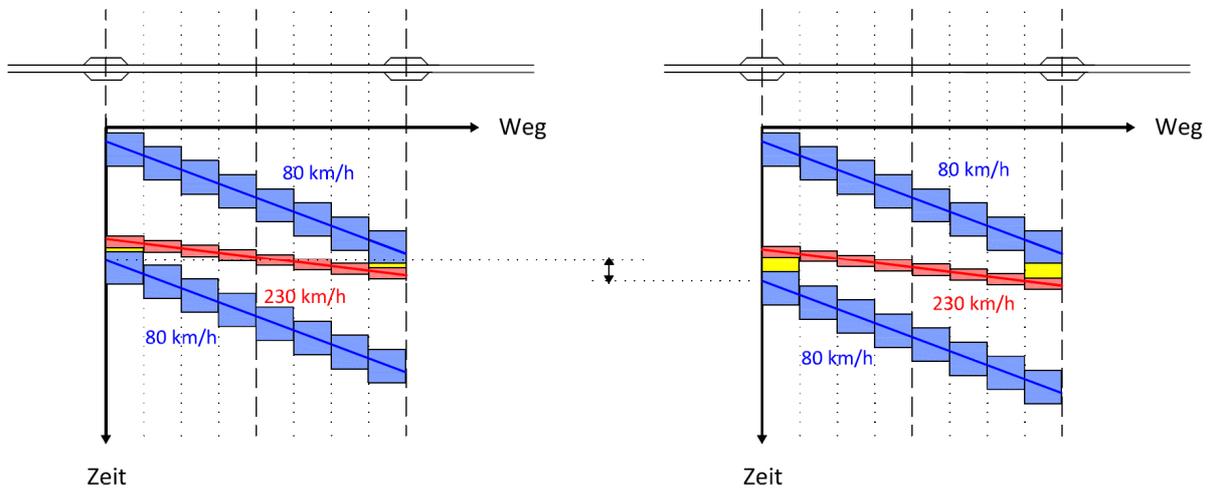


Abbildung 24 – Einfluss der Pufferzeit auf die Kapazität

Die Pufferzeit ist, wie schon im Unterkapitel „Qualität“ eingegangen, ein maßgebender Faktor für die Stabilität, Qualität und Kapazität.

5.3.5 Brems- und Beschleunigungsvorgänge

Zusammenhang mit der Kapazität: Je geringer das Beschleunigungsvermögen der Züge ist, desto größer ist der Kapazitätsverlust.

Brems- und Beschleunigungsvorgänge beeinflussen die Kapazität, da sie Einfluss auf die Fahrzeit von Zügen haben und bei höheren Beschleunigungswerten ein Erreichen der Höchstgeschwindigkeit schneller möglich machen. Zudem werden bei Beschleunigungen aus dem Stand aufgrund der geringeren Fahrgeschwindigkeit die Sperrzeiten der Blöcke länger. Längsneigungen auf Strecken haben auch Auswirkungen auf das Fahrverhalten von Zügen, weil diese den Beschleunigungsvorgang eines Zuges verlängern beziehungsweise verkürzen können.

5.4 Allgemeine Maßnahmen zur Erhöhung der Streckenleistungsfähigkeit

Auf Grund der genannten Einflussfaktoren gibt es mehrere Möglichkeiten, die Streckenleistungsfähigkeit zu erhöhen, welche in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst und aufgelistet werden.

Tabelle 5 – Maßnahmen zur Erhöhung der Streckenleistungsfähigkeit [28]

Maßnahmen zur Erhöhung der Streckenleistungsfähigkeit		
Fahrzeug-technische Maßnahmen	Angleichen der fahrdynamischen Parameter:	<i>Erhöhung der Zuggeschwindigkeiten langsamer Züge aber auch Verringerung der Zuggeschwindigkeiten schneller Züge</i>
		<i>Erhöhung des Brems- und Beschleunigungsvermögens bei Zügen mit vielen planmäßigen Unterwegshalten</i>
		<i>Erhöhung des Brems- und Beschleunigungsvermögens bei Güterzügen</i>
	Erhöhung der zuglängenbezogenen Kapazität:	<i>Einsatz von Doppelstockwagen im Personenverkehr</i>
Maßnahmen an der Strecke	Infrastrukturausbau:	<i>Streckenausbau mit zusätzlichen Gleisen</i>
		<i>Zusätzliche Überholbahnhöfe</i>
		<i>Verlegen der Bahnsteigkanten von durchgehenden Hauptgleisen an Ausweichgleise</i>
		<i>Verlängerung von Überholgleisen zur Schaffung von Brems- und Beschleunigungsabschnitten außerhalb der durchgehenden Streckengleise</i>
		<i>Einbau von Weichen mit hohen zulässigen Geschwindigkeiten im abzweigenden Weichenstrang und kurzen Stellzeiten</i>
		<i>Entschärfung singulärer Geschwindigkeitseinbrüche</i>
	Neue Techniken zur Abstandsicherung und flexiblen Fahrwegnutzung:	<i>Verkürzung der Blockabschnitte auf fahrzeitgleiche Abstände</i>
		<i>Kontinuierliche Zugüberwachung incl. Zugschlussortung zum Fahren im Bremswegabstand</i>
		<i>Hochleistungsblocks</i>
		<i>Automatische Fahrtbeeinflussung</i>
Betriebliche Maßnahmen	Kapazitätsorientierte Fahrplangestaltung:	<i>Bündelung von Zügen mit fahrdynamisch gleichen bzw. ähnlichen Kenngrößen</i>
		<i>Reduzierung der Zuggeschwindigkeiten schneller Züge in Engpassabschnitten</i>
		<i>Zeitliche oder räumliche Trennung von Zügen mit sehr unterschiedlichen fahrdynamischen Kenngrößen</i>
	Flexible Betriebsabwicklung:	<i>Großräumige rechnergestützte Betriebsüberwachungen</i>

6 Ermittlung der Streckenkapazitäten

Bei den in den folgenden Absätzen angeführten Modellen handelt es sich um Methoden zur Ermittlung von Kapazitäten unter Berücksichtigung von Betriebsqualitätskriterien (Plankapazitäten), wobei an dieser Stelle der Fokus auf der Bestimmung der Streckenkapazitäten liegt.

Es gibt nach dem international gültigen UIC-Kodex grundsätzlich zwei Möglichkeiten, die Plankapazität zu ermitteln, wobei dies mittels einer Betriebssimulationssoftware erfolgt:

- I die Vergleichsmethode
- I die Methode der Störungssimulation [26]

Über Jahrzehnte sind zahlreiche weitere Modelle entwickelt worden, wie das hier verwendete SBB/ÖBB-Modell. In dieser Arbeit wird jedoch nur auf dieses Modell und die Methoden nach dem UIC-Kodex in Verbindung mit der Betriebssimulationssoftware RailSys näher eingegangen.

6.1 Fahrplanunabhängige Methode der SBB/ÖBB

6.1.1 Grundlagen zum Rechenmodell und die Ausprägungen der Einflussfaktoren

(Modell und Weg der Kapazitätsermittlung aus [13])

Die Studie widmet sich im Wesentlichen der Thematik von Kapazitätsgewinnen, beziehungsweise Verlust von Kapazität unter Variation der Ausprägungen der Einflussfaktoren, anhand einer auf Durchschnittswerten basierenden Modellstrecke. Da die Ausprägungen der Einflussgrößen bei der Variationsanalyse je nach Auswertungsziel variieren, werden diese im Zuge der Erläuterung des Rechenmodells mit den jeweiligen Basisparametern und dem Analysebereich angeführt.

Es soll in der nachfolgenden Variationsanalyse veranschaulicht werden, welchen Einfluss die einzelnen Parameterausprägungen auf die Kapazität einer Strecke über einen definierten Zeitraum unter spezieller Betrachtung der Geschwindigkeitsparameter haben.

Um allgemein gültige Aussagen und wegweisende Ergebnisse für zweigleisige Streckenabschnitte zu erzielen, ist im Zuge dieser Arbeit das fahrplanfreie stochastische Modell ÖBB/SBB gewählt worden. Die Berechnung der Kapazität erfolgt demnach auf der

Ermittlung der mittleren Mindestzugfolgezeit auf Basis der Erwartungswerte von Zugfolgen eines vorab definierten Zugmix.

Zugmix:

Der Zugmix besteht aus der anteilmäßigen Verteilung der Zuggattungen einer Strecke, sowie deren Basisgeschwindigkeiten. Über die Anzahl der Züge der jeweiligen Zuggattungen innerhalb eines Zugmix werden die Häufigkeiten der Zugfolgen zwischen Zuggattungen im Wahrscheinlichkeitsmodell errechnet und somit realitätsnahe Verhältnisse geschaffen. Es werden Auswertungen mit zwei unterschiedlichen Zugmixen erstellt, damit differenzierte Aussagen zu verschiedenen Gegebenheiten von verkehrenden Zuggattungen (Nahverkehr/Fernverkehr/Güterverkehr) gemacht werden können. Um die Zugmixe möglichst verständlich und übersichtlich zu gestalten, ist die Anzahl der Züge eines Zugmix so gewählt worden, dass diese in etwa dem derzeitigen Zugverkehr einer Stunde eines Streckenabschnitts entspricht.

Folgende Zugmixe werden für die Analyse herangezogen:

Tabelle 6 – Zugmixe

Zugmix I			
Personenzüge	1x	railjet	entspricht etwa dem Zugverkehr einer Stunde
	3x	IC/EC/ICE	
	0x	REX	
	0x	S-Bahn/R	
Güterzüge	4x	Güterzug	

Zugmix II			
Personenzüge	1x	railjet	entspricht etwa dem Zugverkehr einer Stunde
	1x	IC/EC/ICE	
	1x	REX	
	4x	S-Bahn/R	
Güterzüge	2x	Güterzug	

Die Ermittlung der Kapazität erfolgt bei diesem Modell jeweils auf Basis eines Zugmix und wird in fünf Berechnungsschritten ermittelt:

- I Schritt 1: Berechnung der Fahr- und Belegzeiten
- I Schritt 2: Berechnung der Mindestzugfolgezeiten
- I Schritt 3: Berechnung der Erwartungswerte
- I Schritt 4: Berechnung der mittleren Mindestzugfolgezeit
- I Schritt 5: Berechnung der Leistungsfähigkeit

Schritt 1 – Berechnung der Fahr- und Belegzeiten

Für die Ermittlung der möglichen Zugzahlen werden für alle Zuggattungen, mit den jeweiligen Höchstgeschwindigkeiten, die Fahrzeit zwischen Überholbahnhöfen und die Belegzeit des „maßgebenden“ Blocks ermittelt.

Fahrzeit zwischen zwei Überholvorgängen:

$$t_F = \frac{z_F \cdot L_{\text{üb}}}{V_H} \cdot \frac{60}{1000}$$

z_F ... Fahrzeitzuschlag, der bei Fahrplänen üblicherweise 10% entspricht

$L_{\text{üb}}$... Länge zwischen Überholvorgängen (Streckenlänge) [m]

V_H ... Höchstgeschwindigkeit der Zuggattung [km/h]

Fahrzeitzuschlag (z_F)

Bei der Fahrzeit wird von einem Fahrzeitzuschlag von 10% ausgegangen, welcher die Stabilität der Einhaltung von Fahrplanzeiten gewährleisten soll.

Streckenlänge ($L_{\text{üb}}$)

Bei der Streckenlänge handelt es sich in dieser Studie durchgehend um die Strecke zwischen zwei Überholvorgängen, wobei ein Überholvorgang grundsätzlich an einem Bahnhof oder eine Überleitstelle erfolgen kann. Die Möglichkeit, an Überleitstellen zu überholen, wird in den Auswertungen jedoch vernachlässigt, da bei den Auswertungen

von Strecken an der Kapazitätsgrenze ausgegangen wird und sich demnach keine Möglichkeiten für Überholvorgänge außerhalb der Überholbahnhöfe bieten.

Die Berechnung der durchschnittlichen Streckenlänge ist auf der österreichischen Südbahn durchgeführt worden. Demnach ergibt sich durchschnittlich alle 6,22 Kilometer eine Überholmöglichkeit.

Tabelle 7 – Details zur Streckenlänge

Strecken zwischen Überholbahnhöfen (Südbahn)	
durchschnittliche Länge	6,22 km
maximale Länge	13,25 km
minimale Länge	2,36 km

Die Auswertungen werden jedoch nicht mit der durchschnittlichen Streckenlänge, sondern immer unter Betrachtung verschiedener Untersuchungslängen durchgeführt, um Aussagen über ein breites Band an Strecken zu bekommen. Für eine realitätsbezogene Betrachtung ist außerdem zu erwähnen, dass in der Realität nicht an jeder Überholmöglichkeit auch ein Überholvorgang stattfindet, da dies massive zeitliche Auswirkungen hätte. Auch aus diesem Grund werden die Auswertungen für längere Streckenlängen als der durchschnittlich berechneten Streckenlänge ermittelt. Die angeführten Streckenlängen in der Tabelle 7 können demnach ausschließlich als Vergleichswerte verstanden werden.

Höchstgeschwindigkeit:

Die Höchstgeschwindigkeit ist die im Zuge der Auswertung maximal gefahrene Geschwindigkeit der jeweiligen Zuggattung. Die Höchstgeschwindigkeiten variiert bei den Auswertungen um die Auswirkungen der gefahrenen Geschwindigkeiten auf die Kapazität zu ermitteln.

Tabelle 8 – Höchstgeschwindigkeiten der Zuggattungen als Ausgangsgeschwindigkeit

Ausgangsgeschwindigkeiten		
Personenzüge	railjet	230 km/h
	IC/EC/ICE	200 km/h
	REX	160 km/h
	S-Bahn/R	140 km/h
Güterzüge	Güterzug	80 km/h

Belegzeit eines Blockabschnitts:

$$t_B = \frac{(L_B + L_V + L_D + L_Z)}{V_H} \cdot \frac{60}{1000} + t_s$$

- t_B ... Belegzeit eines Blockabschnitts [min]
- L_B ... Blocklänge [m]
- L_V ... Länge des Vorsignalabstandes [m]
- L_D ... Länge des Durchrutschweges [m]
- L_Z ... Zuglänge [m]
- V_H ... Höchstgeschwindigkeit [km/h]
- t_s ... Zusätzlicher Zeitanteil für Sichtzeit [min]

Die Belegzeit eines Blockabschnitts errechnet sich aus der Fahrzeit durch die sperrzeitenrelevante Strecke, welche sich aus der Blocklänge, dem Vorsignalabstand, dem Durchrutschweg und der Zuglänge zusammensetzt.

Vorsignalabstand (L_V):

Der Vorsignalabstand beträgt für den gesamten Streckenabschnitt einheitlich 1,6 Kilometer. Mehrabschnittssignalisierungen finden unter jenem Aspekt Betrachtung, dass die Blocklänge im Zuge der Variationsanalyse bis auf 1,6 km und somit auf dieselbe Länge wie der Vorsignalabstand verkürzt wird. Für $V_{max} > 160$ km/h ist generell eine Führerstandssignalisierung vorgesehen, wodurch der Bremsweg schneller Züge berücksichtigt wird, welcher den Vorsignalabstand übersteigt.

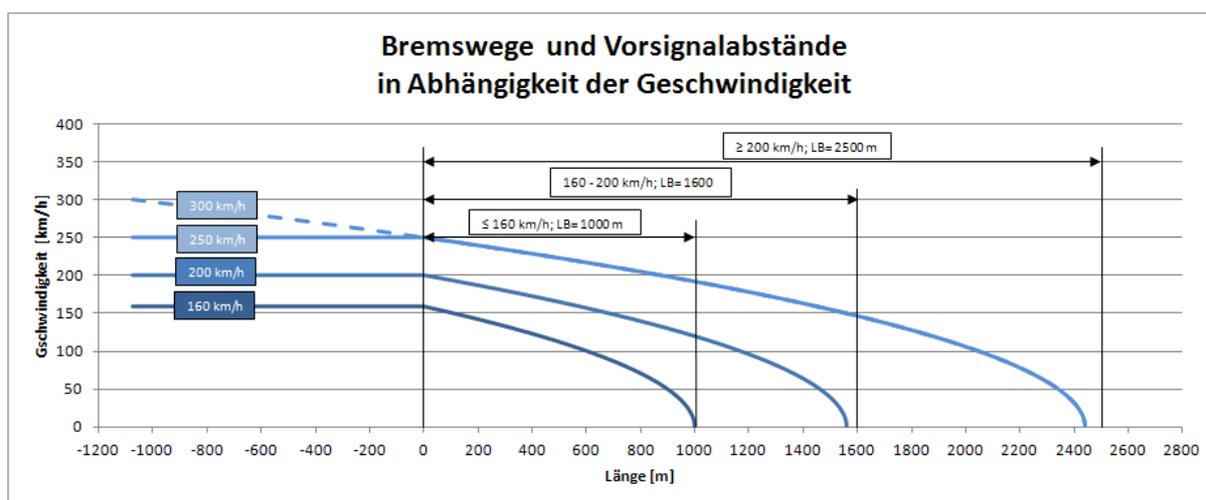


Abbildung 25 – Bremswege und Vorsignalabstände in Abhängigkeit der Geschwindigkeit

Bei Geschwindigkeiten über 250 km/h wird ebenfalls von einer Mehrabschnittssignalisierung ausgegangen, wobei durch eine schrittweise Absenkung der Geschwindigkeiten der berücksichtigte Bremsweg eine Länge von 2,5 Kilometer nicht übersteigt.

Blocklänge (L_B):

Für die durchschnittliche Blocklänge wird ein repräsentativer Wert von 2,5 Kilometern herangezogen. In Zuge der Variationsanalyse erfolgen Kapazitätsermittlungen im Analysebereich zwischen 1,6 und 3,4 Kilometern. Bei den Auswertungen wird die Blocklänge bei Geschwindigkeiten kleiner 160 km/h teilweise auf einem Kilometer verkürzt, wodurch sich eine Mehrabschnittssignalisierung mit optimierten Blocklängen ergibt.

Durchrutschweg (L_D):

Der Durchrutschweg ist in Österreich nicht üblich und wird demnach in den Berechnungen im Zuge dieser Studie nicht berücksichtigt.

Zuglänge (L_Z):

Die Zuglänge wird einheitlich für alle Zuggattungen bei allen Auswertungen mit 400 Metern angenommen.

Sichtzeit (t_s)

Für die Sichtzeit, die Fahrstraßenbilde- und Fahrstraßenauflösezeit werden 0,2 Minuten zusätzlich eingerechnet.

Schritt 2 – Berechnung der Mindestzugfolgezeiten

Es gibt beim Hintereinanderfahren zweier ungleich schneller Züge zwei Möglichkeiten:

- I der schnellere Zug fährt vor dem langsameren Zug – Zugfolgefall 1
- I der schnellere Zug fährt hinter dem langsameren Zug – Zugfolgefall 2

Aufgrund der unterschiedlich langen Mindestzugfolgezeiten ergeben sich daraus zwei Berechnungen.

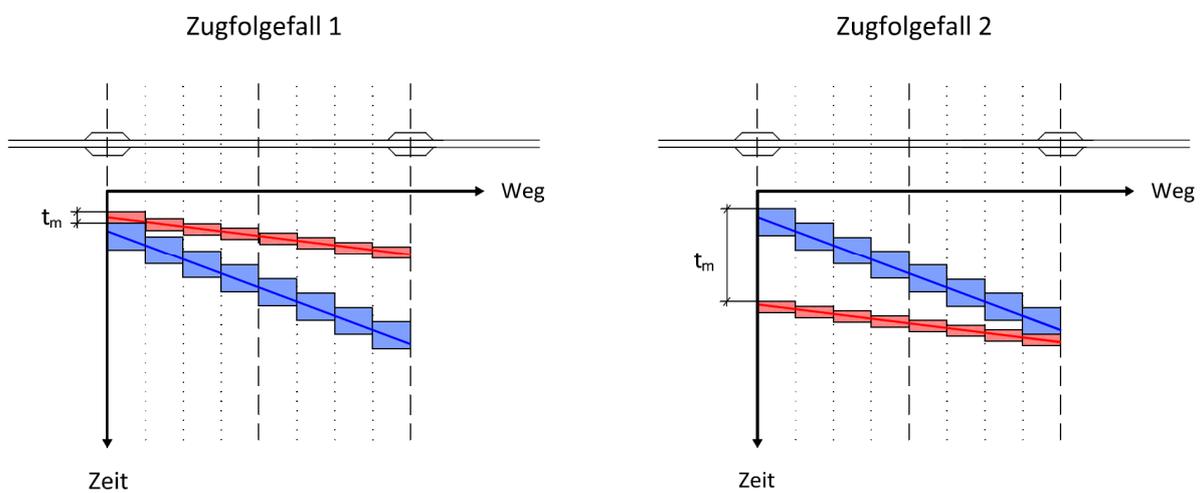


Abbildung 26 – Mindestzugfolgezeiten der Zugfolgefälle

Mindestzugfolgezeit für den Zugfolgefall 1:

Fährt der schnellere Zug vor dem langsameren Zug, entspricht die Mindestzugfolgezeit der Belegzeit des schnelleren Zuges.

$$t_{m_{ij}} = t_{b_i} \quad \text{für } i \geq j$$

- i ... Geschwindigkeit des vorausfahrenden Zuges
- j ... Geschwindigkeit des nachfolgenden Zuges
- $t_{m_{ij}}$... Mindestzugfolgezeit [min]
- t_{b_i} ... Belegzeit für den Block (schnellerer Zug) [min]

Mindestzugfolge für den Zugfolgefall 2:

Fährt jedoch der langsamere Zug vor dem schnelleren, ergibt sich eine längere Mindestzugfolgezeit, die sich aus der Differenz der Fahrzeiten und der Belegzeit des schnelleren Zuges ergibt. Zusätzlich werden Zuschläge für den Beschleunigungs- und Bremsvorgang eingerechnet.

$$t_{m_{ij}} = t_{F_i} - t_{F_j} + t_{Be} + t_{Br} + t_{b_j} \quad \text{für } i < j$$

$t_{m_{ij}}$... Mindestzugfolgezeit [min]

t_{F_i} ... Fahrzeit des langsameren Zuges [min]

t_{F_j} ... Fahrzeit des schnelleren Zuges [min]

t_{Be}, t_{Br} ... zusätzliche Zeitanteile für den Beschleunigungs- und Bremsvorgang [min]

t_{b_j} ... Belegzeit des schnelleren Zuges [min]

Zeitanteile für die Brems- und Beschleunigungsvorgänge (t_{Br} und t_{Be})

Für den zeitlichen Mehraufwand durch Brems- und Beschleunigungsvorgänge von anfahrenen und haltenden Zügen werden durchschnittliche Mehrzeiten ermittelt, wobei sich diese aus der Differenz der Fahrzeiten durch die Länge des Bremsweges ohne Bremsvorgang und mit einem Bremsvorgang errechnen. Dieselbe Vorgehensweise ist beim Beschleunigungsvorgang gewählt worden. Die zusätzlichen Zeitanteile werden für alle Zuggattungen unabhängig von der Höchstgeschwindigkeit berücksichtigt. Diese variieren nach der Längsneigung des Streckenabschnitts, wobei hierfür folgende Werte ermittelt worden sind:

Tabelle 9 – Brems- und Beschleunigungswerte

Längsneigung	Personenzüge		Güterzüge		durchschnittlicher Zeitmehraufwand	
	Beschleunigung	Bremsung	Beschleunigung	Bremsung	t_{Be}	t_{Br}
[‰]	[m/s ²]	[m/s ²]	[m/s ²]	[m/s ²]	[min]	[min]
+ 10	0,4	- 0,6	0,1	- 0,3	1,5	0,8
0	0,5	- 0,6	0,2	- 0,3	1	0,8
- 10	0,6	- 0,6	0,25	- 0,3	0,8	0,8

Dieses Modell setzt voraus, dass am Anfang und Ende einer definierten Streckenlänge zwischen Überholvorgängen ein Halt beider Zuggattung erfolgt, wobei sich daraus folgender Zustand ergibt (Abbildung 27). Das Einfahren in den Bahnhofsbereich symbolisiert hierbei einen Halt der Zuggattung bei einem Überholvorgang.

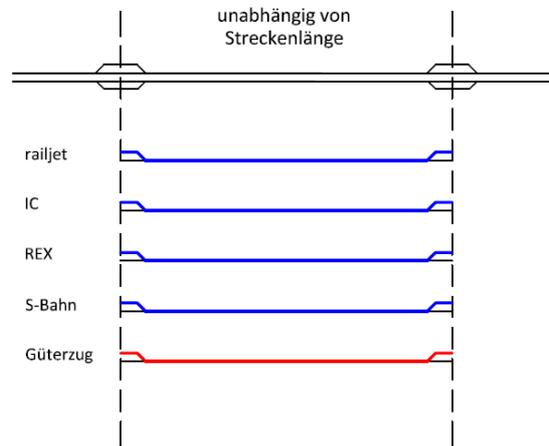


Abbildung 27 – Darstellung der Halte im SBB/ÖBB-Modell

Matrix der Mindestzugfolgezeiten

Für jede mögliche Zugfolge der vorab definierten verkehrenden Züge werden die Mindestzugfolgezeiten berechnet und in einer Matrix der Mindestzugfolgezeiten zusammengefasst.

Die Mindestzugfolgezeiten werden ohne jegliche Pufferzeiten berechnet. Die Pufferzeiten werden im Anschluss einheitlich zur durchschnittlichen Mindestzugfolgezeit hinzugerechnet.

Tabelle 10 – Matrix der Zugfolgezeiten

		nachfolgender Zug (j)											
		Vmax	300	280	250	230	200	180	160	140	120	100	80
vorausfahrender Zug (i)	300												
	280												
	250												
	230												
	200												
	180												
	160												
	140												
	120												
	100												
	80												

$t_{m_{ij}} = t_{b_i} \quad \text{für } i \geq j$

$t_{m_{ij}} = t_{F_i} - t_{F_j} + t_{Be} + t_{Br} + t_{b_j} \quad \text{für } i < j$

Schritt 3 - Berechnung der Erwartungswerte der Zugfolgen:

Entsprechend der Anzahl von verkehrenden Zügen in einem Zugmix ergeben sich für die möglichen Zugfolgen unterschiedliche Erwartungswerte, die durch folgende Formel berechnet werden:

$$k_{ij} = \frac{n_i \cdot n_j}{n}$$

k_{ij} ... Erwartungswert

n ... Anzahl der Züge im definierten Zugmix

n_i ... Anzahl der Züge im Zugmix der Geschwindigkeitsklasse des vorfahrenden Zuges

n_j ... Anzahl der Züge im Zugmix der Geschwindigkeitsklasse des nachfolgenden Zuges

Die Erwartungswerte werden aufgrund der besseren Übersicht ebenfalls in einer Matrix zusammengefasst.

Tabelle 11 – Matrix der Erwartungswerte

		nachfolgender Zug											
		Vmax	300	280	250	230	200	180	160	140	120	100	80
Vmax	n_j	Anzahl der Züge →											
	n_i												
vorausfahrender Zug	300												
	280												
	250												
	230												
	200												
	180												
	160												
	140												
	120												
	100												
80													

$$k_{ij} = \frac{n_i \cdot n_j}{n}$$

Schritt 4 - Berechnung der mittleren Mindestzugfolgezeit

Durch die berechneten Mindestzugfolgezeiten und die Erwartungswerte für das Eintreten eines Zugfalles ist es möglich, die mittlere Mindestzugfolgezeit zu berechnen.

$$t_{mit} = \frac{\sum k_{ij} \cdot t_{m_{ij}}}{n}$$

t_{mit} ... mittlere Mindestzugfolgezeit [min]

Schritt 5 - Berechnung der Leistungsfähigkeit

Die Leistungsfähigkeit errechnet sich somit aus den Stunden des Bezugszeitraumes geteilt durch die mittlere Mindestzugfolgezeit inklusive einer definierten Pufferzeit zwischen den verkehrenden Zügen.

$$P = \frac{x \cdot 60}{t_{mit} + m}$$

P ... Leistungsfähigkeit [Züge/Richtung/Bezugszeitraum]

x ... Anzahl der Stunden des Bezugszeitraumes [h]

m ... Pufferzeit [min]

Betrachtungszeitraum (x):

Für die Auswertungen wird von einem Tageszeitraum von 18 Stunden ausgegangen. Die Berechnungsergebnisse des Tageszeitraumes sind jedoch nicht direkt auf einen 24 Stundenbetrieb umzurechnen, da im Nachtzeitraum ein viel höherer Güterverkehrsanteil, beziehungsweise ausschließlich Güterverkehr, vorhanden ist. Da im Nachtzeitraum die Geschwindigkeitsschere vernachlässigbar klein ist und annähernd homogene Geschwindigkeiten gefahren werden können, findet der Nachtzeitraum in dieser Studie keine nähere Betrachtung.

Pufferzeiten (m):

Zwischen verkehrenden Zügen wird grundsätzlich von einer Pufferzeit von zwei Minuten ausgegangen. Die Pufferzeit wird bei der Kapazitätsberechnung im Zuge der Variationsanalyse zur ermittelten durchschnittlichen Mindestzugfolgezeit hinzugerechnet,

um neben dem Fahrzeitenzuschlag die Betriebsqualität sicherzustellen. Der Analysebereich reicht von 1 bis 3 Minuten. Kapazitätsangaben ohne Zurechnung von Pufferzeiten können als rein theoretische Kapazitäten verstanden werden und bieten demnach keine realitätsnahe Ausgangslage.

Zusammenfassung der Ausprägungen der Einflussparameter

Die eingangs im Zuge der Erklärung des Rechenmodells beschriebenen Einflussfaktoren sind in unten abgebildeter Tabelle für die nachfolgende Variationsanalyse nochmals zusammengefasst. Die Basiswerte werden hierbei aus Durchschnittswerten gebildet. Der Analysebereich ist jeweils so gewählt, dass Grundaussagen für ein breites Band an Eisenbahnstrecken getroffen werden können.

Tabelle 12 – Einflussgrößen

Einflussgrößen					
	Einflussgrößen	Basiswert	Analysebereich	Intervall	
nicht variabel	Betrachtungszeitraum	18 Std.	-----	-----	
variabel	Zugmix	in separater Tabelle	variiert je nach Zugmix		
	Geschwindigkeiten des Zugmix	V _{Pers.}	160 km/h	bis 230 (300) km/h	20 km/h
		V _{Güter.}	80 km/h	80 – 120 km/h	20 km/h
	Streckenlänge	7,5 / 15 / 22,5 km	5 – 30 km	2,5 km	
	Blockabstände	2,5 km	1,6 – 3,4 km	0,9 km	
	Pufferzeiten	2 min	1 – 3 min	1 min	
Längsneigung	0 ‰	+/- 10 ‰	10 ‰		

Im Zuge der Auswertung erfolgt bei den Darstellungen zu den Auswirkungen von schrittweisen Geschwindigkeitserhöhungen teilweise eine Optimierung des Vorsignalabstands auf die Bremslängen der Züge. Der Vorsignalabstand kann jedoch nicht als separat unter Variation untersuchter Einflussfaktor gesehen werden und ist demnach in der Tabelle nicht angeführt.

6.1.2 Rahmenbedingungen und Vereinfachungen für die Berechnungen

Folgende Rahmenbedingungen und Vereinfachungen gelten für jegliche Berechnungen und Auswertungen:

- I Es finden ausschließlich zweigleisige Streckenabschnitte Betrachtung (kein Gleiswechselbetrieb).

- I Auswertungen finden unter reinem Einrichtungsbetrieb statt.
- I Die Auswertungen beziehen sich rein auf Streckenkapazitäten. Knotenkapazitäten werden nicht näher betrachtet.
- I Es wird davon ausgegangen, dass an den Knoten ausreichend Knotenkapazität vorhanden ist.
- I Innerhalb eines Zumixes findet keine Prioritätenlegungen von Abfahrtszeiten aus oder in Knoten statt.
- I Es gibt keine fixe Reihenfolge verkehrender Züge innerhalb eines Zugmix. Die Häufigkeiten des Auftretens von Zugfolgen entstehen ausschließlich durch die gewählte Anzahl der Züge in einem Zugmix.
- I Die Haltedauern in Bahnhöfen finden für die Reihenfolge der ein- und ausfahrenden Züge keine Beachtung.
- I Die Länge der Gleise in den Bahnhofsbereichen ist größer als die maximal gewählte Zuglänge.
- I Fahrzeitzuschläge werden bei der Fahrzeitberechnung mit eingerechnet und daher nicht separat bei der Belegzeit eines Blockes berücksichtigt.
- I Störfälle finden keinerlei Berücksichtigung.
- I Zeitanteile für Instandhaltungsmaßnahmen werden nicht freigehalten.
- I Zusätzliche Trassen für Einzelzugfahrten, die nicht einem Zug im Zugmix zugeordnet werden können, werden nicht berücksichtigt.
- I Bei den Auswertungen zur Variationsanalyse werden ausschließlich mögliche Zugzahlen über den gesamten Betrachtungszeitraum ermittelt. Einschränkungen in Form von Taktfahrplänen bleiben demnach ohne detailliertere Betrachtung.
- I Bei der Variation der Geschwindigkeitsparameter werden Taktfahrpläne in Form von möglichen Zugzahlen innerhalb von Stundenintervallen simuliert, wobei der Zugmix jede Stunde neu startet.

6.2 Betriebssimulationssoftware – RailSys

6.2.1 Vergleichsmethode nach Richtwerten des UIC-Kodex

Bei der Vergleichsmethode, die auch Komprimierungsmethode genannt wird, erfolgt eine Verdichtung der Trassen auf die Mindestzugfolgezeit, ohne jedoch eine Veränderung der Zugfolge durchzuführen. Berücksichtigung finden bei der Komprimierung alle Belegzeiten, auch wenn diese sich nicht direkt auf eine Zugtrasse beziehen. Das bedeutet, dass jegliche Belegungen der Gleise, die zeitliche Einflüsse auf das Hintereinanderfahren von Zügen auf den Gleisen haben, miteinbezogen werden. Dies sind beispielsweise Rangierfahrten, wenn sie auf den betrachteten Streckengleisen stattfinden.

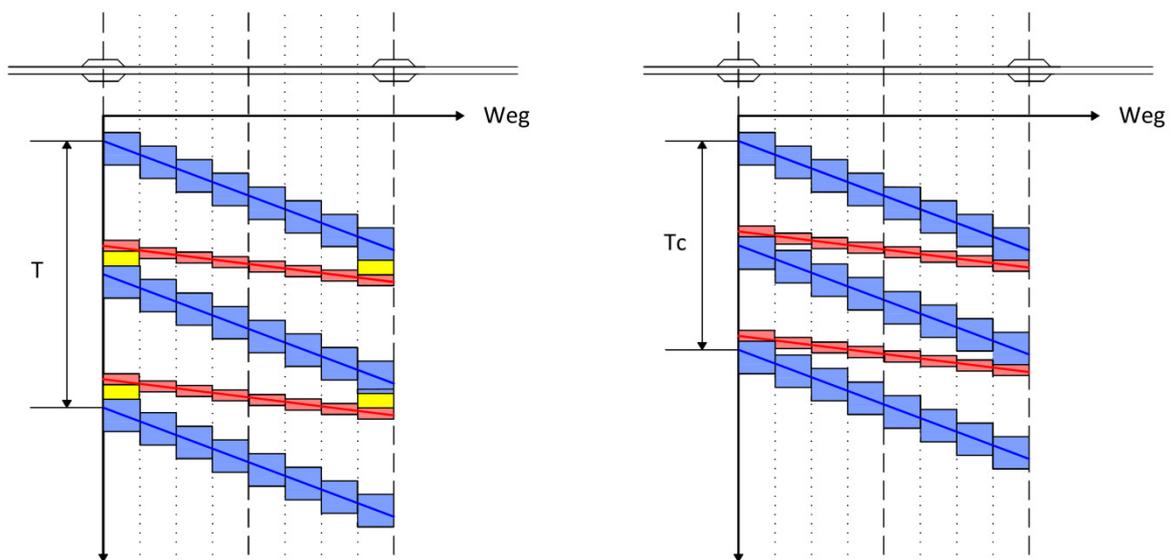


Abbildung 28 – Komprimierung der Zugtrassen

Der Untersuchungszeitraum sollte hierbei jedoch nicht zu klein gewählt werden, um ein breites Band an Zugfolgen (Zugtrassen) in die Komprimierung einfließen zu lassen.

Über die Komprimierung und die damit bekannten ungleich großen Belegdauern der Zugtrassen im Untersuchungszeitraum lässt sich der Sättigungsgrad ermitteln. Dieser errechnet sich aus der Belegdauer nach der Verdichtung geteilt durch die Belegdauer vor der Verdichtung der Zugtrassen. Der Sättigungsgrad gibt durch Vergleichswerte von Streckenabschnitten mit ähnlichen Infrastrukturgegebenheiten Aufschluss über den zu erwartenden Qualitätsgrad. Voraussetzung dafür ist jedoch, dass der Pünktlichkeitsgrad einer zu vergleichenden Infrastruktur bekannt ist. Die Schwierigkeit besteht jedoch darin, Aussagen über die Qualität von Infrastrukturanlagen auf andere zu übertragen, da die

Anlagen meist nicht vergleichbar sind und sich herangezogene Werte häufig massiv unterscheiden.

$$\text{Sättigungsgrad} = \frac{\text{Belegdauer nach der Verdichtung } (T_c)}{\text{Belegdauer vor der Verdichtung } (T)}$$

Stehen keine direkten Vergleichswerte von „ähnlichen“ Strecken zur Verfügung, oder liegt die Vermutung nahe, dass die Vergleichswerte zu keinem wahrheitsgetreuen Ergebnis führen, kann auf Richtwerte des UIC-Kodex 406 zurückgegriffen werden. Jene Richtwerte sind das Ergebnis aus der Betrachtung von etwa 3000 Streckenabschnitten.

Tabelle 13 – Richtzahlen (aus [24] S. 20)

Streckentyp	Hauptverkehrszeit	Tageszeitraum
Spezieller Vorortpersonenverkehr	85%	70%
Spezielle Hochgeschwindigkeitstrecke	75%	60%
Strecke mit gemischtem Verkehr	75%	60%

(Richtwerte: Prozentuelle Belegung des Betrachtungszeitraumes durch Trassen)

Es stellt sich jedoch auch bei diesen Richtwerten die Frage nach einer wahrheitsgetreuen Aussage. Die Prozentwerte variieren stark je nach Heterogenität der Zuggeschwindigkeiten. Die ermittelten Ergebnisse können daher nur als Richtwerte gesehen werden.

Ein Abgleich des ermittelten Sättigungsgrades mit den Richtwerten des Kodex gibt Aufschluss über die Auslastung des Streckenabschnitts. Übersteigt der ermittelte Wert die Richtzahl, ist die Strecke als überlastet anzunehmen. Bei einer Unterschreitung der Richtzahl wird versucht im Fahrplan eine zusätzliche Trasse einzufügen. Steht für diese Trassen ein nicht ausreichend großes Zeitfenster zur Verfügung, spricht man von verlorener Kapazität. Gelingt es jedoch, eine zusätzliche Trasse einzufügen, wird der Zeitanteil der nicht genutzten Kapazität, welcher für die Trasse benötigt wird, zur nutzbaren Kapazität. Eine weitere Analyse ist notwendig und der Komprimierungsvorgang beginnt erneut. Dieser Prozess wird so lange durchgeführt, bis keine Trassen mehr im Fahrplan unter Berücksichtigung der Richtwerte Platz finden.

6.2.2 Methode der Störungssimulation [27]

Bei der Methode der Störungssimulation handelt es sich um eine rechnergestützte Simulation von Störfällen auf einer vorab definierten Infrastruktur samt Signalsystem mit festgelegtem Betriebsprogramm (Produktionsplan). Die Störfälle entsprechen herkömmlichen Störungen des Betriebsablaufs, welche in weiterer Folge Verspätungen (5–10 Minuten) nach sich ziehen. Über die Simulation können die zeitlichen Auswirkungen auf die nachfolgenden Züge ermittelt werden. Somit kann eine Aussage getroffen werden, ob und ab welcher Intensität der Störung Folgeverspätungen auftreten und zu einer heftigeren Beeinträchtigung des Gesamtsystems über einen längeren Zeitraum führen. Ist dies der Fall und können Störungen nicht in einem annehmbaren Zeitfester reduziert werden, ist das System als überlastet anzusehen. Die Stabilität des Fahrplans ist somit nicht gewährleistet. Hierbei müssen Trassen aus dem Fahrplan genommen und die Simulation noch einmal durchgeführt werden.

Ziel einer Simulation ist es somit, eine Strecke mittels Kapazitätsanalyse auf Kapazitätsverbrauch, Überlastung und mögliche Restkapazitäten zu untersuchen, um die Infrastruktur optimal zu nutzen.

Der grundsätzliche Nutzen von rechnergestützten Simulationsprogrammen liegt primär darin, dass im Gegensatz zu konventionellen Verfahren eine wesentlich tiefer greifende Bewertung erzielt werden kann und nicht auf pauschale Empfehlungswerte zurückgegriffen werden muss. Die Darstellung von zeitlichen Zusammenhängen von verkehrenden Zügen in Teilnetzen und die tatsächlich zu erwartenden Auswirkungen auf den Betrieb können ausschließlich mittels Simulation erfolgen [27].

Für die reine Betrachtung der Streckenkapazitäten, wie es in dieser Studie der Fall ist, ist diese Methode jedoch ungünstig, da es bei der betrachteten Modellstrecke weder Knotenpunkte noch Verknüpfungen zwischen Zügen beziehungsweise Anschlussverbindungen in Knoten gibt. Demnach können Verspätungsminuten schon über kurze Betrachtungszeiträume abgebaut werden. Es kommt aufgrund der Fahrzeitreserve nie zu einem Verspätungszuwachs, wobei sich daraus immer die Beurteilung einer guten Betriebsqualität ergibt.

6.3 Modellabgleich

Ein Abgleich ermittelter Kapazitätsergebnisse erfolgt, um sicherzustellen, dass trotz vereinfachter Annahmen im stochastischen Auswertungsmodell (SBB/ÖBB) realitätsnahe Ergebnisse erzielt werden. Dieser erfolgt mittels des Zugmix II, wobei die unter den vorgegebenen Voraussetzungen ermittelten Zugzahlen jeweils mit dem SBB/ÖBB-Modell und der Betriebssimulationssoftware RailSys ermittelt werden. Vorab findet jedoch eine Aufstellung der realen Eingangsdaten (RailSys) im Vergleich zu den vereinfachten Annahmen statt.

6.3.1 Aufstellung der Eingangsdaten

Die Tabelle 14 zeigt eine Übersicht über die vereinfachten Annahmen im SBB/ÖBB-Modell, welche in den folgenden Absätzen näher erläutert werden.

Tabelle 14 – Modellvereinfachungen – Übersicht

	SBB/ÖBB-Modell	RailSys
Fahrplan	fahrplanfrei	definierte Zugfolge
Halte an Überholbahnhöfen	unabhängig von der Zuggattung	abhängig von Zuggattung und deren Haltestellenabständen
Zuglänge	einheitlich 400 m	abhängig von Zuggattung und Zugbildung
Beschleunigung	einheitlicher durchschnittlicher Zeitmehraufwand	abhängig vom Triebfahrzeug und der Zugbildung
Bremung	einheitlicher durchschnittlicher Zeitmehraufwand	abhängig von Zuggattung

Fahrplan:

Die Züge verkehren im RailSys in einem definierten Fahrplan, woraus sich eine immer wiederkehrende Zufolge ergibt. Die Abfahrtszeiten ergeben sich je nach gewählter Pufferzeit, wobei sich die Zugfolge nicht ändert. Folgende Zugfolge wird für den Kapazitätsabgleich herangezogen.

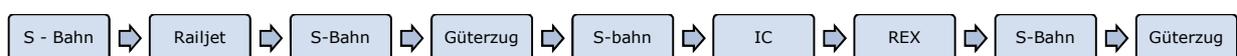


Abbildung 29 – Zugfolge (Mix II) – RailSys

Der Zugmix der Betriebssimulation entspricht exakt der Anzahl der Züge der jeweiligen Zuggattungen des Zugmix II des stochastischen Modells mit dem Unterschied, dass die Zugfolge nicht mehr zufällig erfolgt.

Halte an Überholbahnhöfen:

Das fahrplanfreie SBB/ÖBB-Modell ermittelt die Streckenkapazitäten zwischen Überholvorgängen, wobei dieses Modell voraussetzt, dass unabhängig von der Zuggattung ein Halt am Beginn und am Ende der Strecke stattfindet. Hierbei kann jedoch nicht miteinbezogen werden, dass bei Fernverkehrszügen, der Abstand zwischen Halten unter realer Betrachtung länger ist, als die für Kapazitätsermittlungen herangezogene Streckenlänge zwischen möglichen Überholbahnhöfen. Dies hat angesichts der Brems- und Beschleunigungsvorgänge Auswirkung auf die Kapazität. Demnach wird bei der Ermittlung der Kapazitäten mittel RailSys auf der definierten Modellstrecke von folgender Situation ausgegangen:

Halte in Abhängigkeit der Streckenlänge

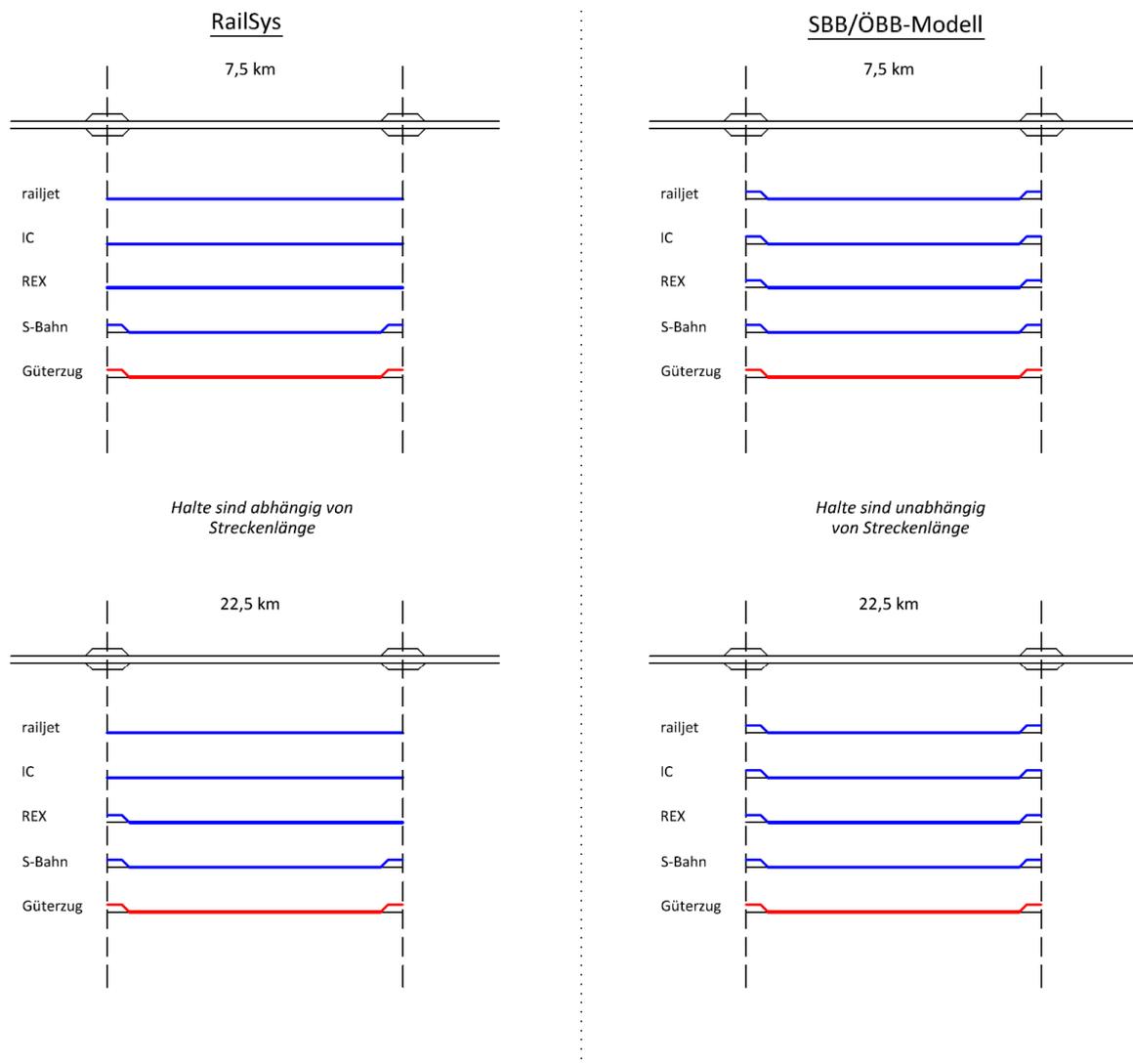


Abbildung 30 – Halte in Abhängigkeit der Streckenlänge

Die dargestellten Ein- und Ausfahrten in den Bahnhofsbereich symbolisieren einen Halt der jeweiligen Zuggattung im Überholbahnhof.

Zuglänge

Die Zuglänge ist abhängig von der Zugbildung der jeweiligen Zuggattung und findet bei der Betriebssimulationssoftware im Gegensatz zum stochastischen Modell (einheitlich 400 m) folgenden Einzug in die Kapazitätsermittlung.

Tabelle 15 – Zugbildung

Zuggattung	Triebfahrzeug/Lok			Wagen/Waggon Länge [m]	Gesamt Zuglänge [m]
	Typ [-]	Anzahl [-]	Länge [m]		
railjet	ÖBB Taurus 1016	2	20x2	360	400
IC	ÖBB Taurus 1016	2	20x2	360	400
REX	ÖBB Taurus 1016	1	20	180	200
S-Bahn	ÖBB Talent 4024	2	67x2	---	134
Güterzug	ÖBB Taurus 1016	1	20	650	670

Beschleunigungsvorgang

Beim Modell der SBB/ÖBB wird der Beschleunigungsvorgang über einen durchschnittlichen Zeitmehraufwand (Kapitel – Grundlagen zum Rechenmodell und die Ausprägungen der Einflussfaktoren), einheitlich für alle Zuggattungen zur Fahrzeit hinzugerechnet. Hierbei finden tatsächliche Einflussfaktoren, wie die Masse des gesamten Zuges und die Einflussparameter durch die Wahl des Triebfahrzeugs/Lok keine Berücksichtigung. Mittels RailSys werden die Beschleunigungsvorgänge unter Berücksichtigung der Zugkräfte (Triebfahrzeug, Lok) und der Laufwiderstände (Masse) separat für die Zuggattungen ermittelt.

Tabelle 16 – Beschleunigungsvorgänge – RailSys

Zuggattung	Tfz/Lok [-]	Anzahl [-]	Zugkraft [kN]	Masse (Gesamt) [t]	Anfahrts- beschleunigung [m/s ²]
railjet	Taurus 1016	2	2x250	~ 900	~ 0,5
IC	Taurus 1016	2	2x250	~ 900	~ 0,5
REX	Taurus 1016	1	250	~ 450	~ 0,5
S-Bahn	Talent 4024	2	2x100	~ 275	~ 0,7
Güterzug	Taurus 1016	1	250	~ 1100	~ 0,2

Die Zugkraft verringert sich über die Höhe der Geschwindigkeit (ZV-Diagramm), wodurch sich bei höherer Geschwindigkeit geringere Beschleunigungen ergeben, die an dieser Stelle jedoch nicht näher aufgeschlüsselt werden.

Bremsvorgang

Für den Bremsvorgang werden im Zuge der Kapazitätsermittlung (SBB/ÖBB) ebenfalls Zeitmehraufandswerte einheitlich zur Fahrtzeit der Züge eingerechnet. Für den Bremsvorgang mittels RailSys sind für jede Zuggattung spezifisch folgende Bremsverzögerungen festgelegt worden:

Tabelle 17 – Bremsvorgänge – RailSys

Zuggattung	Bremsung [m/s ²]
railjet	-0,6
IC	-0,6
REX	-0,6
S-Bahn	-0,7
Güterzug	-0,3

Sonstige Eingangsparameter

Zur vollständigen Aufschlüsselung werden an dieser Stelle auch jene Eingabeparameter (RailSys) nochmals aufgelistet, die für den Abgleich der Modelle herangezogen werden:

Tabelle 18 – weitere Einflussgrößen – RailSys

	Parameter	Größe
Wird nicht variiert	Zugmix II	---
	Geschwindigkeitsspanne	80-230 km/h
	Vorsignalabstand (L _V)	1,6 km*
	Blocklänge (L _B)	2,5 km
	Fahrzeitzuschlag	10 %
Wird variiert	Pufferzeit	1-3 min
	Streckenlänge	7,5/15/22,5 km

*Ab einer Geschwindigkeit von 160 km/h findet die Führerstandssignalisierung Berücksichtigung.

6.3.2 Ergebnisse des Abgleichs

Vergleichsmethode nach Richtwerten des UIC Kodex

Mittels der Betriebssimulationssoftware werden unter Komprimierung der Zugtrassen (laut UIC-Kodex) für die Streckenlängen von 7,5 und 22,5 km Sättigungsgrade durch Zugabe beziehungsweise Reduktion von Güterzugtrassen innerhalb des Zugmix II ermittelt.

Tabelle 19 – Trassenverteilung und Sättigungsgrade

Streckenlänge	Trassen im Zugmix/Stunde	Trassenverteilung		Sättigungsgrad
		Personenzüge	Güterzüge	
7,5 km	12	7	5	0,65
	11	7	4	0,53
22,5 km	9	7	2	0,7
	8	7	1	0,56

Aus den Zugzahlen/h/Richtung, den ermittelten Sättigungsgraden und dem UIC-Richtwert können die maximalen Zugzahlen/18h/Richtung für die jeweiligen Längen zwischen Überholvorgängen errechnet werden.

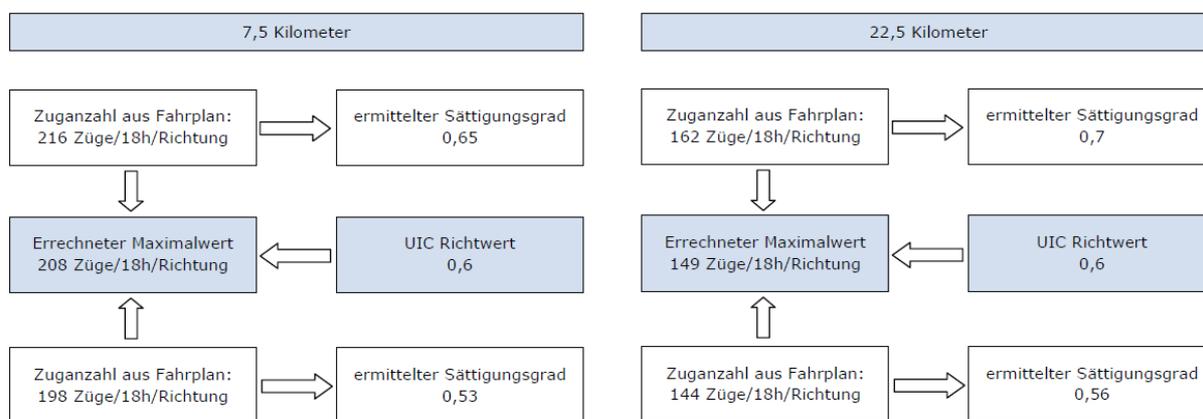


Abbildung 31 – Maximale Zugzahlen laut UIC-Richtlinie

Anzumerken ist an dieser Stelle, dass die UIC-Richtlinie auch die Beschränkung der Kapazität durch Knoten berücksichtigt. Die Richtwerte sind aus diesem Grund für eine reine Betrachtung der Streckenkapazitäten zu niedrig angesetzt. Demnach wird der Kapazitätsabgleich in weiterer Folge über die Komprimierung der Pufferzeit und der

Variation der Streckenlänge durchgeführt. Um die Betriebsqualität bei den Auswertungen sicherzustellen, wird an der Fahrzeitreserve von 10% festgehalten.

Abgleich der Kapazitätsermittlungen

Für den Abgleich der Modelle werden die Züge des Zugmix auf die gewählte Pufferzeit (1 bis 3 min) reduziert und je nach verbleibender Zeitreserve zusätzliche Güterzugtrassen eingesetzt. Dies erfolgt ebenfalls mit der UIC-Komprimierungsmethode mit dem Unterschied, dass die definierte Pufferzeit zwischen den verkehrenden Zügen eingehalten wird. Bei einem nicht ausreichend großen Zeitfenster werden die Zugtrassen anteilmäßig nach Zugmix aus dem Zeitraum genommen. Folgende Werte haben sich über einen Zeitraum von 18 Stunden aus diesem Abgleich ergeben:

Tabelle 20 – Abgleich der Kapazitätsermittlungen

Abgleich der Kapazitätsermittlungen					
Streckenlänge	Pufferzeit	SBB/ÖBB -Modell	Komprimierung über RailSys	Differenz (Absolut)	Differenz (Prozent)
7,5 km	1 min	254	254	0	0,00%
	2 min	206	210	-4	-1,94%
	3 min	173	179	-6	-3,47%
15 km	1 min	220	225	-5	2,27%
	2 min	182	186	-4	-2,20%
	3 min	156	164	-8	-5,13%
22,5 km	1 min	191	195	-4	-2,09%
	2 min	162	161	1	0,62%
	3 min	141	140	1	0,62%

Korrelationsanalyse

Einen statischen Vergleich der Modelle bietet eine Korrelationsanalyse, wobei der Korrelationskoeffizient den Zusammenhang der Modelle beschreibt.

Der ermittelte Korrelationskoeffizient $r=0,9959$ kann wie folgt eingeordnet werden:

Tabelle 21 – Aufschlüsselung – linearer Zusammenhang

0	Kein Zusammenhang
1	Hundertprozentiger Zusammenhang

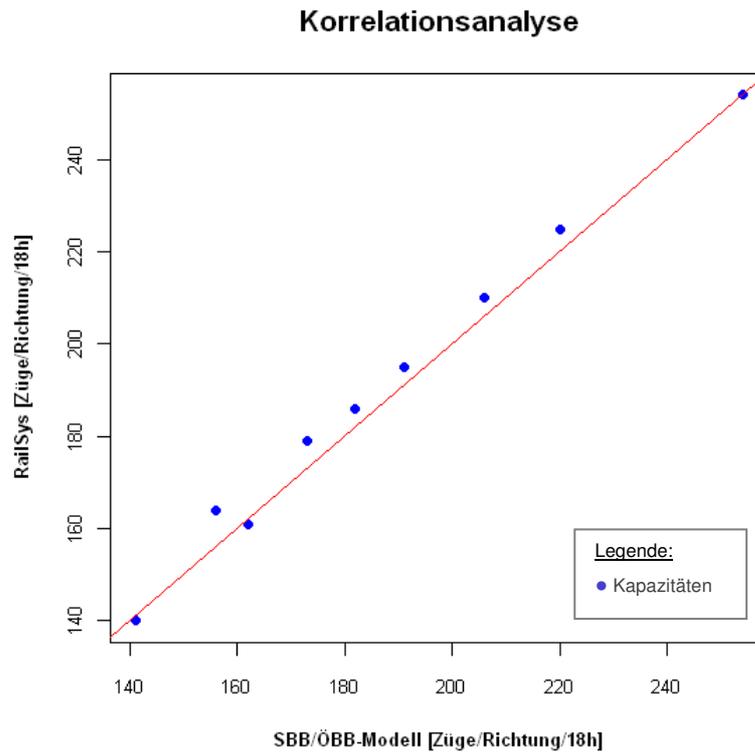


Abbildung 32 – Modellabgleich: Korrelationsanalyse

Demnach ist erwiesen, dass das fahrplanfreie Modell trotz Vereinfachungen bei reiner Betrachtung der Streckenkapazitäten sehr nahe an die Ergebnisse der Betriebssimulation kommt. Daraus kann geschlossen werden, dass die ermittelten Ergebnisse des SBB/ÖBB Modells „realitätsnahe“ sind und sich das Modell für weitere Analysen der Einflussgrößen eignet.

7 Variationsanalyse

7.1 Auswertungen der Analyse

Die Analysen erfolgen unter Ermittlung der möglichen Zugzahlen unter Abänderungen der Ausprägungen der Einflussfaktoren in Kombination mit der Anhebung/Senkung von Höchstgeschwindigkeiten. Zu diesem Zweck wird jeder Einflussfaktor vorab separat unter Anhebung der Geschwindigkeiten im Personenfernverkehr und in weiterer Folge unter Anhebung der Güterzuggeschwindigkeiten analysiert, um die Auswirkungen der Geschwindigkeitserhöhungen im Personen- und Güterverkehr aufzuschlüsseln. Die Auswertungen erfolgen separat für die gewählten Zugmixe, wobei diese unter denselben Voraussetzungen durchgeführt werden, um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen.

Bei den nachstehend angeführten Diagrammen und den Interpretationen stehen allgemeine Aussagen zur Größenordnung von Einflüssen der Einflussfaktoren im Vordergrund. Bei detaillierterem Eingehen auf die ermittelten Kapazitätswerte wird meist auf die, in der Arbeit durchgehend beibehaltenen, Streckenlängen zwischen Überholvorgängen von 15 und 22,5 Kilometern eingegangen. Diese Streckenlängen sind auch jene, die für die schrittweise Erhöhung von Geschwindigkeiten im Personenfernverkehr (siehe Auswertungen zur „Geschwindigkeitsschere“) herangezogen werden und demnach durchgehende Vergleichswerte bieten sollen.

7.1.1 Halte

Wie bereits in Kapitel 5.3.2 angeführt, können über die Beeinflussung von Halten auf die Kapazität kaum allgemein gültige Aussagen getroffen werden, da eine Betrachtung von mehreren Zugfolgen notwendig ist und das einer Betrachtung im Einzelfall bedarf. Um dennoch eine Aussage über die Beeinflussung der S-Bahn-Halte treffen zu können, wird von dem für die Ermittlung der Kapazitäten mittels der Betriebssimulation erstellten Fahrplan (Zugmix II) ausgegangen, wobei für diese Analyse der Fahrplan jeweils einen Halt der S-Bahn von 60 Sekunden in Abständen von 7,5 Kilometern vorsieht. Um eine vergleichbare Grundlage zu schaffen, erfolgt eine Darstellung der Sperrzeitentreppen mit und ohne Halte der S-Bahnen. Ausgegangen wird hierbei von Höchstgeschwindigkeiten des IC von 200 km/h und des railjet von 230 km/h. Anzumerken ist, dass die Halte in diesem Fall nicht auf freier Strecke stattfinden, Überholen grundsätzlich möglich wäre, dies jedoch eine weitere detailliertere Analyse (Behinderung weiterer Züge) erfordert und demnach hier nicht berücksichtigt wird.

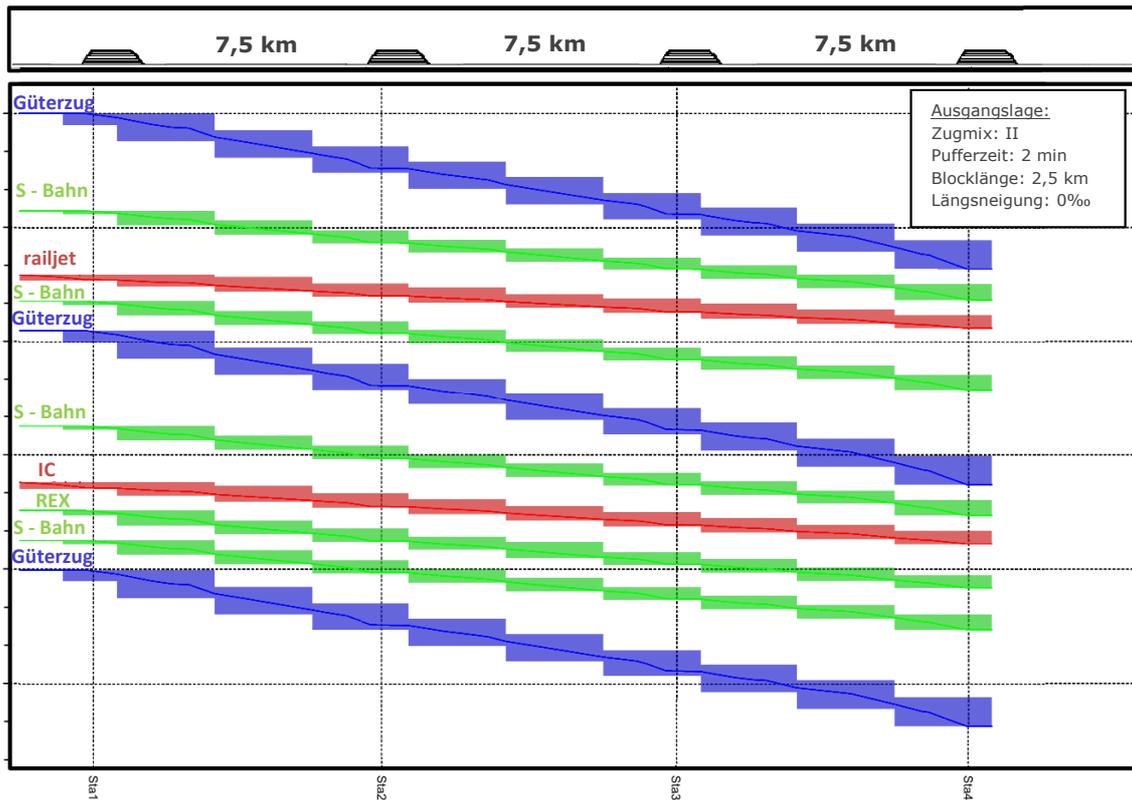


Abbildung 33 – Fahrplan ohne Halt der S-Bahn

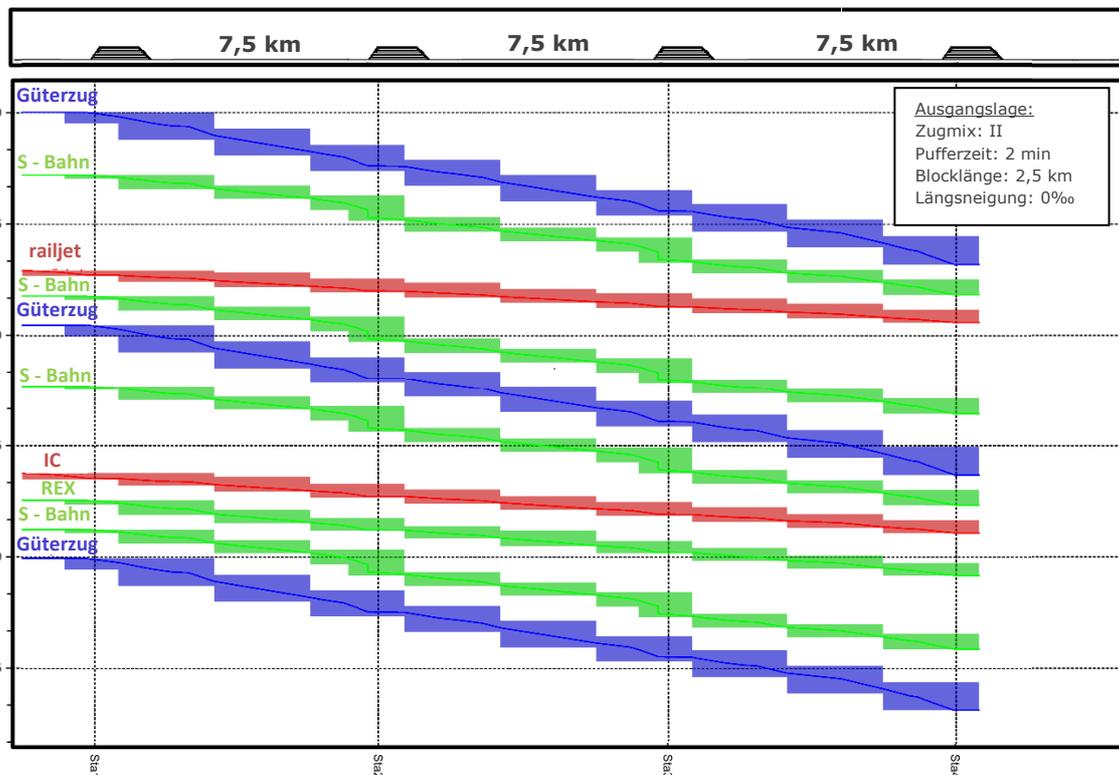


Abbildung 34 – Fahrplan mit Halt der S-Bahn

Der Vergleich der Abbildungen 33 und 34 zeigt, dass bei einem Halt der S-Bahn von 60 Sekunden weder bei einer Länge zwischen Überholvorgängen von 15 noch bei 22,5 Kilometern Zeitverluste zu verzeichnen sind. Es handelt sich hierbei jedoch nicht um eine allgemein gültige Aussage, sondern lediglich um eine Aussage bei dieser für die Kapazitätsermittlungen herangezogenen definierten Zugfolge.

Zu Zeitverlusten kommt es, wenn eine S-Bahn zwischen zwei Personenfernverkehrszügen verkehrt und neben der Pufferzeit keine „freie“ Zeit zwischen den verkehrenden Zügen im Fahrplan vorliegt. Diese Zeitverluste entsprechen dann jeweils der Dauer des Halts und den Zeitverlusten durch den Beschleunigungs- und Bremsvorgang. Inwieweit diese Zeitverluste Auswirkung auf die Kapazität haben hängt von der Häufigkeit des Auftretens ab.

Bei Anhebung der Güterzuggeschwindigkeiten und Halten der S-Bahn kann es bei Halt ohne Überholvorgänge zu Zeitverlusten und in weiter Folge zu Kapazitätsverlusten kommen. Zudem muss angemerkt werden, dass bei der Zugfolge Güterzug–S-Bahn–Güterzug ein Halt kapazitätsfördernd sein kann. Fest steht jedenfalls, dass eine Betrachtung im Einzelfall für eine genaue Aussage vorliegen muss.

7.1.2 Pufferzeit

Anhebung der Geschwindigkeit des Personenfernverkehrs

Hierbei erfolgt eine Beschleunigung des Personenfernverkehrszuges railjet von 160 km/h auf 230 km/h und des IC ebenfalls von 160 km/h auf dessen Höchstgeschwindigkeit von 200 km/h. Die Auswertung des Einflusses der Pufferzeit wird demnach jeweils für die Geschwindigkeitsspreizungen 80–160 km/h und 80–230 km/h mit einer, zwei und drei Minuten Pufferzeit zwischen verkehrenden Zügen dargestellt. Dies erfolgt unter Betrachtung verschiedener Längen zwischen Überholvorgängen (Streckenlängen), wodurch wiederum Aussagen über den Einfluss der Geschwindigkeitsschere getroffen werden können. Die Kapazitätsermittlungen erfolgen jeweils separat für den Zugmix I und den Zugmix II.

Zugmix I

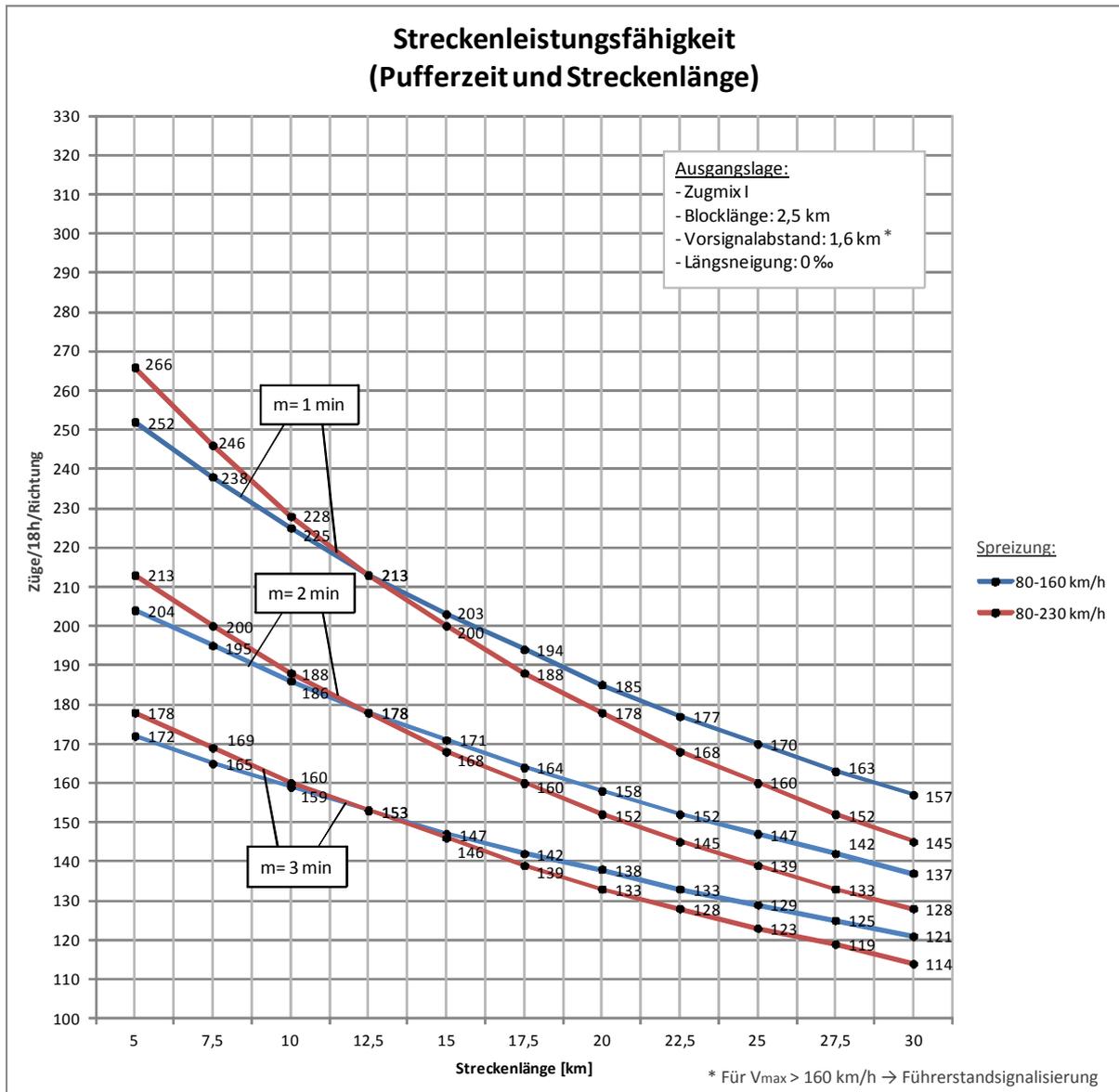


Abbildung 35 – Streckenleistungsfähigkeit – Pufferzeit – Anhebung von V_{Pers} (Mix: I)

Die Auswertung zeigt, dass die Kapazität massiv von der Geschwindigkeitsschere beschränkt wird, die von der betrachteten Streckenlänge *und* den Geschwindigkeiten der verkehrenden Zuggattungen abhängt, wobei diese unterschiedlich großen Einfluss haben. Bei Erhöhung der Streckenlängen zwischen Überholvorgängen sind durchgehend höhere Kapazitätsverluste zu verzeichnen, als es bei der Spreizung der ermittelten Kapazitäten durch Erhöhung der Personenzuggeschwindigkeiten der Fall ist. In Zahlen bedeutet das, dass bei einer Länge zwischen Überholvorgängen von 15 Kilometern eine Kapazität von 171 Zügen/Richtung/18 Stunden (m=2 min) vorhanden ist und bei einer Länge von 22,5 Kilometern eine Kapazität von 152 Zügen/Richtung/18h (m=2 min) erzielt wird. Die

Differenz und somit der Kapazitätsverlust bei der längeren Strecke zwischen Überholvorgängen sind demnach 19 Züge bei einer Höchstgeschwindigkeit von 160 km/h im Zugmix I. Bei der dargestellten Erhöhung der Geschwindigkeit auf 230 km/h ergibt sich durch die höheren Geschwindigkeiten im Personenfernverkehr bei einer Streckenlänge von 15 km ein Kapazitätsverlust von 3 Zügen/Richtung/18 Stunden. Bei 22,5 km Streckenlänge beträgt der Verlust 7 Züge/Richtung/18 Stunden. Das Ergebnis aus den ermittelten Kapazitätsergebnissen ist, dass die Länge zwischen Überholvorgängen wesentlich größeren Einfluss auf die Kapazität hat, als die Erhöhung der Geschwindigkeiten einzelner Züge innerhalb eines Zugmix.

Bei kleinen Längen zwischen Überholvorgängen tritt jener Fall ein, dass bei Geschwindigkeitserhöhungen der Personenfernverkehrszüge auf 230 km/h trotz größer werdender Geschwindigkeitsschere eine höhere Kapazität erzielt wird, als bei kleineren Höchstgeschwindigkeiten (hier 160 km/h). Dieser Effekt ist auf den hohen Anteil an Personenfernverkehrszügen (50%) im Zugmix I zurückzuführen, da die Sperrzeiten der Blockabschnitte bei höheren Geschwindigkeiten verkürzt werden und ein früheres Folgen hintereinander fahrender Züge möglich gemacht wird. Bei kürzeren Streckenlängen ist dieser, für die Kapazität „positiver“, Einfluss größer als der Verlust der Kapazität durch die größer werdende Geschwindigkeitsschere.

Durch Verringerung der Pufferzeit von drei auf zwei Minuten kann bei einer Ausgangshöchstgeschwindigkeit von 160 km/h und einer Streckenlänge von 15 km ein Kapazitätsgewinn von 24 Zügen/Richtung/18 Stunden erzielt werden. Bei einer Verkleinerung von zwei Minuten auf eine Minute Pufferzeit ist ein Gewinn von 22 Zügen/Richtung/18 Stunden möglich. Es kann demnach der Schluss gezogen werden, dass die Pufferzeit einen wesentlich größeren Einfluss auf die Kapazität hat als die Anhebung der Personenzuggeschwindigkeiten, deren Einfluss als verhältnismäßig gering eingeschätzt werden kann. Die Pufferzeit verliert jedoch bei längeren Streckenlängen zwischen Übervorgängen an Bedeutung, da die längere Strecke die Kapazität einschränkt und die Pufferzeit damit weniger Anteil an der Zugfolgezeit hat. Daraus ergibt sich, dass der Einfluss der Pufferzeit umso größer ist, je höher die Anzahl der verkehrenden Züge auf dem Streckenabschnitt über einen definierten Zeitraum ist.

Eine Verkürzung der Pufferzeit auf eine Minute über einen Tageszeitraum von 18 Stunden, wie in der Abbildung 35 angeführt, ist jedoch nur theoretisch möglich, da die „Betriebsqualität“ nicht mehr gewährleistet wäre.

Zugmix II

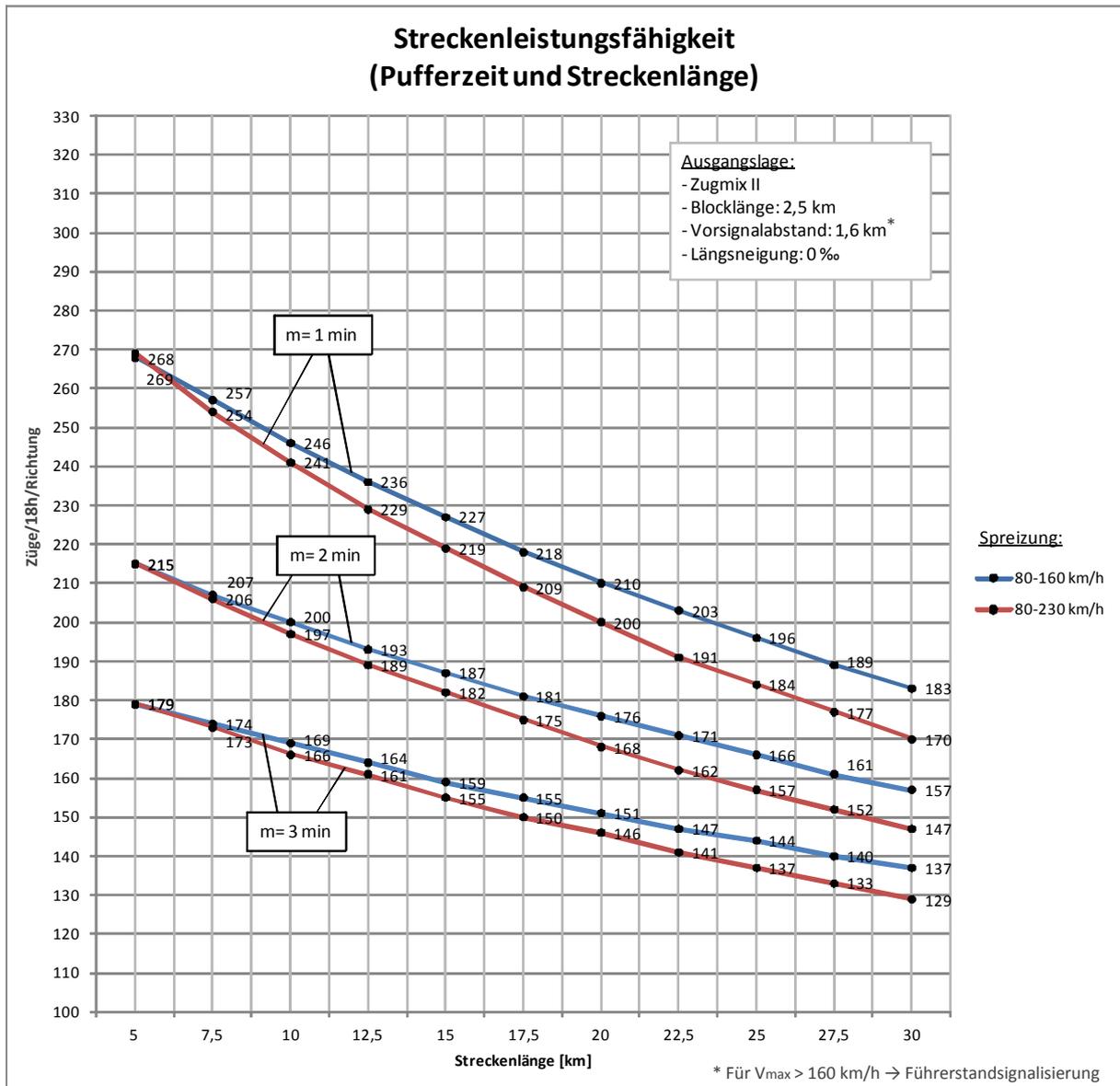


Abbildung 36 – Streckenleistungsfähigkeit – Pufferzeit – Anhebung von V_{Pers} (Mix: II)

Die Auswertung des Zugmix II zeigt ein ähnliches Ergebnis über die Größenordnung des Einflusses der einzelnen Faktoren wie jene des Zugmix I. Zudem ist ersichtlich, dass aufgrund des geringeren Anteils an Personenfernverkehrszügen im Vergleich zu den Auswertungen zum Zugmix I bei Erhöhung der Geschwindigkeiten von 160 km/h auf 230 km/h keine höheren Kapazitäten erzielt werden. Ein Vergleich beider Auswertungen (Zugmix I und II) ergibt, dass die Pufferzeit und die Streckenlänge unabhängig von der Mischung an verkehrenden Zuggattungen großen Einfluss auf die Kapazität eines Streckenabschnitts haben.

Anhebung der Güterzuggeschwindigkeiten

Die beiden folgenden Abbildungen spiegeln die Kapazitätsgewinne, beziehungsweise den Verlust von Kapazität, unter der Betrachtung der Pufferzeit bei Anhebung der Güterzuggeschwindigkeiten von den derzeit gefahrenen 80 km/h auf bis zu 120 km/h wider. Der Personenfernverkehr verkehrt mit erhöhten Geschwindigkeiten, wobei die ICs eine Höchstgeschwindigkeit von 200 km/h besitzen und der railjet mit 230 km/h verkehrt.

Zugmix I

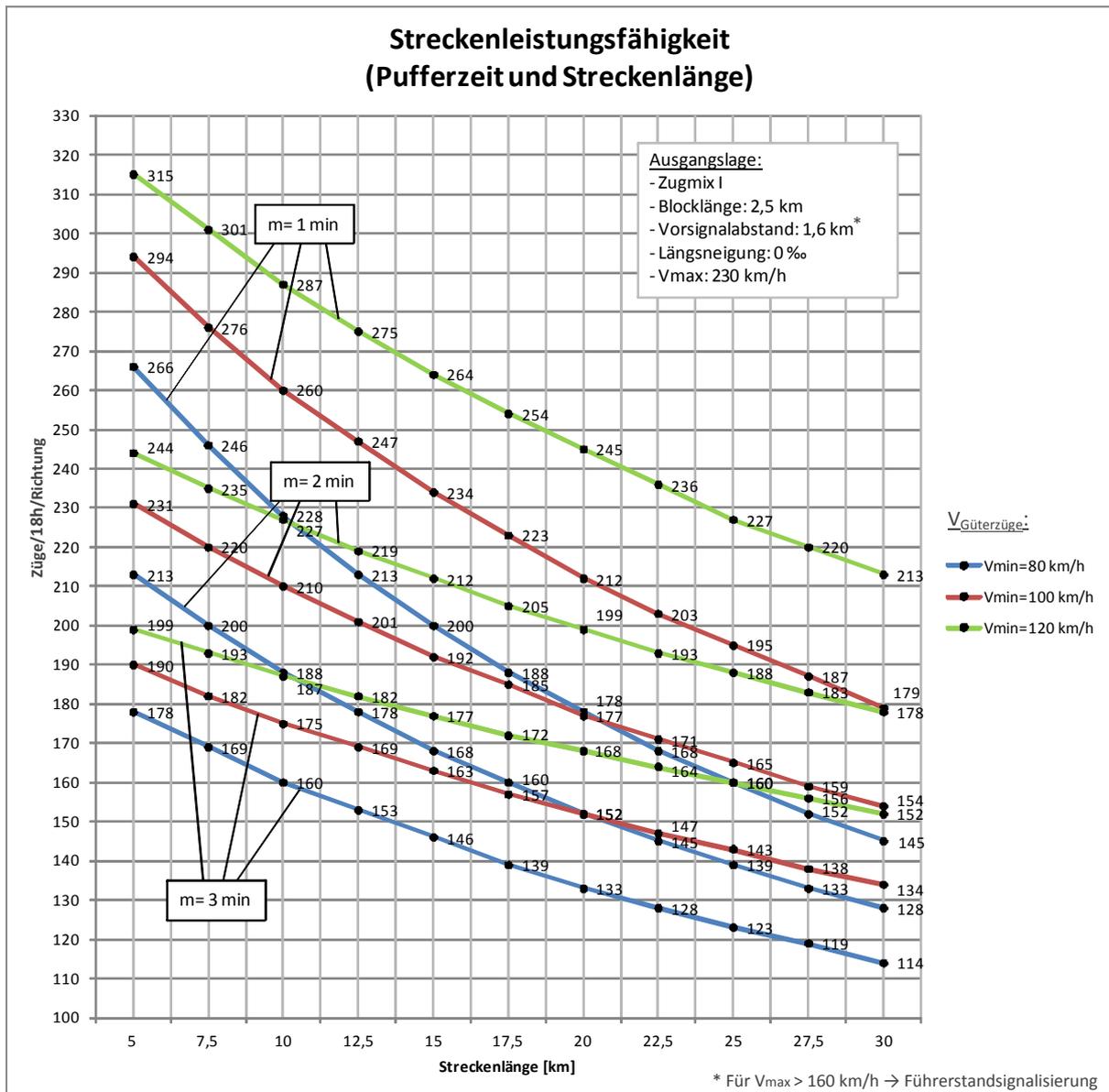


Abbildung 37 – Streckenleistungsfähigkeit – Pufferzeit – Anhebung von V_{Güterzüge} (Mix: I)

Die Abbildung 37 veranschaulicht, dass bei Anhebung der Güterzuggeschwindigkeiten mit hohen Kapazitätsgewinnen zu rechnen ist. Man sieht, dass durch die Erhöhung der Güterzuggeschwindigkeiten von 80 km/h auf 100 km/h bei einer Streckenlänge von 15 km ein Kapazitätsgewinn von 24 Zügen/Richtung/18 Stunden (Pufferzeit: 2 min) vorliegt. Bei einer Erhöhung ausgehend von 80 km/h auf 120 km/h ist sogar eine Erhöhung der Kapazität um 44 Züge (Pufferzeit: 2 min) möglich. Bei einer Länge zwischen Überholvorgängen von 22,5 Kilometern sind ähnlich hohe Kapazitätsgewinne zu verzeichnen, was auf den hohen Anteil an Güterzügen (50 Prozent) im untersuchten Mix (Zugmix I) zurückzuführen ist.

Zugmix II

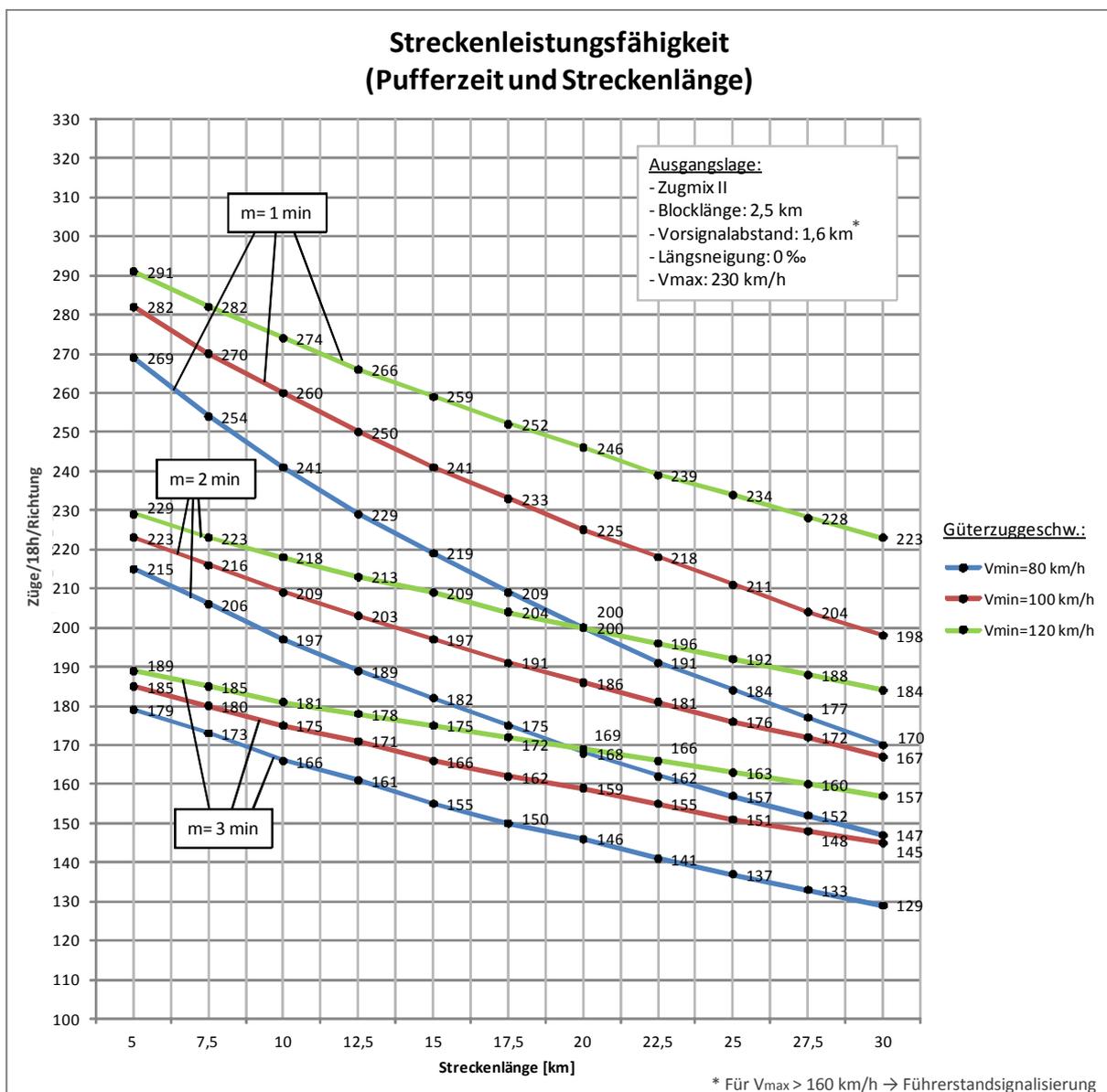


Abbildung 38 – Streckenleistungsfähigkeit – Pufferzeit – Anhebung von $V_{\text{Güterzüge}}$ (Mix: II)

Bei der Betrachtung des Zugmix II ist erkennbar, dass trotz verhältnismäßig geringer Anzahl an Güterzügen (zwei von neun Zügen) innerhalb des Zugmix die Güterzuggeschwindigkeit immer noch einen hohen Einfluss auf die Kapazität hat, wengleich diese an die Anzahl der verkehrenden Güterzüge gebunden ist. Bei einer Streckenlänge von 15 km beläuft sich der Kapazitätsgewinn bei Erhöhung der Güterzuggeschwindigkeiten von 80 auf 100 km/h auf 12 Züge/Richtung/18h. Bei Erhöhung auf 120 km/h beträgt dieser 27 Züge/Richtung/18h (alle Angaben bei einer Pufferzeit von 2 min). Nachvollziehbarer Weise ist dieser Einfluss umso größer, je höher der GV-Anteil im Zugmix ist.

Aus der Abbildung 38 kann entnommen werden, dass bei einer Streckenlänge von 20 km die Anhebung der Güterzuggeschwindigkeiten von 80 auf 120km/h etwa der Reduktion der Pufferzeit um eine Minute entspricht. Sollte angesichts der Berücksichtigung der Betriebsqualität eine Reduktion der Pufferzeit nicht möglich sein, kann durch die Erhöhung der Güterzuggeschwindigkeiten eine vergleichbar hohe Kapazitätssteigerung erzielt werden.

Anzumerken ist, dass bei den angeführten Kapazitätsgewinnen von einem Zugmix mit Höchstgeschwindigkeiten bis 230 km/h ausgegangen wird. Bei einem Mix aus Zügen mit einer Höchstgeschwindigkeit von 160 km/h würden die Kapazitätsgewinne noch höher ausfallen, da die Geschwindigkeitsschere bei annähernd gleich großen Geschwindigkeiten kleiner ist.

7.1.3 Blocklänge

Anhebung der Geschwindigkeit des Personenfernverkehrs

Diese Auswertungen erfolgen durch Variation der Blocklänge bei gleichbleibendem Vorsignalabstand. Ausgegangen wird, wie schon bei der Betrachtung des Einflussfaktors Pufferzeit, von einer Geschwindigkeitsspanne der verkehrenden Züge von 80–160 km/h, wobei sich bei Anhebung der Höchstgeschwindigkeiten im Personenfernverkehr eine Spanne von 80–230 km/h ergibt.

Zugmix I

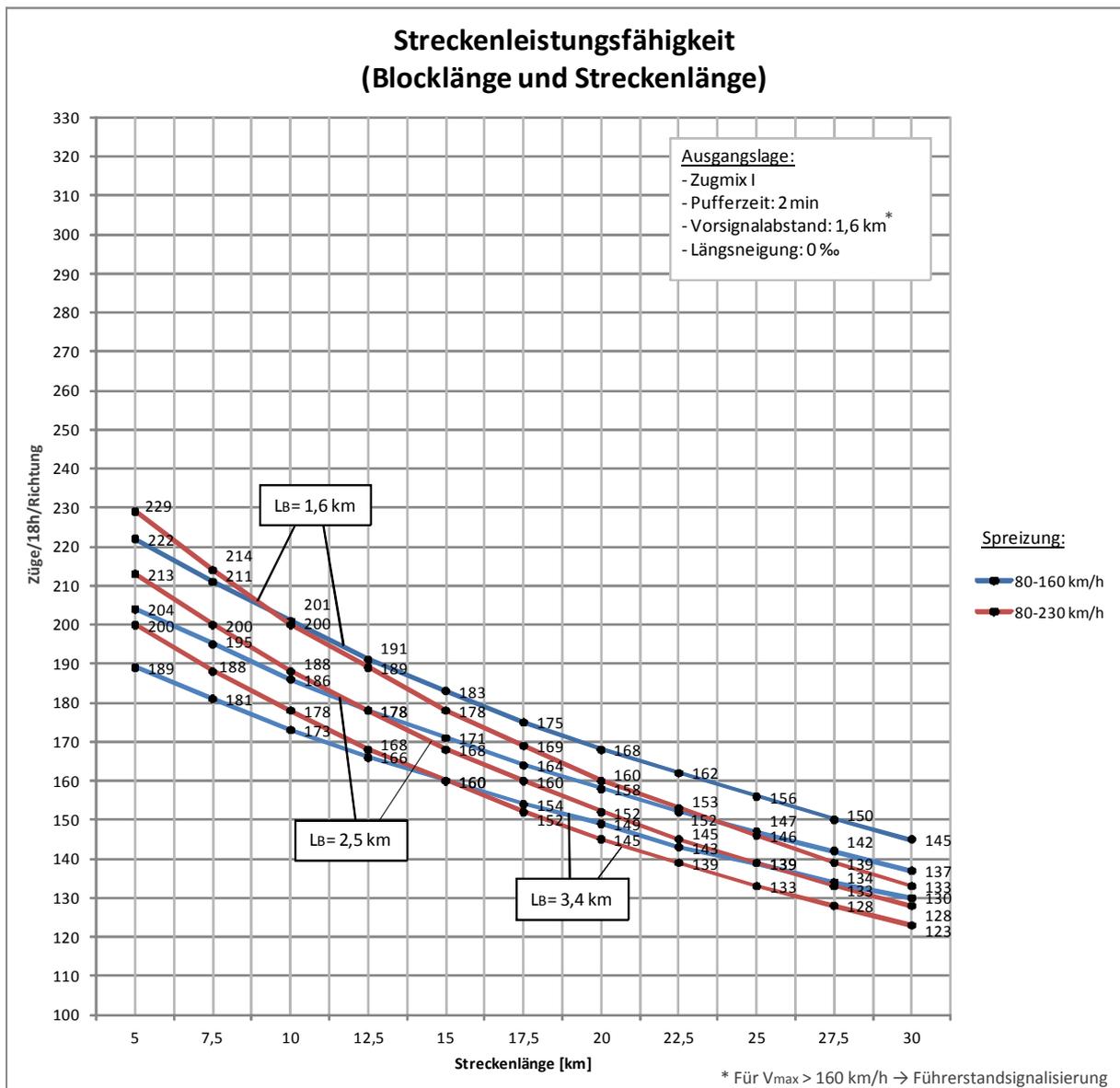


Abbildung 39 – Streckenleistungsfähigkeit – Blocklänge – Anhebung von V_{Pers} (Mix: I)

Die Betrachtung des Einflussfaktors Blocklänge bei gleichbleibendem Vorsignalabstand zeigt ein ähnliches Bild wie die Auswertungen über die Variation der Pufferzeit, wobei der Einfluss der Blocklänge wesentlich geringer ist als jener der Pufferzeit. Die Spanne in der sich die Kapazität ($V_{max}=160$ km/h, Zugmix I) bei dem gewählten Intervall (1,6–3,4 km Blocklänge) bewegt liegt zwischen 160 und 178 Zügen/Richtung/18 Stunden bei 15 km Streckenlänge und zwischen 139 und 153 Zügen/Richtung/18 Stunden bei Überholvorgängen, die alle 22,5 km stattfinden. Auch bei Anhebung der Geschwindigkeiten im Personenfernverkehr ändert sich die Größenordnung der Kapazitätsspanne in diesem Intervall nicht wesentlich. Ausgehend von der

durchschnittlichen Blocklänge von 2,5 Kilometern ist das Potential durch Verkürzung der Blocklänge eher gering.

Zugmix II

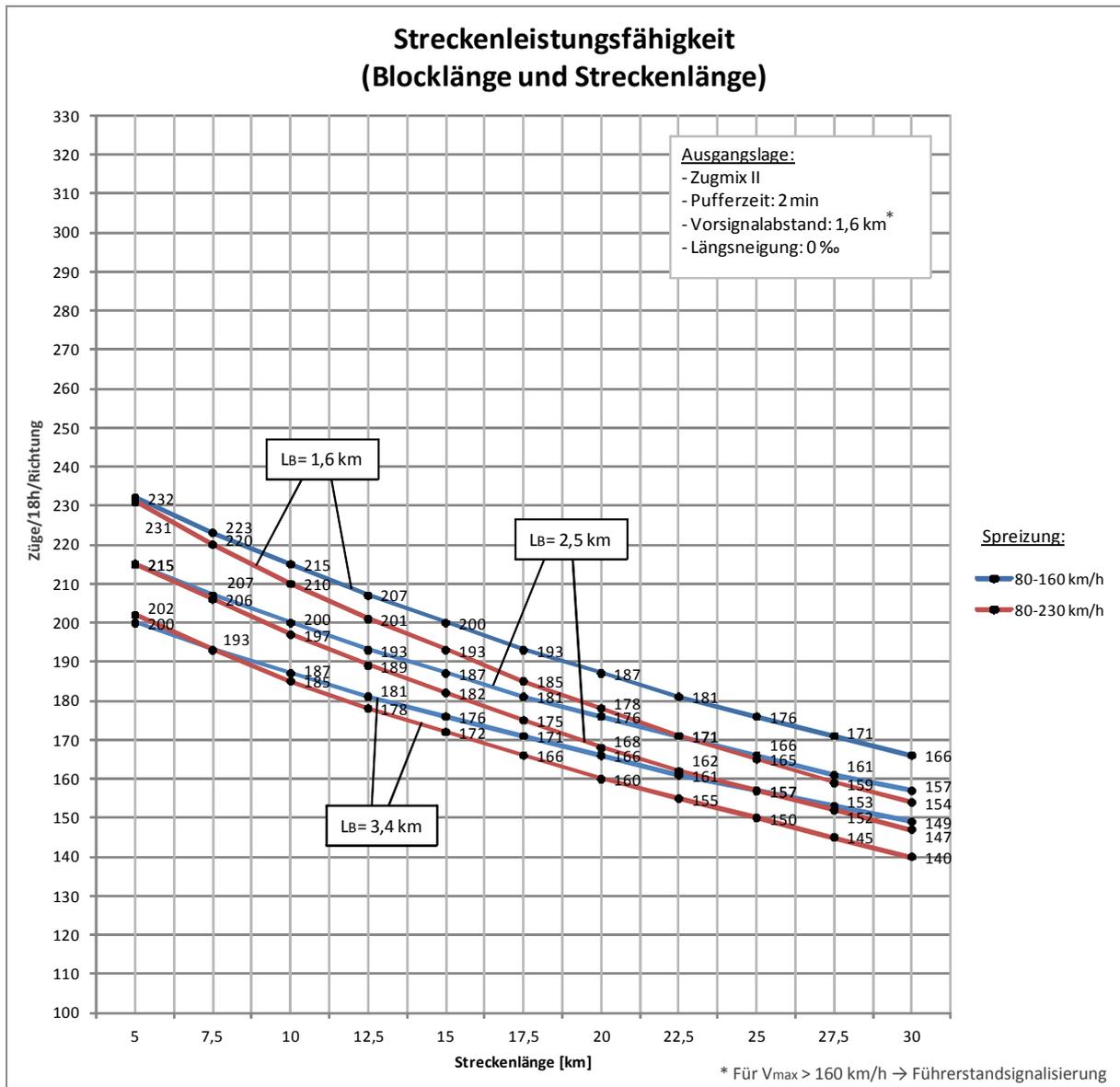


Abbildung 40 – Streckenleistungsfähigkeit – Blocklänge – Anhebung von V_{Pers} (Mix: II)

Die Analyse der Auswertung zum Zugmix II ergibt, dass die Kapazität bei einer Geschwindigkeitserhöhung des Personenfernverkehrs auf 230 km/h und einer Verkürzung der Blocklänge im Intervall von 0,9 km (von 3,4 auf 2,5 oder von 2,5 auf 1,6 km) jener Kapazität entspricht, die bei einer Ausgangsgeschwindigkeit von 160 km/h ohne

Verkürzung der Blocklänge erreicht wird. Daraus ergibt sich, dass der Kapazitätsverlust durch Erhöhung der Geschwindigkeiten durch die Verkürzung der Blocklängen kompensiert werden kann.

Anhebung der Güterzuggeschwindigkeiten

Zugmix I

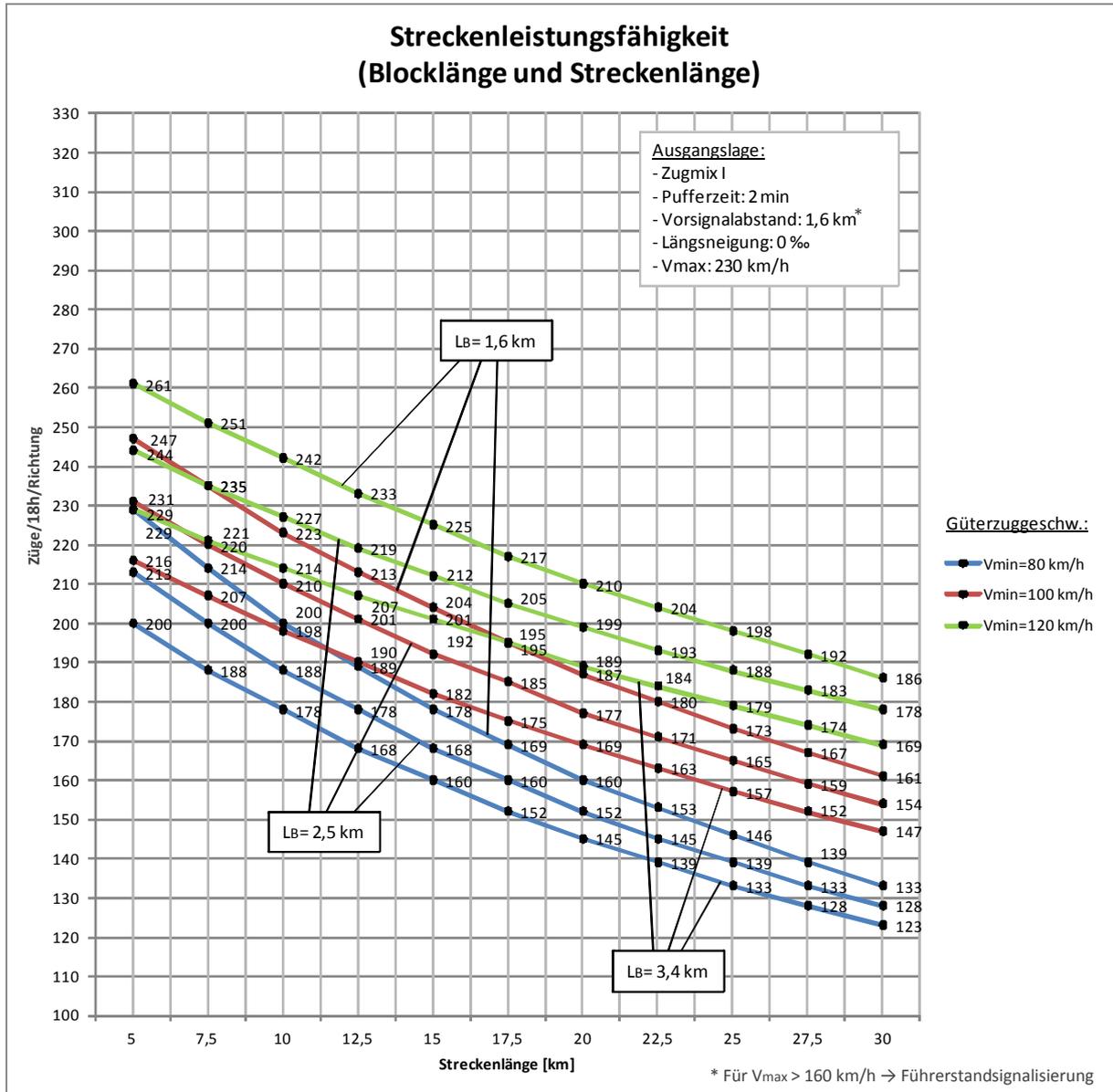


Abbildung 41 – Streckenleistungsfähigkeit – Blocklänge – Anhebung von V_{Güterzüge} (Mix: I)

Die Auswertungen zur Variation der Blocklänge unter Anhebung der Güterzuggeschwindigkeiten untermauern die zuvor gewonnene Erkenntnis über den hohen Einfluss der Güterzuggeschwindigkeiten auf die Kapazität. Der Abbildung 41 kann entnommen werden, dass der Einfluss der Güterzuggeschwindigkeiten mit der Streckenlänge stark zunimmt. Es wird zudem gezeigt, dass durch Anhebung der Güterzuggeschwindigkeit in jedem Fall höhere Zugzahlen erreicht werden können, als durch die Verkürzung von Blocklängen.

Zugmix II

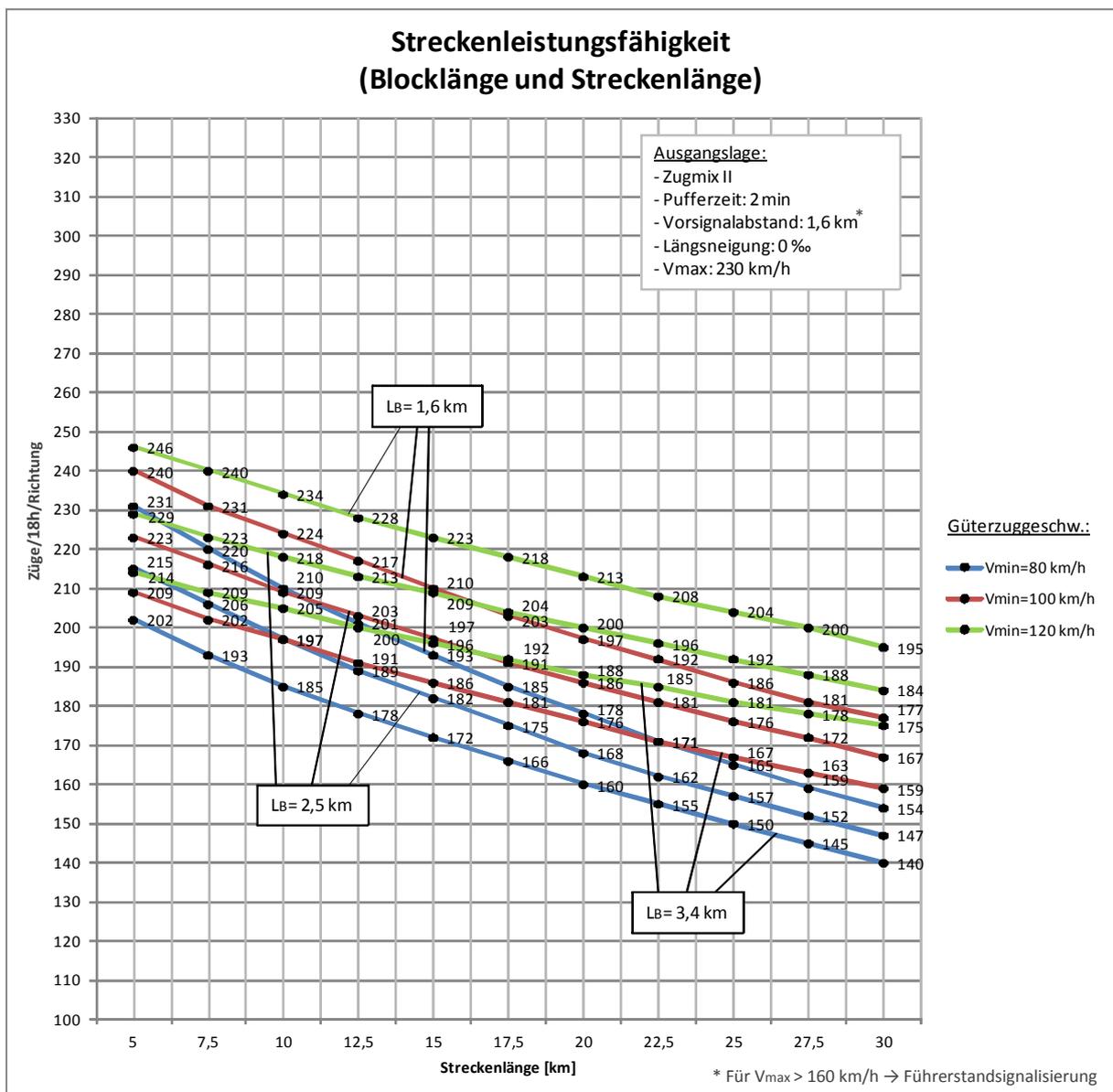


Abbildung 42 – Streckenleistungsfähigkeit – Blocklänge – Anhebung von V_{Güterzüge} (Mix: II)

7.1.4 Kombinierte Betrachtung der Blocklänge und Pufferzeit

Zusätzlich zur „Einzelbetrachtung“ der Einflussfaktoren werden nachfolgend noch zwei kombinierte Darstellungen der Einflussfaktoren Blocklänge und Pufferzeit angeführt, woraus sich der Einfluss der Parameter vergleichbar abbilden lässt.

Zugmix I

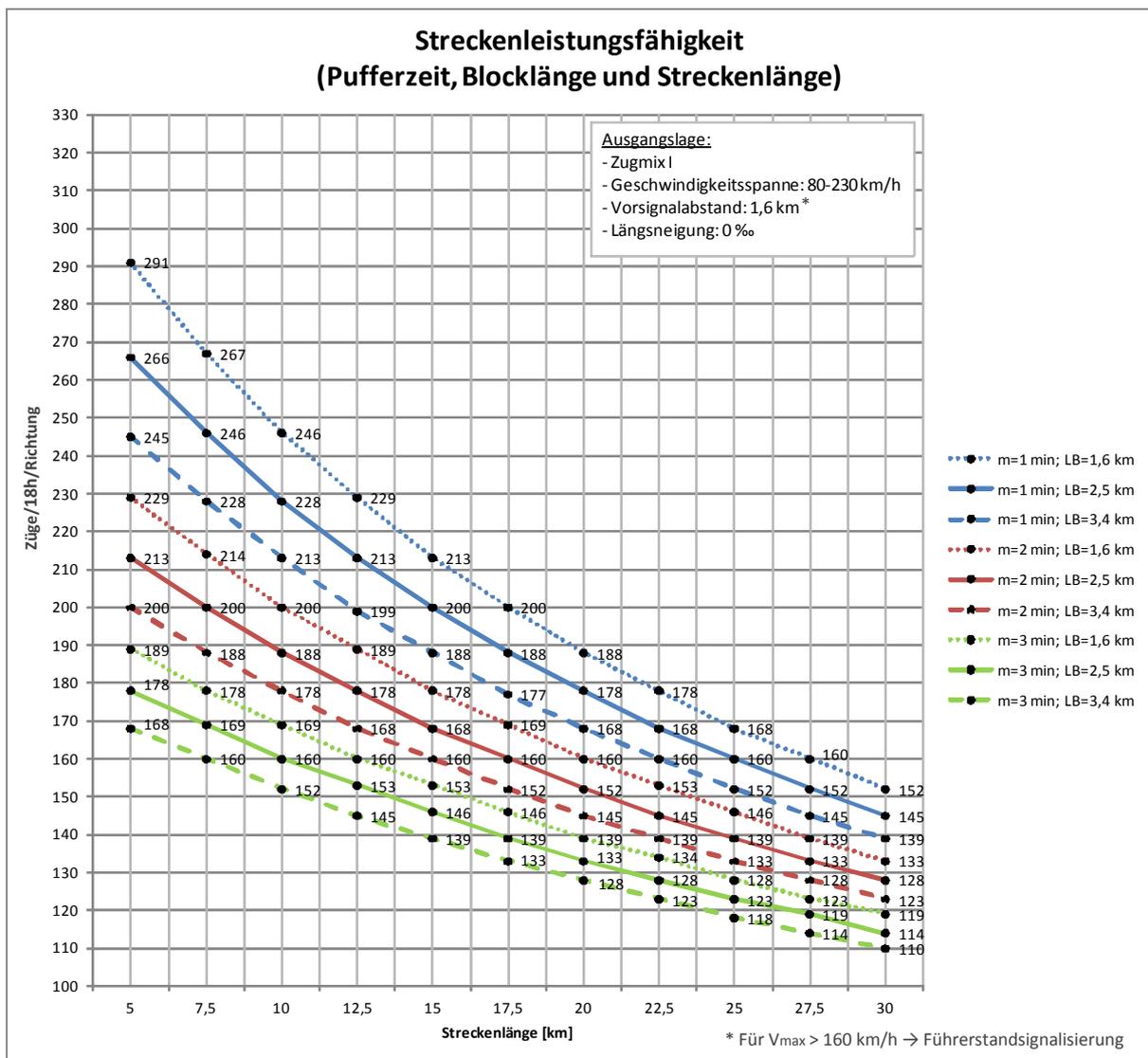


Abbildung 43 – Streckenleistungsfähigkeit – Pufferzeit und Blocklänge (Mix: I)

Zugmix II

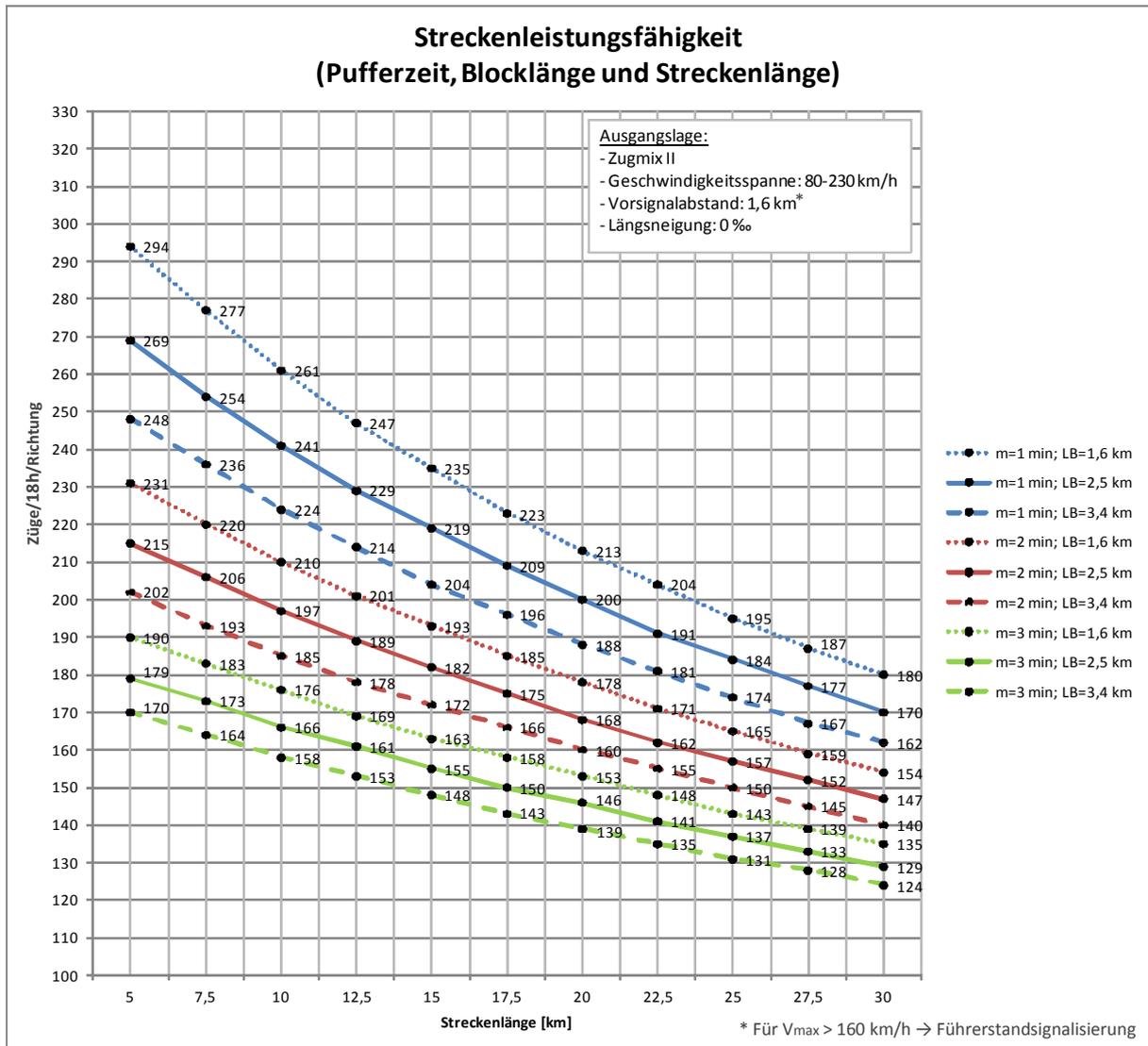


Abbildung 44 – Streckenleistungsfähigkeit – Pufferzeit und Blocklänge (Mix: II)

Aus der kombinierten Auswertung aus Pufferzeit und Blocklänge lässt sich ableiten, dass die Pufferzeit bei dem gewählten Intervall (1 bis 3 min) bei einheitlichem Vorsignalabstand unabhängig vom Zugmix größeren Einfluss auf die Kapazität hat als der Einflussfaktor Blocklänge. Aus der Auswertung kann der Schluss gezogen werden, dass, solange eine Reduktion der Pufferzeiten unter Berücksichtigung der Betriebsqualitätskriterien möglich gemacht werden kann, dies bei benötigter Kapazität in jedem Fall jenen Maßnahmen vorgezogen werden soll, die bauliche Veränderungen zur Erhöhung von Zugzahlen erfordern.

7.1.5 Längsneigung

Anhebung der Geschwindigkeit des Personenfernverkehrs

Die Auswertungen zur Längsneigung sind für die beiden Zugmixe jeweils separat für die Geschwindigkeitsspannen 80–160 km/h und 80–230 km/h dargestellt. Die Ermittlung der Zugzahlen erfolgt über den im Kapitel: „Grundlagen zum Rechenmodell und die Ausprägungen der Einflussfaktoren“ angeführten Zeitmehraufwand aufgrund eines verlängerten/verkürzten Brems- beziehungsweise Beschleunigungsvorganges.

Zugmix I

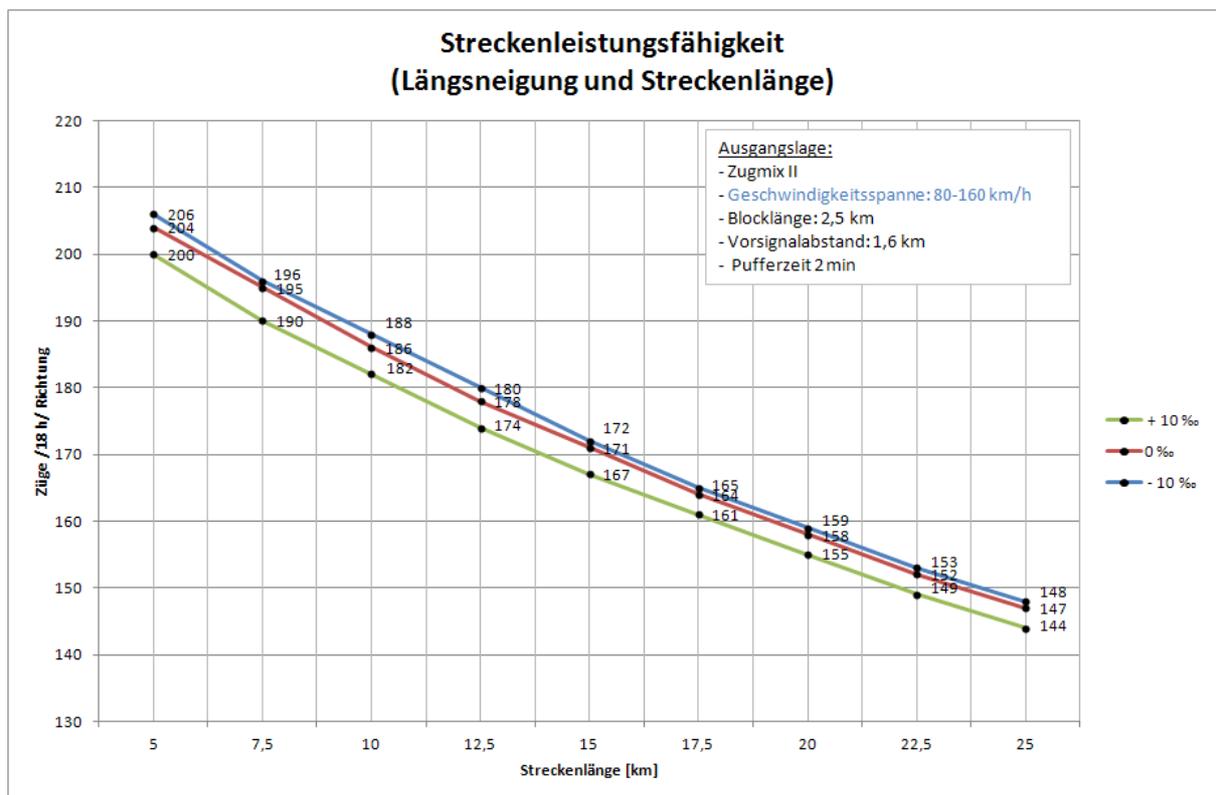


Abbildung 45 – Streckenleistungsfähigkeit – Längsneigung (Mix: I)

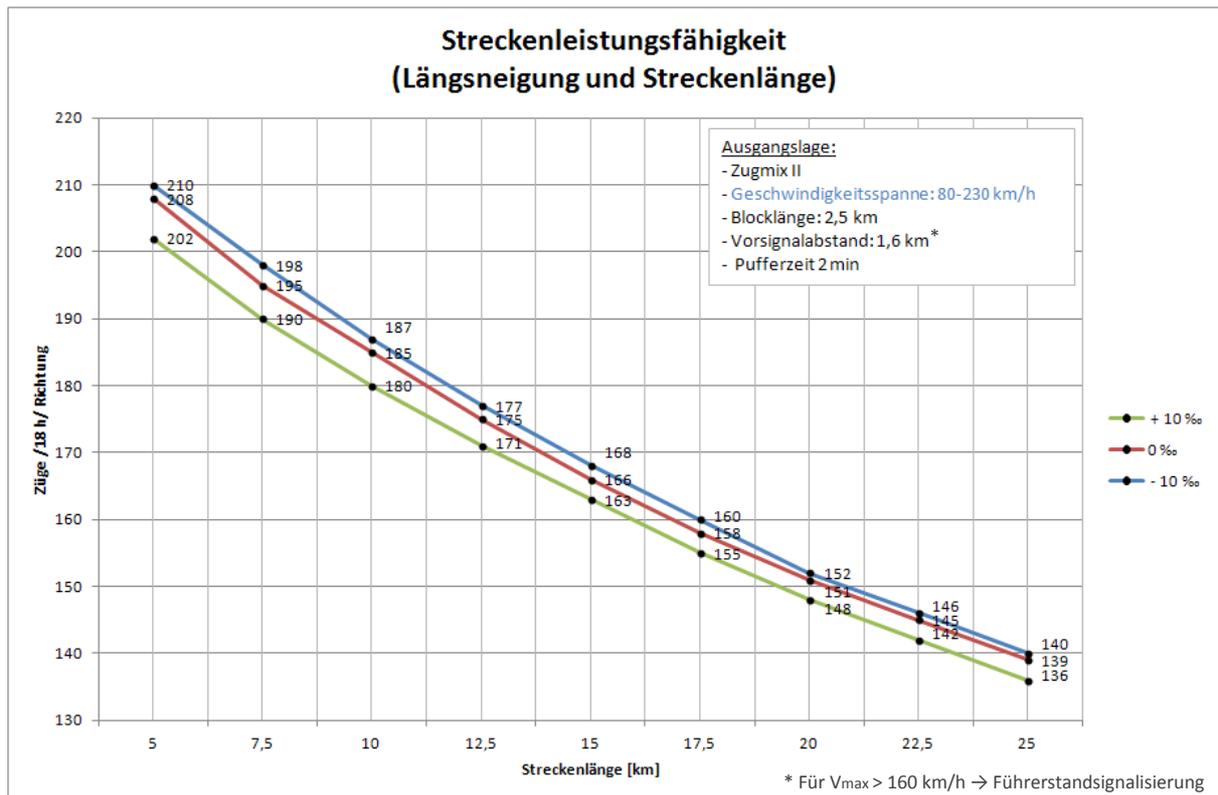


Abbildung 46 - Streckenleistungsfähigkeit – Längsneigung – Anhebung von V_{Pers} (Mix: I)

Die Längsneigung hat unabhängig von der Geschwindigkeitserhöhung kaum Einfluss auf die Kapazität, da diese ausschließlich bei Brems- und Beschleunigungsvorgängen einfließt. Sie pendelt sich ausgehend von einer Längsneigung von 0‰ unabhängig von der Höchstgeschwindigkeit der Zuggattungen auf ± 3 Züge/pro 18 Stunden (Zugmix I) ein, was im Gegensatz zur Bedeutung der anderen Einflussgrößen gering ist. Zudem suggerieren diese Ergebnisse zu hohe Kapazitätsgewinne/Kapazitätseinbußen, da bei Überholvorgängen aufgrund der Systemvereinfachung von einem Halt aller Züge am Überholbahnhof ausgegangen wird. Die ermittelten abweichenden Zugzahlen bei unterschiedlichen Streckenlängen und Geschwindigkeitserhöhungen von 160 auf 230 km/h lassen sich, wie auch bei den Auswertungen zuvor, auf die Geschwindigkeitsschere zurückführen. Anzumerken ist, dass bei Gefälle grundsätzlich höhere Kapazitäten erzielt werden, als bei steigenden Streckenabschnitten.

Zugmix II

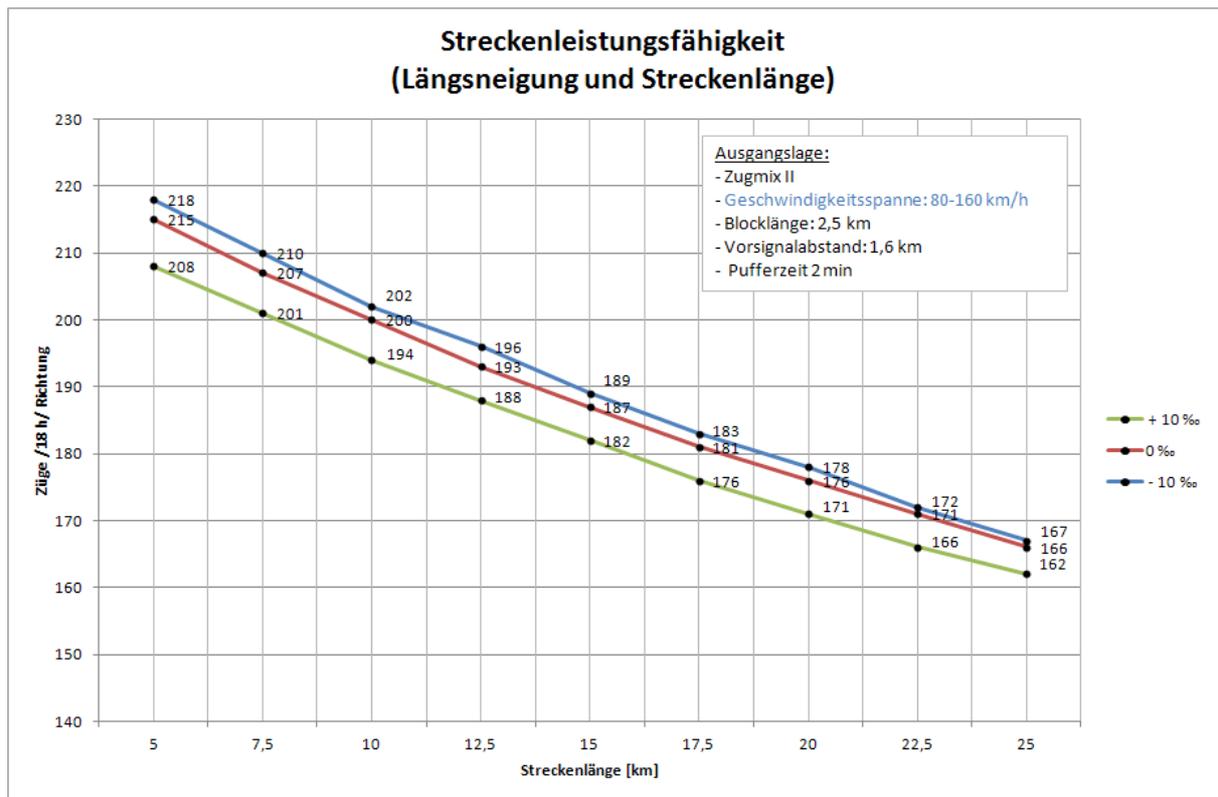


Abbildung 47 – Streckenleistungsfähigkeit – Längsneigung (Mix: II)

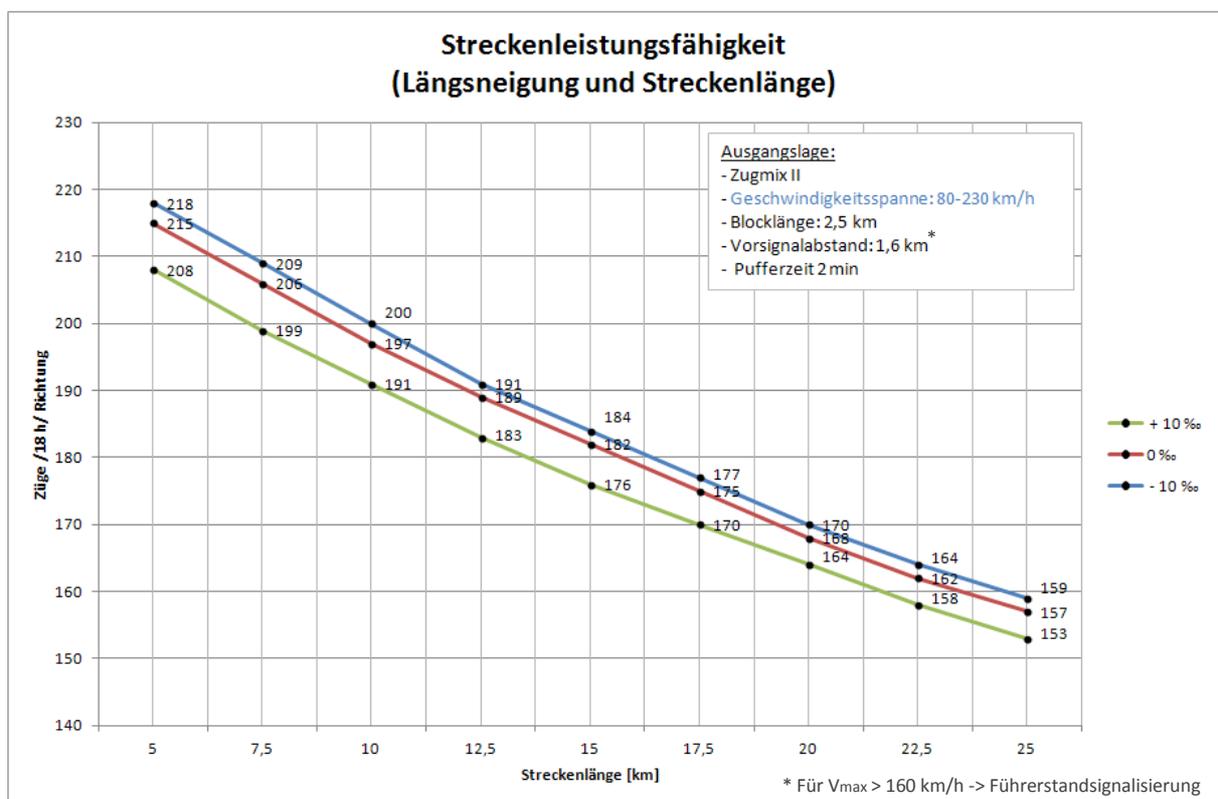


Abbildung 48 – Streckenleistungsfähigkeit – Längsneigung – Anhebung von V_{Pers} (Mix: II)

Anhebung der Güterzuggeschwindigkeiten

Aufgrund des geringen Einflusses der Längsneigung auf die Kapazität wird auf Auswertungen bei Anhebung der Güterzuggeschwindigkeit im Rahmen dieser Studie verzichtet.

7.1.6 Geschwindigkeitsschere

Durch die schrittweise Anhebung/Senkung der Geschwindigkeiten der Personenfernverkehrszüge (railjet und IC) wird der Verlust/die Steigerung der Kapazität aufgrund der größer/kleiner werdenden Geschwindigkeitsschere aufgezeigt, wobei hierfür Streckenlängen von 7,5; 15 und 22,5 Kilometern herangezogen werden.

Um die bestmögliche Aufschlüsselung des Einflusses der gefahren Höchstgeschwindigkeiten innerhalb eines Zugmix zu erreichen, werden die Auswertungen unter zwei verschiedenen Ausgangsgegebenheiten, die untereinander vergleichbare Ergebnisse liefern, durchgeführt.

- I Geschwindigkeitsschere bei durchschnittlichem Vorsignal- und Blockabstand (Variante 1)
- I Geschwindigkeitsschere bei Anpassung des Vorsignalabstandes an die Mindestlänge (Variante 2)

Es werden für die Höchstgeschwindigkeiten von 140 und 160 km/h zudem die Kapazitäten bei Verkürzung der Blocklänge auf die Mindestlänge von einem Kilometer angeführt, wobei in diesem Fall auch keine Führerstandssignalisierung benötigt wird.

Die weiteren Darstellungen sind wie folgt zu interpretieren:

- I Die Anzahl der Züge je Zuggattung innerhalb eines Zugmix sind in der Zeile „Züge“ angegeben, können den ebenfalls im Diagramm angeführten Geschwindigkeiten und Zuggattungen zugeordnet werden und bilden somit die Ausgangssituation der Auswertungsreihe. Die in einem separaten Kästchen angeführte Ausgangskapazität kann dieser Ausgangssituation zugeordnet werden und bietet eine Vergleichsbasis für die ermittelten Zugzahlen unter Anhebung/Senkung der Höchstgeschwindigkeiten.
- I Die Pfeile im Diagrammbereich stellen die schrittweise Änderung der Geschwindigkeiten der Zuggattungen dar. Im Detail bedeutet das, dass der nach

links gerichtete Pfeil die Anhebung der Geschwindigkeiten des Personenfernverkehrs (railjet und IC) und der nach rechts gerichtete Pfeil die Absenkung der Geschwindigkeiten der betroffenen Zuggattungen symbolisiert. Auswertungen zur Geschwindigkeitsklasse $V_{\max} = 250$ km/h bedeuten somit, dass die ICs und der railjets jeweils eine Höchstgeschwindigkeit von 250 km/h aufweisen, während bei den restlichen Zuggattungen die Höchstgeschwindigkeiten nicht angehoben werden und die Geschwindigkeiten je nach Basisdefinition beibehalten werden. Bei der Absenkung werden die Geschwindigkeiten der Zuggattungen, deren Höchstgeschwindigkeit über jener der Auswertung liegt auf die Höchstgeschwindigkeit der Auswertung herabgestuft.

- I Die Balken der Diagramme stellen die Zugzahlen bei Einhaltung eines Taktfahrplanes dar (Simulation über aneinandergereihte Stundenwerte).
- I Bei der Anzahl der Züge, die mittels einer Linie in Verbindung stehen, handelt es sich um die „absoluten“ Zugzahlen, die bei Komprimierung der Zugtrassen über einen Zeitraum von 18 Stunden mit einer Pufferzeit von zwei Minuten ohne Berücksichtigung eines Taktfahrplans gefahren werden können.
- I Die gelbe Linie zeigt die Anzahl der Züge pro Stunde innerhalb eines Zugmix an. Es kann somit aus den Abbildungen geschlossen werden, ab welcher Höchstgeschwindigkeit der gewählte Zugmix innerhalb einer Stunde nicht mehr gefahren werden kann.

Zugmix I

Geschwindigkeitsschere bei durchschnittlichem Vorsignal- und Blockabstand

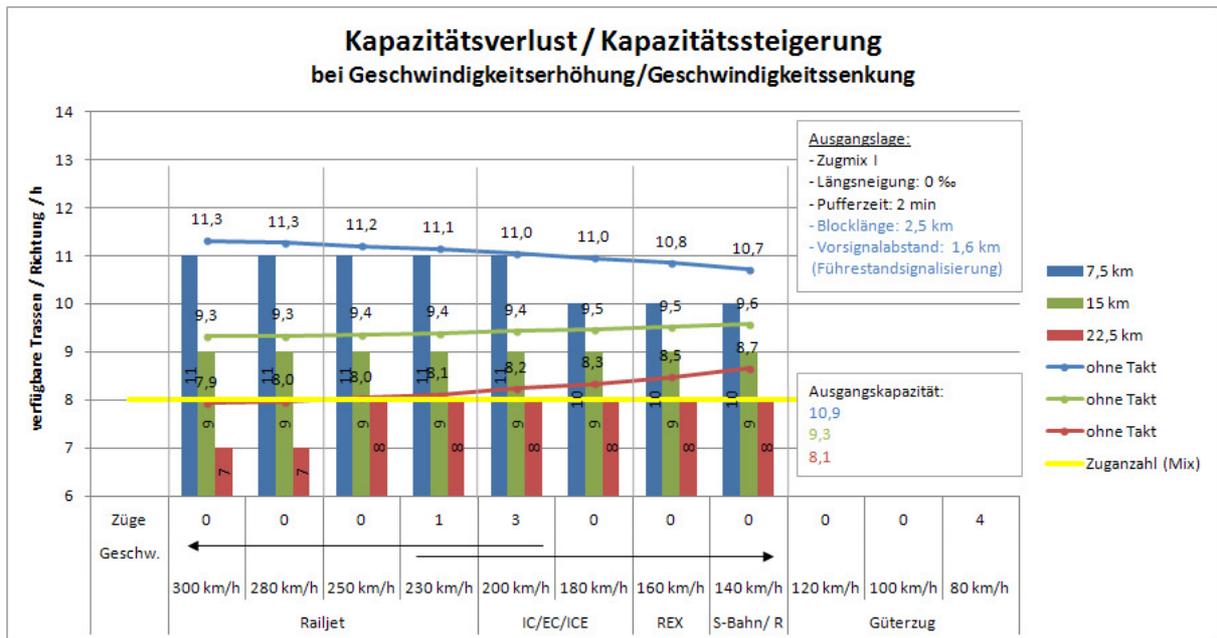


Abbildung 49 – Kapazitätsverlust/Kapazitätssteigerung – Variante 1 (Mix: I)

Aus der Abbildung 49 ist derselbe Effekt erkennbar, der bereits im Unterkapitel „Betrachtung des Einflussfaktors Pufferzeit“ beschrieben worden ist. Das bedeutet, dass bei kurzen Streckenlängen (hier mit 7,5 km) durch Erhöhung der Geschwindigkeiten der Personenfernverkehrszüge eine Erhöhung der Kapazität bewirkt werden kann. In diesem Fall führt das, ab einer Höchstgeschwindigkeit von 200 km/h, bei Berücksichtigung eines über Stundenwerte simulierten Taktfahrplanes zur Erhöhung der Kapazität um einen Zug/Richtung/Stunde. Bei Überholvorgängen, die alle 15 Kilometer stattfinden, zeigen die Auswertungen, dass eine schrittweise Erhöhung oder Absenkung der Höchstgeschwindigkeiten von ICs und railjets zwischen 140 km/h und 300 km/h bei einem Taktfahrplan zu keinerlei Kapazitätsgewinn/ Kapazitätsverlust führt. Erhöht man jedoch die Streckenlänge zwischen Überholvorgängen auf 22,5 Kilometer zeigt sich, dass ein Verlust einer Trasse/Stunde ab einer Höchstgeschwindigkeit der ICs und des railjets von 280 km/h stattfindet. Demnach ergibt sich, dass bei reiner Betrachtung der Streckenkapazitäten bis 280 km/h der stündliche Zugmix bei angeführten Durchschnittswerten gefahren werden kann, darüber jedoch nicht mehr.

Geschwindigkeitsschere bei Anpassung des Vorsignalabstandes an die Mindestlänge

Durch die Anpassung der Vorsignalabstände an die geschwindigkeitsabhängigen Bremslängen erfolgt eine Betrachtung der Kapazitäten unter dem minimal möglichen Vorsignalabstand für Züge unter 160 km/h und dem kleinstmöglichen Bremsweg durch Berücksichtigung der Führerstandssignalisierung für Züge mit Geschwindigkeiten >160 km/h. Die Auswertungen basieren demnach nicht mehr auf dem Vorsignalabstand von 1,6 Kilometern, sondern auf dem minimal möglichen einen Kilometer, wobei beide Auswertungen unter Berücksichtigung einer Führerstandssignalisierung für Züge, deren Bremslängen jene Länge des Vorsignalabstandes übersteigen, stattfinden.

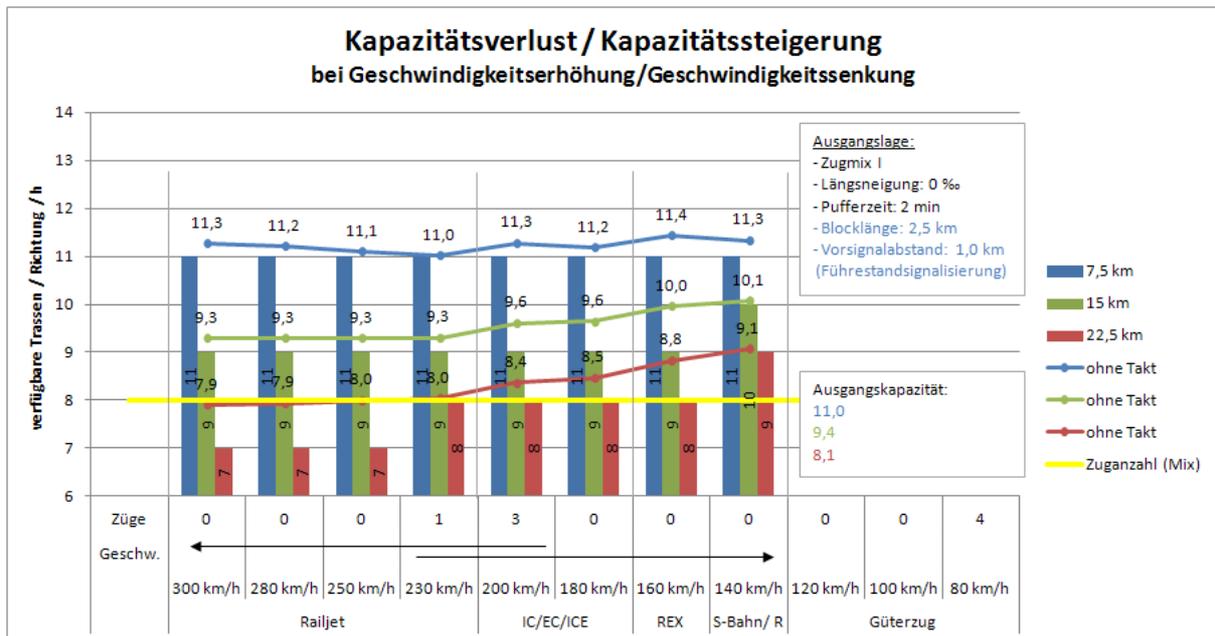


Abbildung 50 – Kapazitätsverlust/Kapazitätssteigerung – Variante 2 (Mix: I)

Die Abbildung 50 zeigt, dass bei „Optimierung“ des Vorsignalabstandes, unabhängig von der Länge zwischen Überholvorgängen (Streckenlänge), gering höhere Kapazitäten erzielt werden, jedoch die Zeitgewinne pro Stunde unter Berücksichtigung eines Taktfahrplanes nicht derart hoch sind, dass zusätzliche Trassen/Stunde lukriert werden können.

Die schrittweise Erhöhung der Geschwindigkeit zeigt, dass unter den beschriebenen Voraussetzungen bei Berücksichtigung eines simulierten stündlich verkehrenden Taktfahrplans Kapazitätssprünge bei einer Erhöhung von 140 auf 160 km/h und von 230 auf 250 km/h (Streckenlänge: 22,5 km) vorhanden sind. Bei einer Geschwindigkeitserhöhung von 160 km/h auf 230 km/h ist demnach mit keinerlei Kapazitätseinbußen zu rechnen, wobei ab einer Höchstgeschwindigkeit von 250 km/h eine Trasse pro Stunde verloren geht, was wiederum bedeutet, dass der Zugmix I,

bestehend aus 8 Zügen in einer Stunde, nicht mehr gefahren werden kann. Auch bei einer Länge zwischen Überholvorgängen von 15 Kilometern ist ein Kapazitätssprung bei einer Geschwindigkeitserhöhung von 140 auf 160 km/h ersichtlich, wobei ausgehend von 160 km/h bei Erhöhung von Geschwindigkeiten keine Kapazitätssprünge entstehen.

Mehrabschnittssignalisierung

Es besteht die Möglichkeit bei Geschwindigkeiten bis 160 km/h einer Verkürzung der Blocklänge auf die Mindestlänge, wodurch sich eine Mehrabschnittssignalisierung mit einer Blocklänge von einem Kilometer ergibt. Die ermittelten Kapazitäten unter dieser Voraussetzung im Vergleich zu den ermittelten Kapazitäten bei einer Höchstgeschwindigkeit von 230 km/h und einer durchschnittlichen Blocklänge von 2,5 Kilometern zeigt die Abbildung 51.

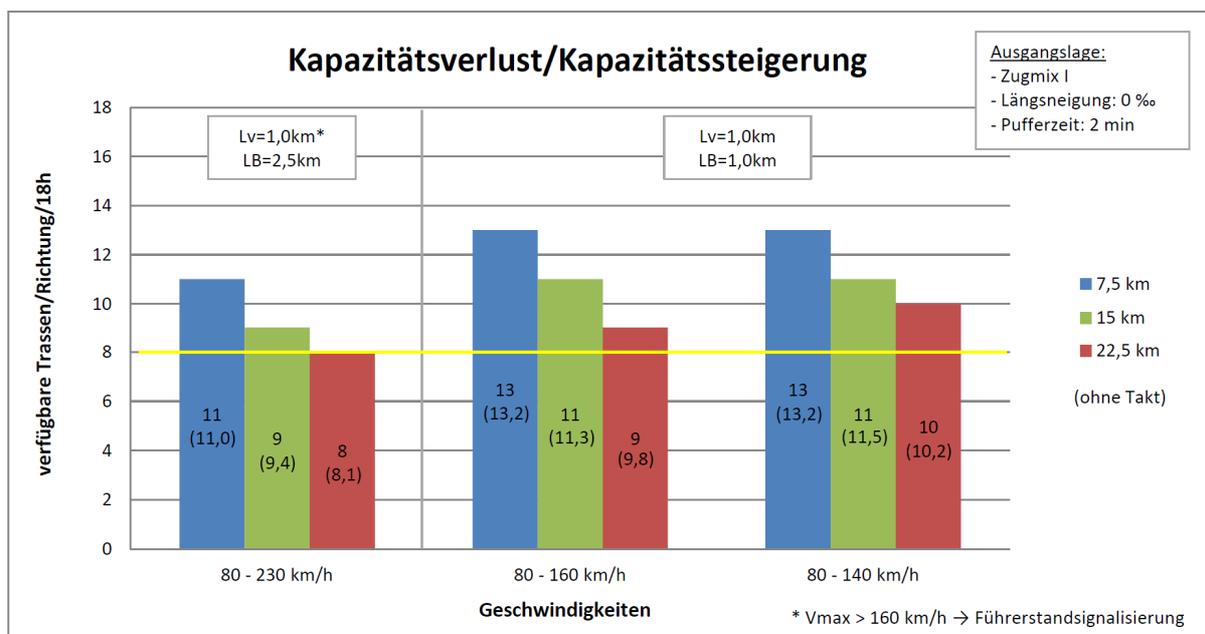


Abbildung 51 – Zugzahlen bei Mehrabschnittssignalisierung (Blocklänge: 1 km) – Mix I

Die Auswertung zeigt, dass bei Verkürzung der Vorsignalabstände und der Blocklängen auf die Mindestlängen die Kapazität enorm gesteigert werden kann. Es ist jedoch auch möglich, bei höheren Geschwindigkeiten eine Reduktion der Blocklängen vorzunehmen, worauf jedoch in dieser Studie nicht explizit eingegangen wird.

Zugmix II

Geschwindigkeitsschere bei durchschnittlichem Vorsignal- und Blockabstand

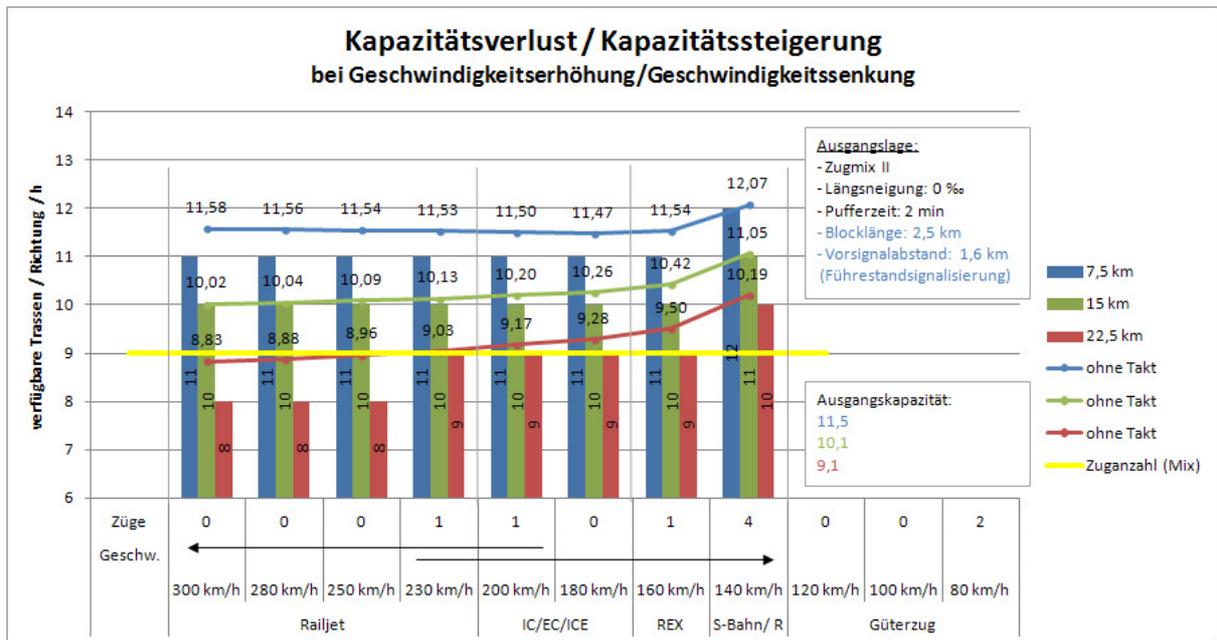


Abbildung 52 – Kapazitätsverlust/Kapazitätssteigerung – Variante 1 (Mix: II)

Die Auswertung (Zugmix II) zeigt, dass unabhängig von den dargestellten Streckenlängen jeweils der Kapazitätssprung unter Berücksichtigung eines stündlichen Taktfahrplans bei einer Geschwindigkeitserhöhung von 140 auf 160 km/h vorliegt, wobei nur bei einer betrachteten Länge zwischen Überholvorgängen von 22,5 Kilometern ein weiterer Kapazitätssprung (von 230 auf 250 km/h) entsteht. Demnach ist ab einer Geschwindigkeit von 230 km/h mit einem Verlust von einer Trasse pro Stunde zu rechnen, was bedeutet, dass der „gewünschte“ Zugmix von neun Zügen pro Stunde nicht mehr gefahren werden kann. Bei geringeren Streckenlängen stellt dies kein Problem dar, da unabhängig von Geschwindigkeitserhöhungen ausreichend Züge verkehren können.

Geschwindigkeitsschere bei Anpassung des Vorsignalabstandes an die Mindestlänge

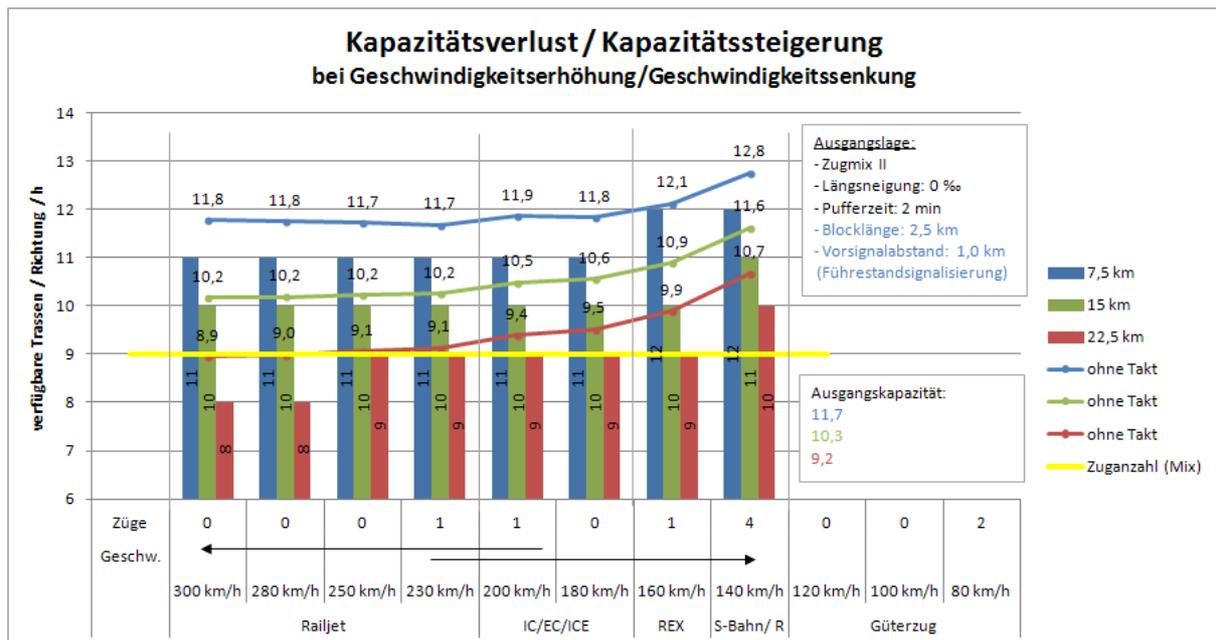


Abbildung 53 – Kapazitätsverlust/Kapazitätssteigerung – Variante 2 (Mix: II)

Im Vergleich zu den Auswertungen mit einem Vorsignalabstand von 1,6 km ergibt sich, dass gering erhöhte Kapazitätswerte bei Verkürzung des Vorsignalabstandes erzielt werden, der stündliche Zeitgewinn unter Berücksichtigung eines Taktfahrplans jedoch nur in Einzelfällen zu einer zusätzlichen stündlich möglichen Trasse führt.

Mehrabschnittssignalisierung

Wie bereits bei der Beschreibung der Auswertungen des Zugmix I angeführt worden ist, ist es möglich, bei Höchstgeschwindigkeiten, die kleiner als 160 km/h sind, die Blocklänge auf 1 km (Mehrabschnittssignalisierung) zu verkürzen, wobei in diesem Fall auch keine Führerstandsignalisierung erforderlich ist. Folgende Kapazitäten haben sich für den Zugmix II unter dieser Gegebenheit ergeben, wobei diese wieder im Vergleich zu den ermittelten Kapazitäten bei einer Höchstgeschwindigkeit von 230 km/h und einer durchschnittlichen Blocklänge von 2,5 Kilometern dargestellt sind.

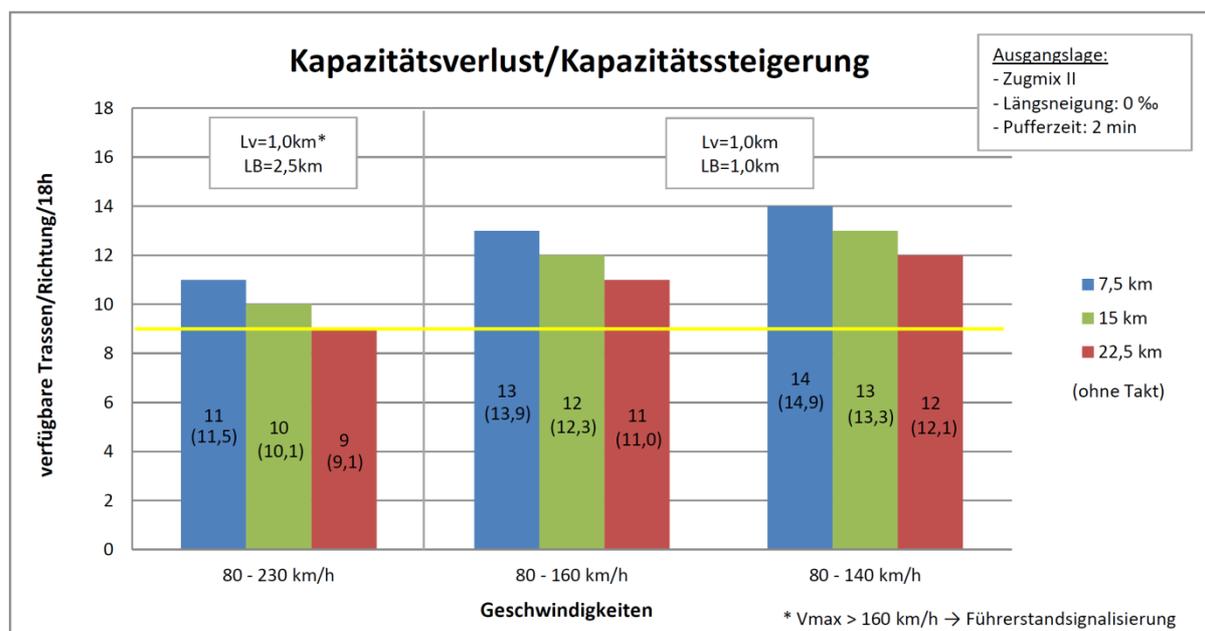


Abbildung 54 – Zugzahlen bei Mehrabschnittssignalisierung (Blocklänge: 1 km) – Mix II

Grundsätzlich spiegeln die Auswertungen zur schrittweisen Anhebung der Personenzuggeschwindigkeiten (IC und railjet) ein ähnliches Ergebnis wider, wie die Auswertungen zur Betrachtung der Einflussfaktoren. Die Analyse zeigt, dass der Einfluss der Höchstgeschwindigkeiten im Personenfernverkehr bei reiner Betrachtung der Streckenkapazitäten klein ist und bei Anhebung nur mit verhältnismäßig geringen Kapazitätsverlusten zu rechnen ist.

Bei Höchstgeschwindigkeiten von 160 km/h besteht durch die Verkürzung des Vorsignalabstandes und der Blocklänge auf 1 km ein hohes Potential für Erhöhung der Kapazität, ohne Erfordernis einer Führerstandssignalisierung. Es fließen demnach nicht nur die Geschwindigkeitsschere, sondern auch geschwindigkeitsabhängige Überlegungen, wie die Möglichkeit der Verkürzung von Vorsignal- und Blocklängen in die Überlegungen zu Erhöhung der Geschwindigkeiten ein.

Vergleichswerte bei homogenen/annähernd homogenen Zuggeschwindigkeiten

Wie die Auswertungen zur „Geschwindigkeitsschere“ ergeben haben, kann die höchste Kapazität durch Angleichung der Geschwindigkeiten der verkehrenden Zugattungen erzielt werden. Die nachfolgend ermittelten Kapazitäten bei homogenen beziehungsweise annähernd homogenen Geschwindigkeiten innerhalb eines Zugmix bieten Vergleichswerte zu den ermittelten Zugzahlen bei Mischverkehr auf zweigleisigen Streckenabschnitten (Zugmix I und II).

Die Auswertung zeigt daher die ermittelten Kapazitäten bei ausschließlichem Verkehren von Güterzügen mit gleichen Höchstgeschwindigkeiten und die Kapazitäten bei Entmischung von Personenzügen mit Höchstgeschwindigkeiten ab 160 km/h und langsameren Güterzug- und S-Bahnverkehr (80-140km/h). Folgende Zugmixe werden hierfür herangezogen:

Tabelle 22 – Zugmixe A und B

Zugmixe		
Mix A	1x RJ	230 km/h
	1x IC	200 km/h
	1x REX	160 km/h
Mix B	4x S-Bahn	140 km/h
	2x Güterzug	80 km/h

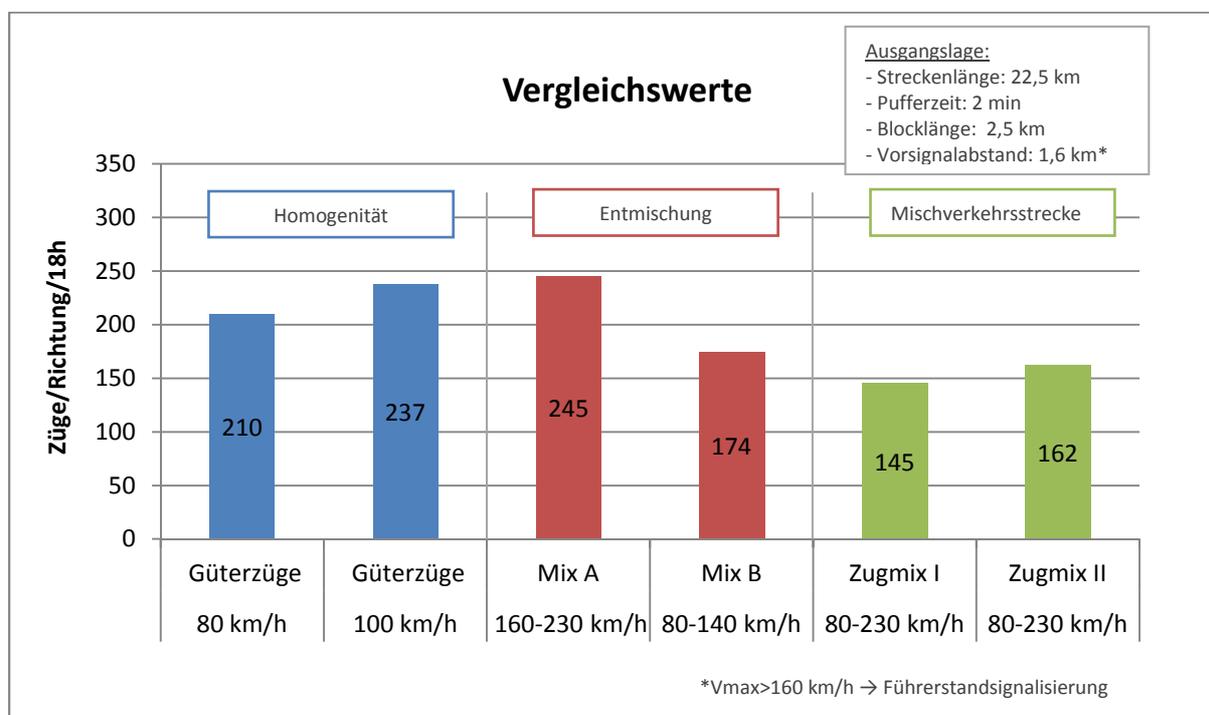


Abbildung 55 – Vergleichswerte bei Angleichung der Geschwindigkeiten

Die Abbildung 55 zeigt, dass bei homogenen Geschwindigkeiten und bei Entmischung von schnellen und langsamen Zügen wesentlich höhere Kapazitäten erzielt werden als auf Mischverkehrsstrecken. Aus Sicht der Kapazität ist daher bei mehrgleisigen Streckenabschnitten in jedem Fall eine gleisweise Trennung von langsam verkehrenden Güterzügen/Personennahverkehrszügen und schnelleren Personenfernverkehrszügen durchzuführen.

7.2 Erkenntnisse aus der Analyse

Die nachstehenden, in aller Kürze formulierten, Erkenntnisse lassen sich aus den Auswertungen schließen, wobei zugmixonabhängig übereinstimmende Tendenzen hinsichtlich der Einflussfaktoren feststellbar sind. Demnach können allgemein gültige Einschätzungen über die Größenordnung des Einflusses der Parameter getroffen werden, die in der Bewertung mittels Sternen (***) symbolisiert werden.

Pufferzeit: ***

Die Pufferzeit ist der am meisten maßgebende Einflussfaktor. Durch Verringerung der Pufferzeit kann die höchste Kapazität erzielt werden. Dies ist aufgrund von Qualitätskriterien jedoch nur beschränkt möglich.

Streckenlänge: ***

Die Streckenlänge bietet die Grundlage jeglicher Überlegungen über Streckenkapazitäten.

Geschwindigkeitserhöhungen im Güterverkehr: ***

Die Güterzuggeschwindigkeit ist neben der Pufferzeit die maßgebendste Einflussgröße.

Blocklänge: **

Bei Verkürzung der Blocklänge kann die Kapazität gesteigert werden, jedoch nicht in der Größenordnung, wie es bei der Verringerung der Pufferzeit der Fall ist.

Geschwindigkeitserhöhung im Personenfernverkehr: **

Geschwindigkeitserhöhungen im Personenfernverkehr beschränken zwar die Kapazität, deren Einfluss auf die Kapazität ist verhältnismäßig jedoch gering.

Längsneigung: *

Die Längsneigung beschränkt/steigert die Kapazität nur gering.

Die Ergebnisse spiegeln in Summe wider, dass durch Angleichung der Geschwindigkeiten auf ähnliche Geschwindigkeitsniveaus die höchste Kapazität erzielt wird, wobei dies sowohl durch Absenkung der Geschwindigkeiten des Personenverkehrs, als auch durch die Anhebung der Güterzuggeschwindigkeiten erfolgen kann. Die Auswertungen zur Anhebung der Höchstgeschwindigkeiten im Personenfernverkehr haben durchgehend

dasselbe Ergebnis gebracht, nämlich, dass die Geschwindigkeitserhöhung von IC und railjet die Kapazität in nur verhältnismäßig geringem Ausmaß beschränkt. Die Auswertungen zur schrittweisen Erhöhung der Geschwindigkeiten haben jedoch gezeigt, dass Kapazitätssprünge bei Berücksichtigung eines Taktfahrplans, der über aneinandergereihte Stundenwerte simuliert wird, auftreten, die sehr wohl Einfluss auf die Kapazität haben.

Grundsätzlich können die Kapazitätsverluste bei Anhebung der Höchstgeschwindigkeiten des Personenfernverkehrs jedoch durch Maßnahmen zur Kapazitätssteigerung anderer Einflussfaktoren kompensiert und darüber hinaus noch zusätzliche Trassen lukriert werden.

8 Vereinfachte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Grundlage

Ein wesentlicher Entscheidungsgrund bei der Umsetzung möglicher infrastruktureitiger oder betrieblicher Maßnahmen zur Erhöhung der Kapazität sind die auftretenden Kosten. Eine detaillierte Kostenbetrachtung, unter Berücksichtigung variabler Kostenanteile, sowie jeglicher politischer und gesamtwirtschaftlicher Einflüsse ist im Zuge dieser Studie nicht möglich. Die nachstehende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zielt demnach auf die Umlegung von Anlagekosten auf die pro Gleis verkehrenden Züge ab, um die Einflüsse der Maßnahmen zur Kapazitätssteigerung über die ermittelten möglichen Zugzahlen darzustellen.

Eingangsdaten

Es werden grundsätzliche Einteilungen in Anlagen getroffen und diese je nach spezifischen Eigenschaften und deren Einheitspreisen (Preisbasis 2012) aufgeschlüsselt, welche in Folge die Grundlage für die Zusammenstellung einer fiktiven Modellstrecke bieten.

Tabelle 23 – Anlagekosten (Preisbasis 2012) und Nutzungsdauern von Bauteilen

Bauteil	Anzahl der Gleise	Eigenschaften	Anlagekosten [€/m]	Nutzungsdauer [Jahre]	Umlage v. Anlagekosten [€/m/Gleis/Jahr]
Unterbau	zweigleisig	Einschnitt < 5m Einschnittstiefe	2.350	100	11,75
		Einschnitt 5 – 10m Einschnittstiefe	4.450		22,25
		Einschnitt 10 – 15m Einschnittstiefe	8.550		42,75
		Damm < 5 m Dammhöhe	1.100		5,50
		Damm 5 - 10m Dammhöhe	1.800		9,00
		Damm 10 - 15m Dammhöhe	3.200		16,00
Oberbau	eingleisig	Schottergleis	1.900	35	54,29
		feste Fahrbahn	2.750		78,57
Brücken	zweigleisig	kleine Spannweiten	53.150	80	332,19
		große Spannweiten	34.000		212,50
Tunnel	zweigleisig	gute geologische Verhältnisse	62.000	150	206,67
		schlechte geologische Verhältnisse	100.000		333,33
Unterflurtrasse	zweigleisig und gedeckt	Deckung bis 5m	27.500	80	171,88
		Deckung > 5 m	31.200		195,00
	zweigleisig	Wanne	26.000		162,50
SFE	eingleisig	Oberleitung, Sicherungsanlage usw.	1.800	25*	72,00

*Die Nutzungsdauer von 40 Detailangaben variiert zwischen 4 und 50 Jahren. Deshalb wurde die Annahme einer einheitlichen Nutzungsdauer von 25 Jahren getroffen.

Die in Tabelle 23 angeführten Anlagekosten können als grob vereinfachte, auf Durchschnittswerten basierende Einheitspreise verstanden werden, die je nach Bauvorhaben und Projektumfang variieren können, für eine vereinfachte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung jedoch ausreichende Genauigkeit besitzen.

Modellstrecke

Die Betrachtung der Anlagekosten über einen Streckenabschnitt erfolgt auf Basis einer fiktiven Modellstrecke, die sich folgend zusammensetzt:

Tabelle 24 – Fiktive Modellstrecke

Modellstrecke	
6%	Tunnelstrecke
2%	Unterflurtrassen
4%	Brücken
44%	Einschnitte
44%	Dämme

Die Anlagekosten der definierten fiktiven Modellstrecke werden über einen 100 Kilometer langen Streckenabschnitt ermittelt und anteilmäßig auf einen Kilometer gerechnet. Die Tabelle 25 führt die definierten Prozentanteile und die daraus resultierenden Anlagekosten von den Bauteilen der Modellstrecke für einen Kilometer an, woraus sich in Summe die Kosten für einen durchschnittlichen Kilometer Modellstrecke errechnen.

Tabelle 25 – Anlagekosten der Modellstrecke

Bauteil	Anmerkung	Umlage v. Anlagekosten	Modellstrecke	
		[€/km/Gleis/Tag]	%	[€/100km/Gleis/Tag]
Unterbau	Einschnitt < 5m Einschnittstiefe	32,17	30%	9,65
	Einschnitt 5 – 10m Einschnittstiefe	60,92	10%	6,09
	Einschnitt 10 – 15m Einschnittstiefe	117,04	4%	4,68
	Damm < 5 m Dammhöhe	15,06	30%	4,52
	Damm 5 - 10m Dammhöhe	24,64	10%	2,46
	Damm 10 - 15m Dammhöhe	43,81	4%	1,75
Oberbau	Schottergleis	148,63	94%	139,71
	feste Fahrbahn	215,12	6%	12,91
Brücken	kleine Spannweiten	909,48	2%	18,19
	große Spannweiten	581,79	2%	11,64
Tunnel	gute geologische Verhältnisse	565,82	3%	16,97
	schlechte geologische Verhältnisse	912,62	3%	27,38
Unterflurtrasse	Deckung bis 5m	470,57	0,50%	2,35
	Deckung > 5 m	533,88	0,50%	2,67
	Wanne	444,90	1,00%	4,45
SFE	Oberleitung, Sicherungsanlage usw.	197,13	100%	197,13
			Summe:	462,55

Auswertung

Ausgehend von den Kosten der Modellstrecke wird die Kostenfunktion mit den Anlagekosten zur Bezugsgröße „Kapazität“ dargestellt. Es wird von einer vollständigen Auslastung des Streckenabschnitts ausgegangen, wobei die Anlagekosten pro verkehrenden Zug mit steigenden Zugzahlen sinken.

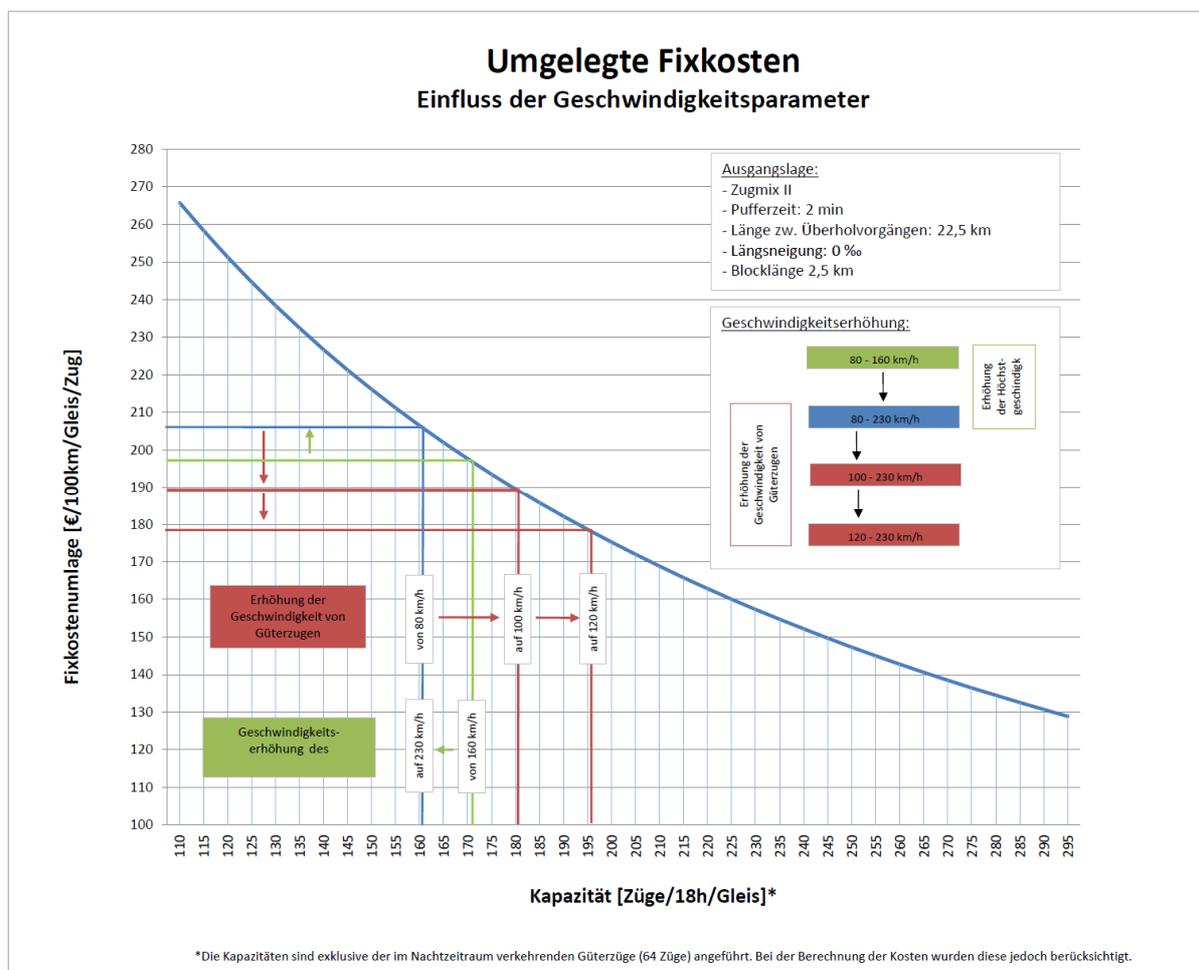


Abbildung 56 – Fixkostenumlage – Einfluss der Geschwindigkeitsparameter

Die Abbildung 56 stellt die Senkung der möglichen Zugzahlen durch Anhebung der Geschwindigkeiten des Personenfernverkehrs und in weiterer Folge die Erhöhung der Kapazitäten durch die Anhebung der Güterzuggeschwindigkeiten (siehe Box in Abbildung 56) im Zusammenhang mit den sich verändernden Kosten pro Zug dar. Die angeführten Kapazitätsänderungen entsprechen jenen Werten, die im Zuge der Variationsanalyse bei Betrachtung des Zugmix II bei Durchschnittswerten der Einflussgrößen ermittelt worden sind. In die ermittelten Kosten pro Zug fließen nicht ausschließlich die in der Abbildung dargestellten Kapazitäten des Tageszeitraumes von 18 Stunden ein, sondern auch die verkehrenden Güterzüge (64 Züge) im Nachtzeitraum, wobei Zeitanteile für Instandhaltung keine Berücksichtigung finden.

Sollte eine höhere Anzahl an Trassen, als jene die unter gegebenen Voraussetzungen möglich sind, erwünscht sein, können, wie in den Kapiteln zuvor ausführlich beschrieben, durch kapazitätssteigernde Maßnahmen höhere Kapazitäten erzielt werden. Die Abbildung 57 zeigt die Einflussbereiche der Einflussfaktoren für den Zugmix II unter den

Durchschnittswerten der weiteren Einflussgrößen, welche zuvor in der Variationsanalyse unter einer Geschwindigkeitsspanne von 80–230 km/h ermittelt worden sind. Durch kombinierte Variationen verschieben sich die Einflussbereiche, wobei höhere Kapazitäten erzielt werden können, welche ebenfalls den Auswertungen der Variationsanalyse zu entnehmen sind, jedoch keine Berücksichtigung in einer der Abbildungen finden.

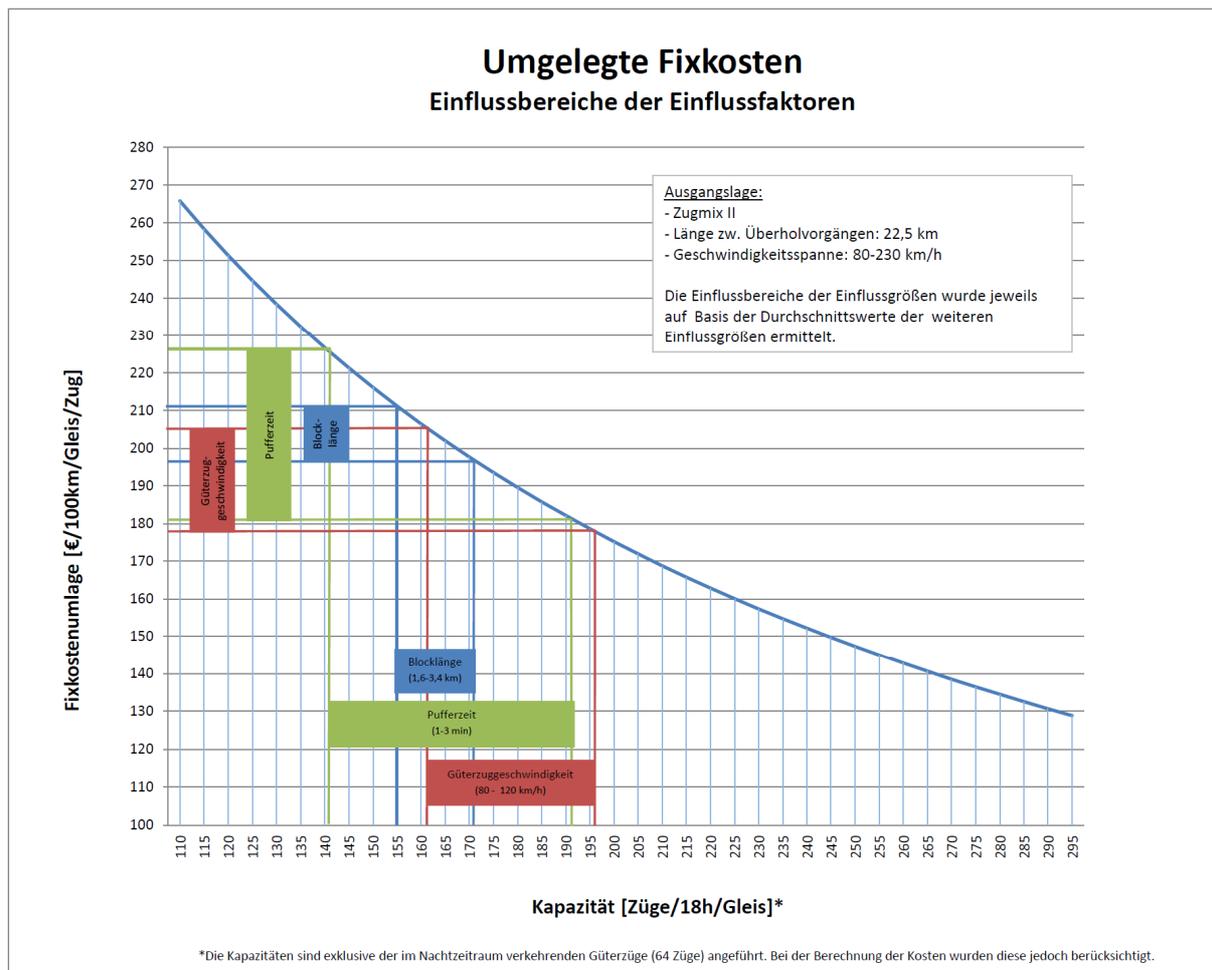


Abbildung 57 – Fixkostenumlage – Einflussbereiche der Einflussfaktoren

Sollten Maßnahmen der in dieser Studie untersuchten Einflussfaktoren zur Erhöhung der Kapazität nicht ausreichen, kann ein mehrgleisiger Ausbau, sofern dies möglich ist, für ausreichend Kapazität sorgen, wobei dies mit hohen Kosten verbunden ist.

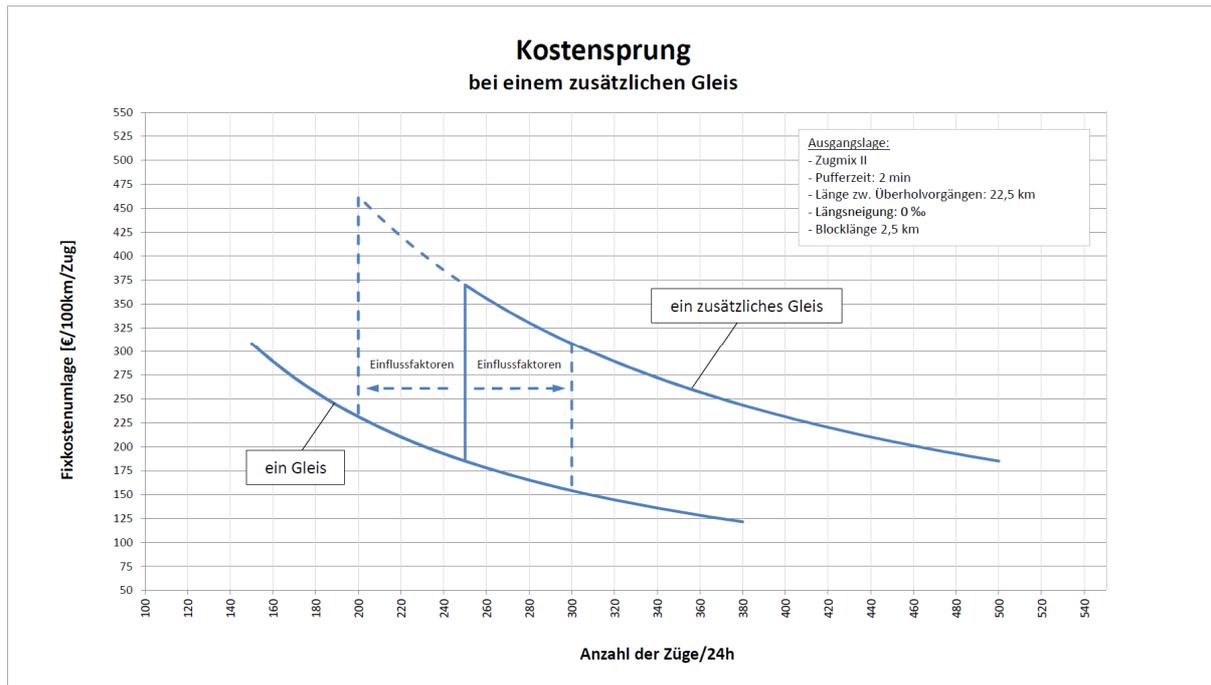


Abbildung 58 – Kostensprung bei einem zusätzlichen Gleis

Die Abbildung 58 zeigt die Größenordnung der Fixkosten (Anlagekosten) bei einem zusätzlich benötigten Gleis in Abhängigkeit der pro Gleis verkehrenden Züge. Der Kostensprung kann je nach Eingangsgrößen und Ausprägungen der Einflussfaktoren bei unterschiedlich hohen Zugzahlen erfolgen, wobei dies Auswirkungen auf die Fixkosten pro Zug hat. Kosten, die bei kapazitätssteigernden Maßnahmen auftreten, wie es bei Blockverdichtungen der Fall ist, werden jedoch nicht dargestellt und nicht berücksichtigt.

Erkenntnis

Diese vereinfachte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, bei reiner Darstellung der Anlagekosten, ohne jegliche Berücksichtigung weiterer Einflussfaktoren, welche bei Entscheidungen für Infrastrukturinvestitionen jedoch unumgänglich sind, zeigt, dass jede umsetzbare Maßnahme zur Erhöhung der Kapazität einem Ausbau um ein zusätzliches Gleis vorzuziehen ist und ein mehrgleisiger Ausbau erst bei hohen zu erwartenden Zugzahlen zielführend ist.

Bei stark ausgelasteten Strecken führen unterschiedliche Kapazitäten zu merkbareren Änderungen der Fixkostenbelastungen pro Zug.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Die Grundlage für jegliche Überlegungen zur Geschwindigkeitserhöhung, als auch zur Steigerung der Kapazitäten, bieten die vorhandene Infrastruktur und die Möglichkeiten eines Infrastrukturausbaus, wobei Strecken und Bahnhöfe gleichermaßen von Relevanz sind, wie die Signaltechnik und das Zugsicherungssystem. Die Infrastruktur definiert somit die grundlegenden Einflussfaktoren für die Kapazität eines Streckenabschnitts.

Bei Überlegungen zur Anhebung von Geschwindigkeiten ist zu eruieren, welches Potential in Form von Bevölkerungszahlen und Distanzen zwischen Ballungszentren vorliegt und welchen Nutzen Geschwindigkeitserhöhungen in Form von Reisezeitersparnissen und Einhaltung möglicher gewünschter Kantenfahrzeiten mit sich bringen, um einen Infrastrukturausbau, oder eine Anhebung von Geschwindigkeiten, bestmöglich zu nutzen und gezielt Investitionen in die Schieneninfrastruktur zu tätigen. Hohe Geschwindigkeiten verfehlen demnach ihren Nutzen, wenn diese aufgrund einer einzuhaltenden Kantenfahrzeit, oder aus Kapazitätsgründen, entweder nicht gefahren werden können, oder die Kapazität derart beschränken würden, dass eine Erhöhung aus wirtschaftlichen Gründen nicht zielführend ist.

Der maßgebendste infrastruktureseitige Einflussfaktor für Kapazitätsüberlegungen ist sicherlich die Anzahl der bestehenden Gleise. Auf viergleisigen Korridoren, wie es teilweise auf der Westbahn der Fall ist, kann, wenn keine anderwärtigen (politischen) Gründe vorliegen, eine gleisweise Trennung zwischen langsam verkehrenden Regionalzügen/Güterzügen und schnelleren Personenverkehrszügen erfolgen. Dieser Ansatz ist aus Kapazitätsgründen sicherlich der sinnvollste, da die Kapazität bei annähernd homogenen Zuggeschwindigkeiten wesentlich erhöht werden kann. Geschwindigkeitserhöhungen stellen bei gleisweiser Trennung aus Sicht der Kapazität keine Schwierigkeiten dar. Auf zweigleisigen Streckenabschnitten ist diese Aussage jedoch nicht direkt übertragbar, da Mischverkehrsstrecken unumgänglich sind und die entstehende Geschwindigkeitsschere bei Zuggattungen, die mit unterschiedlich hohen Geschwindigkeiten verkehren, zu Kapazitätsverlusten führt.

Die Variationsanalyse hat ergeben, dass eine Anhebung der Höchstgeschwindigkeiten im Personenfernverkehr auf zweigleisigen Mischverkehrsstrecken vergleichsweise wenig Einfluss auf die Kapazität eines Streckenabschnitts hat und eine Anhebung der Personenzuggeschwindigkeiten somit auch nicht zu hohen Kapazitätsverlusten führt. Diese Kapazitätsverluste können durch kapazitätssteigernde Maßnahmen anderer Einflussfaktoren kompensiert und darüber hinaus zusätzliche Zugtrassen lukriert werden. Durch Reduktion der Pufferzeit kann der größte Kapazitätsgewinn erzielt werden, wobei

dies angesichts der „Betriebsqualität“ nur bedingt umsetzbar ist. Sollte eine Anhebung der Geschwindigkeiten im Personenverkehr auch auf zweigleisigen Strecken angedacht werden, ist bei nicht ausreichender Kapazität eine Anhebung der Geschwindigkeiten eines Großteils der Güterzüge der effektivste Weg um Kapazitätsverluste auszugleichen. Durch Verkürzung der Blocklängen können die Kapazitätsverluste ebenfalls kompensiert werden, wobei sich zusätzliche Trassen dabei aber nur schwer lukrieren lassen.

Eisenbahnstrecken mit Hochgeschwindigkeit sind grundsätzlich nur dort realisierbar, wo die Trassierung der Streckenabschnitte auch Hochgeschwindigkeit zulassen, beziehungsweise wo es möglich ist durch Neubau Hochgeschwindigkeitsstrecken zu errichten. Zudem muss gesagt werden, dass ein Ausbau der Strecken, um mit Hochgeschwindigkeit verkehren zu können, nur durch enorme Investitionen in die Infrastruktur zu realisieren sind. Es ist demnach zu hinterfragen, ob der Nutzen von Geschwindigkeitserhöhungen derart groß ist, dass sich diese Infrastrukturinvestitionen lohnen.

Bei ausschließlicher Betrachtung der Streckenkapazitäten sind Geschwindigkeitserhöhungen im Personenfernverkehr auf zweigleisigen Mischverkehrsstrecken, die Hochgeschwindigkeiten zulassen, gekoppelt mit kapazitätserhöhenden Maßnahmen, realisierbar.

Auf hochbelasteten Streckenabschnitten sind die Möglichkeiten kapazitätserhöhende Maßnahmen durchzuführen jedoch meist gering, da die Maßnahmen der einzelnen Einflussfaktoren bereits ausgereizt sind, wodurch Kapazitätsverluste nicht ausgemerzt werden können.

Abkürzungsverzeichnis

ÖBB	Österreichische Bundesbahnen
TEN	Transeuropäische Netze
TSI	Technische Spezifikationen für Interoperabilität
EVU	Eisenbahnverkehrsunternehmen
IC	Intercity
EC	Eurocity
ICE	Intercity-Express
REX	Regional-Express
R	Regionalzug
ETCS	European Train Control System
ERTMS	European Rail Traffic Management System
UIC	<i>Union internationale des chemins de fer</i> (Internationaler Eisenbahnverband)
GV	Güterverkehr

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 – Erweiterungsinvestitionen zur Erreichung des Zielnetzes 2025+ [4]	11
Abbildung 2 – geografischer Anwendungsbereich der Interoperabilitätsrichtlinie ([7] S. 4) ...	13
Abbildung 3 – Bereits realisierte Prioritätenprojekte im Zielnetz 2030 [11]	17
Abbildung 4 – TEN-T Achsen durch Österreich [10]	18
Abbildung 5 – Entfernungsbewertungsfunktion (aus [15] S.52)	20
Abbildung 6 – Potenzial für Hochgeschwindigkeitsstrecken (aus [16] S.5).....	21
Abbildung 7 – Fahrtdiagramm [17]	23
Abbildung 8 – Reisezeiten unter variierenden Höchstgeschwindigkeiten.....	25
Abbildung 9 – schematische Darstellung der Kantenfahrzeit.....	26
Abbildung 10 – Einteilung der Gleise(aus [22] S. 563)	29
Abbildung 11 – Blockabschnitte (Blockstrecken) der freien Strecke (aus [20] S.7)	30
Abbildung 12 – Überleitstelle (aus [20] S. 8).....	31
Abbildung 13 – Haltestelle (aus [20] S. 9)	31
Abbildung 14 – Fahren im festen Raumabstand (aus [22] S.568)	33
Abbildung 15 – Prinzipien der Vorsignalisierung (aus [20] S. 48)	34
Abbildung 16 – Sperrzeit für durchfahrenden Zug (aus [20] S. 51)	37
Abbildung 17 – Sperrzeit für anfahrenden Zug (aus [20] S. 51)	37
Abbildung 18 – Sperrzeitentreppe	38
Abbildung 19 – Bildfahrplan	39
Abbildung 20 – Mindestzugfolgezeit	40
Abbildung 21 – Geschwindigkeitsschere – Geschwindigkeitsunterschiede	46
Abbildung 22 – Geschwindigkeitsschere – Länge zwischen Überholvorgängen.....	47
Abbildung 23 – Einfluss des Blockabstands auf die Kapazität.....	48
Abbildung 24 – Einfluss der Pufferzeit auf die Kapazität	49
Abbildung 25 – Bremswege und Vorsignalabstände in Abhängigkeit der Geschwindigkeit	55
Abbildung 26 – Mindestzugfolgezeiten der Zugfolgefälle	57
Abbildung 27 – Darstellung der Halte im SBB/ÖBB-Modell	59
Abbildung 28 – Komprimierung der Zugtrassen.....	64
Abbildung 29 – Zugfolge (Mix II) – RailSys.....	67
Abbildung 30 – Halte in Abhängigkeit der Streckenlänge	69
Abbildung 31 – Maximale Zugzahlen laut UIC-Richtlinie	72
Abbildung 32 – Modellabgleich: Korrelationsanalyse	74
Abbildung 33 – Fahrplan ohne Halt der S-Bahn	76
Abbildung 34 – Fahrplan mit Halt der S-Bahn	76
Abbildung 35 – Streckenleistungsfähigkeit – Pufferzeit – Anhebung von V_{Pers} (Mix: I).....	78
Abbildung 36 – Streckenleistungsfähigkeit – Pufferzeit – Anhebung von V_{Pers} (Mix: II)	80
Abbildung 37 – Streckenleistungsfähigkeit – Pufferzeit – Anhebung von $V_{\text{Güterzüge}}$ (Mix: I)	81
Abbildung 38 – Streckenleistungsfähigkeit – Pufferzeit – Anhebung von $V_{\text{Güterzüge}}$ (Mix: II)	82

Abbildung 39 – Streckenleistungsfähigkeit – Blocklänge – Anhebung von V_{Pers} (Mix: I)	84
Abbildung 40 – Streckenleistungsfähigkeit – Blocklänge – Anhebung von V_{Pers} (Mix: II)	85
Abbildung 41 – Streckenleistungsfähigkeit – Blocklänge – Anhebung von $V_{\text{Güterzüge}}$ (Mix: I) ...	86
Abbildung 42 – Streckenleistungsfähigkeit – Blocklänge – Anhebung von $V_{\text{Güterzüge}}$ (Mix: II) ..	87
Abbildung 43 – Streckenleistungsfähigkeit – Pufferzeit und Blocklänge (Mix: I)	88
Abbildung 44 – Streckenleistungsfähigkeit – Pufferzeit und Blocklänge (Mix: II)	89
Abbildung 45 – Streckenleistungsfähigkeit – Längsneigung (Mix: I)	90
Abbildung 46 – Streckenleistungsfähigkeit – Längsneigung – Anhebung von V_{Pers} (Mix: I).....	91
Abbildung 47 – Streckenleistungsfähigkeit – Längsneigung (Mix: II)	92
Abbildung 48 – Streckenleistungsfähigkeit – Längsneigung – Anhebung von V_{Pers} (Mix: II) ...	92
Abbildung 49 – Kapazitätsverlust/Kapazitätssteigerung – Variante 1 (Mix: I)	95
Abbildung 50 – Kapazitätsverlust/Kapazitätssteigerung – Variante 2 (Mix: I)	96
Abbildung 51 – Zugzahlen bei Mehrabschnittssignalisierung (Blocklänge: 1 km) – Mix I.....	97
Abbildung 52 – Kapazitätsverlust/Kapazitätssteigerung – Variante 1 (Mix: II)	98
Abbildung 53 – Kapazitätsverlust/Kapazitätssteigerung – Variante 2 (Mix: II)	99
Abbildung 54 – Zugzahlen bei Mehrabschnittssignalisierung (Blocklänge: 1 km) – Mix II....	100
Abbildung 55 – Vergleichswerte bei Angleichung der Geschwindigkeiten	101
Abbildung 56 – Fixkostenumlage – Einfluss der Geschwindigkeitsparameter.....	107
Abbildung 57 – Fixkostenumlage – Einflussbereiche der Einflussfaktoren	108
Abbildung 58 – Kostensprung bei einem zusätzlichen Gleis.....	109

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 – Beschleunigungs- und Bremswerte des ÖBB-railjets (aus [18] S. 11).....	24
Tabelle 2 – Reisezeit bei einer Höchstgeschwindigkeit von 160 km/h	24
Tabelle 3 – Reisezeitersparnis bei Anhebung der Höchstgeschwindigkeit.....	25
Tabelle 4 – Unterschiedliche Ansichten zur Kapazität (aus [24] S. 4)	41
Tabelle 5 – Maßnahmen zur Erhöhung der Streckenleistungsfähigkeit [28]	50
Tabelle 6 – Zugmixe	52
Tabelle 7 – Details zur Streckenlänge	54
Tabelle 8 – Höchstgeschwindigkeiten der Zuggattungen als Ausgangsgeschwindigkeit	54
Tabelle 9 – Brems- und Beschleunigungswerte	58
Tabelle 10 – Matrix der Zugfolgezeiten	59
Tabelle 11 – Matrix der Erwartungswerte	60
Tabelle 12 – Einflussgrößen	62
Tabelle 13 – Richtzahlen (aus [24] S. 20)	65
Tabelle 14 – Modellvereinfachungen – Übersicht	67
Tabelle 15 – Zugbildung	70
Tabelle 16 – Beschleunigungsvorgänge – RailSys	70
Tabelle 17 – Bremsvorgänge – RailSys	71
Tabelle 18 – weitere Einflussgrößen – RailSys.....	71
Tabelle 19 – Trassenverteilung und Sättigungsgrade	72
Tabelle 20 – Abgleich der Kapazitätsermittlungen	73
Tabelle 21 – Aufschlüsselung – linearer Zusammenhang	73
Tabelle 22 – Zugmixe A und B.....	101
Tabelle 23 – Anlagekosten (Preisbasis 2012) und Nutzungsdauern von Bauteilen.....	104
Tabelle 24 – Fiktive Modellstrecke.....	105
Tabelle 25 – Anlagekosten der Modellstrecke	106



Literaturverzeichnis

- [1] Schnieder, Eckehard: Verkehrsleittechnik. Automatisierung des Straßen- und Schienenverkehrs. Braunschweig: Springer-Verlag, 2007
- [2] Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie: „Verkehr in Zahlen 2007“. Wien, 2007
- [3] Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie: „Verkehrsprognose Österreich 2025+“. Wien, 2009
- [4] ÖBB Infrastruktur AG: „Bericht - Zielnetz 2025+“, 2011
- [5] ÖBB Infrastruktur AG: „Wir bauen für Generationen“. URL: http://www.oebb.at/infrastruktur/de/5_0_fuer_Generationen/5_4_Wir_bauen_fuer_Generationen/5_4_1_Schieneninfrastruktur/Zukunftbahn_Zielnetz_2025/ [Stand: 14.01 2012]
- [6] Kommission der Europäischen Gemeinschaften: Richtlinie 96/48/EG vom 23. Juli 1996 über die Interoperabilität des transeuropäischen Hochgeschwindigkeitsbahnsystems, Brüssel, 1996
- [7] Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie: „Broschüre – Interoperabilität“. Wien, 2009
- [8] ÖBB Infrastruktur AG: *Produktkatalog Netzzugang*, Wien, 2011
- [9] Marschnig, Stefan: „Struktur des europäische Eisenbahnwesen“. Vorlesungsskriptum der Vorlesung Struktur des europäischen Eisenbahnwesen. TU Graz, 2011
- [10] Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie: „Transeuropäische Eisenbahnen“. URL: http://www.bmvit.gv.at/verkehr/international_eu/unece/ter.html [Stand: 15.10.2011]
- [11] Kommission der Europäischen Gemeinschaften: Union Guidelines for the development of the trans-European transport network, Brüssel, 2011



- [12] Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie:
„INTEROPERABILITÄT“.
URL: <http://www.bmvit.gv.at/verkehr/eisenbahn/interoperabilitaet/index.html>
[Stand: 15.10.2011]
- [13] Veit, Peter: Kostenwirksamkeit von Geschwindigkeitserhöhungen im Eisenbahnwesen Österreichs. Dissertation. TU Graz, 1991
- [14] Schnauffer, Michael: „Potential und Machbarkeit von Eisenbahnstrecken für reinen Hochgeschwindigkeitsverkehr in Österreich unter Berücksichtigung des europäischen Umfeldes“. Diplomarbeit. FH Campus Wien, 2011
- [15] Maierhofer, Gert: Hochleistungsbahnen. Ein Überblick über wesentliche Aspekte ausländischer und österreichischer Hochleistungsbahnen. Diplomarbeit, TU Graz, 1991
- [16] Walter, Stefan: Integrated Periodic Timetable Scheduling – Towards an Integrated Timetable across Central Europe. Paper. TU Graz. 2012
- [17] Rießberger Klaus: Eisenbahnwesen Grundlagen, Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft, TU Graz, 2006
- [18] Veit, Peter: Eisenbahnwesen Grundlagen. Erstellung eines Betriebskonzepts, Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft, TU Graz, 2011
- [19] Uttenthaler, Helmut: „Grundlagen eines auf einem Integrierten Taktfahrplan basierenden Eisenbahninfrastrukturausbaues am Beispiel Zentraleuropa“. Diplomarbeit. TU Graz, 2010
- [20] Pacht, Jörn: Systemtechnik des Schienenverkehrs. Bahnbetrieb planen, steuern und sichern. 5., bearbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner |GWV Fachverlage GmbH, 2008
- [21] ÖBB: Betriebsvorschrift V3. Wien, 2005
- [22] Pacht, Jörn: Betriebsführung der Infrastruktur. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007 (=Handbuch Eisenbahninfrastruktur)
- [23] Heisler, Gert: Eisenbahnbetriebstechnologie. Mainz: Eisenbahn-Fachverlag, 2005
- [24] Internationaler Eisenbahnverband: Kapazität. UIC- Kodex- 406 VE. Paris, 2004.



- [25] Muthmann, Thilo: Rechnerische Bestimmung der optimalen Streckenauslastung mit Hilfe der Streckendurchsatzleistung. Dissertation. TU Darmstadt, 2004

- [26] Internationaler Eisenbahnverband: Zusammenhänge zwischen der Leistungsfähigkeit der Eisenbahnbetriebsanlagenanlagen und der Betriebsqualität. UIC- Kodex- 405 VE. Paris, 1996

- [27] Andreas Gille/Thomas Siefer: „Nutzung der Betriebssimulation zur differenzierten Kapazitätsbestimmung“. In: EI-Eisenbahntechnik. Hamburg, Juli 2011

- [28] Lichtenegger, Michael: „Eisenbahnbetrieb“. Vorlesungsskriptum der Vorlesung Eisenbahnbetrieb. TU Graz, 2010



Institut für Eisenbahnwesen
und Verkehrswirtschaft
Technische Universität Graz
Rechbauerstrasse 12/II
8010 Graz
+43 316 873 6216
office.ebw@tugraz.at
▶ www.ebw.tugraz.at