



ETCS L2/L3 Untersuchung auf der S-Bahn-Stammstrecke Wien

Diplomarbeit
Sommersemester 2019

Maximilian Wirth, BSc.

1710694821

Fachliche Betreuung: DI Dr. Andreas Schöbel

Formale Betreuung: DI Dr. Andreas Schöbel

Vorwort

Die nachfolgende Diplomarbeit entstand im Zeitraum des Wintersemesters 2018/19 bis zum Sommersemester 2019 im Rahmen meines berufsbegleitenden Masterstudiums „Bahntechnologie und Management von Bahnsystemen“ an der Fachhochschule St. Pölten. Die Brisanz des Themas im Hinblick auf die stark eingeschränkten, noch freien Kapazitäten der Wiener S-Bahn-Stammstrecke sowie die entstehenden Möglichkeiten beim Einsatz modernerer Zugsicherungssysteme haben mein Interesse geweckt. Mit der Arbeit „ETCS L2/L3 Untersuchung auf der S-Bahn-Stammstrecke Wien“ wird exakt diese Problematik aufgegriffen und behandelt, was mir große Freude bereitete.

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bedanken...

... bei meinem Betreuer, Hr. DI Dr. Andreas Schöbel, für seine verlässliche Betreuung und den konstruktiven Hilfestellungen bei der Erstellung dieser Arbeit.

... bei meiner Familie, die mir immer mit Rat und Tat zur Seite stand.

... bei meinen Freunden, die mich bei der Korrektur von Grammatik- und Rechtschreibfehlern unterstützten.

Erklärung zur Veröffentlichung

Der Autor erklärt sich damit einverstanden, dass die FH St. Pölten die vorliegende Arbeit in geeigneter Weise unter Nennung des Autors bzw. in der vorliegenden Originalform als .pdf-Datei oder in gedruckter Form veröffentlichen darf.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides Statt, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbständig angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher weder in gleicher noch in ähnlicher Form einer andern Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Zusammenfassung

Die nachfolgende Diplomarbeit zum Thema „ETCS L2/L3 Untersuchung auf der S-Bahn-Stammstrecke Wien“ beschäftigt sich mit den Möglichkeiten zur Kapazitätssteigerung einer Eisenbahnstrecke durch den Einsatz moderner Zugsicherungssysteme. Zu Beginn werden die Wiener S-Bahn-Stammstrecke und die wichtigsten darauf verkehrenden Fahrzeuge vorgestellt. Mithilfe von OpenTrack, einem Simulationsprogramm von Eisenbahnnetzen, werden die Infrastruktur sowie die darauf verkehrenden Triebfahrzeuge nachgestellt.

Im Hauptteil der Arbeit werden in vier verschiedenen Szenarien die erreichbaren Mindestzugfolgezeiten ermittelt, die in weiterer Folge einen Aufschluss über die verfügbare Streckenkapazität geben, und miteinander verglichen. Das erste Szenario beinhaltet das derzeit auf der untersuchten Strecke verwendete Zugsicherungssystem und dient als Referenz, anhand dessen die Ergebnisse der anderen drei Szenarien gemessen werden. Hier zeigt sich unter anderem, dass es bei gewissen modernen Zugsicherungssystemen kleiner Modifikationen in gewissen Bereichen der Infrastruktur bedarf, um eine Verbesserung der Kapazität gegenüber dem aktuellen System zu erzielen.

Abstract

The following thesis about “ETCS L2/L3 at the main line of the Viennese S-Bahn” deals with possible options regarding the capacity increase of a railway line through the use of modern train control systems. In the beginning, the main line of the Viennese S-Bahn and the most important vehicles operating on it are introduced. OpenTrack, which is a simulation program for rail lines, is used for this introduction.

The main body of this thesis consists of four different scenarios, in which the headway time is calculated. The results of these calculations yield information about the available capacity of the rail line and get compared to each other. The first scenario consists of the current train control system of the main line of the Viennese S-Bahn and acts as a reference by means of which the results of the other three scenarios are being measured. The results include, inter alia, the necessity of small infrastructural modifications of certain train control systems to improve the capacity over the current system.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
1.1	Problemstellung	5
1.2	Ziel der Arbeit/Forschungsfragen	6
1.3	Methoden.....	7
1.4	Untersuchungsraum	7
2	Beschreibung der Wiener S-Bahn-Stammstrecke	9
2.1	Streckeninfrastruktur	9
2.1.1	Allgemeines	9
2.1.2	Infrastruktur in OpenTrack.....	11
2.2	Triebfahrzeuge und Wagenmaterial	13
2.2.1	Reihe 4020	14
2.2.2	Reihe 4024	15
2.2.3	Reihe 4746	17
2.2.4	ÖBB Doppelstock-Wendezug.....	18
2.2.5	Westbahn.....	20
2.2.6	City Airport Train.....	22
2.3	Umsetzung in OpenTrack.....	22
3	Analysen	25
3.1	PZB.....	25
3.1.1	Funktionsprinzip	25
3.1.2	Erreichbare Mindestzugfolgezeiten	33
3.2	ETCS Level 2.....	36
3.2.1	Funktionsprinzip	37
3.2.2	Erreichbare Mindestzugfolgezeiten	45
3.3	ETCS Level 3.....	51
3.3.1	Umsetzung in OpenTrack.....	51
3.3.2	Erreichbare Mindestzugfolgezeiten	51
3.4	ETCS Level 2 mit Blockverdichtung	56
3.4.1	Idee	56
3.4.2	Erreichbare Mindestzugfolgezeiten	59
3.5	Ergebnis der Analysen	64
3.5.1	Einfluss der Heterogenität auf die Kapazität einer Strecke.....	64
3.5.2	Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Analysen	67
4	Conclusio	70
5	Literaturverzeichnis	72
6	Internetquellen	73



7	Abbildungsverzeichnis	75
8	Tabellenverzeichnis	77
9	Abkürzungsverzeichnis	79
10	Anhang.....	80

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Im Laufe der letzten Jahrzehnte sind die Einwohner/-innenzahlen in vielen europäischen Großstädten und speziell in deren Ballungsgebieten angestiegen. Ein Grund, der dazu führt, ist das in vielen Ländern auftretende Phänomen der Landflucht. Zusätzlich ist aus Gründen des Umweltschutzes der Wunsch der Politik in unterschiedlich starker Ausprägung vorhanden, den motorisierten Individualverkehr sukzessive von den Straßen zu nehmen und die Pendler dazu zu bewegen, auf Alternativen auszuweichen. Zu diesen zählen bei kürzeren Strecken die Beschreitung des Weges zu Fuß oder mit dem Rad. Bei längeren zu zurücklegenden Wegen wird der Umstieg vom motorisierten Individualverkehr auf den öffentlichen Verkehr angestrebt, zu denen die U-Bahnen, Straßenbahnen, Busse und S-Bahnen zählen. Während sich die ersten drei Verkehrsmittel für den Verkehr innerhalb einer Stadt eignen, kann das letztgenannte dazu verwendet werden, um den kompletten Ballungsraum zu verbinden und somit eine attraktive, kurz getaktete Verbindung zwischen dem sog. Speckgürtel und der Innenstadt für die Reisenden herzustellen.

Auch in Wien ist dies zu bemerken, wo die Einwohner/-innenzahl im Ballungsgebiet von 1 830 000 Einwohner/-innen im Jahr 2001 auf 2 220 000 im Jahr 2019 angestiegen ist.¹ Neben den öffentlichen Verkehrsmitteln, die hier großenteils nur die Verbindungen innerhalb der Stadtgrenzen herstellen, ist das Wiener S-Bahn-System eine wichtige Verbindung, welche den umliegenden Speckgürtel mit der Stadt verbindet. Ein solcher Bevölkerungszuwachs geht an den öffentlichen Verkehrsmitteln nicht spurlos vorbei. Aufgrund der steigenden Einwohner/-innenzahl des gesamten Ballungsgebietes sowie eines verbesserten Angebotes an öffentlichen Verkehrsmitteln, hat sich die Anzahl der täglich auf der Wiener S-Bahn Stammstrecke Reisenden in den letzten acht Jahren auf bis zu 200 000 verdoppelt. Mit 711 Zugfahrten am Tag ist der Abschnitt zwischen Wien Mitte und Rennweg der am stärksten befahrene der Wiener S-Bahn-Stammstrecke. Die Frequenz ist hier sogar höher als die auf der Wiener U-Bahn-Linie U1.²

Durch diese hohe Anzahl an Zugfahrten pro Tag sind in der Hauptverkehrszeit von 20 Trassen, die pro Richtung und Stunde zur Verfügung stehen, bereits 19 belegt.³ Eine Erhöhung der Kapazität ist somit ohne infrastrukturelle oder fahrzeugseitige Maßnahmen mit den aktuellen Gegebenheiten in der Hauptverkehrszeit nicht mehr möglich. Durch eine Verlängerung der

¹ Vgl. <https://www.citypopulation.de/de/austria/agglo/>, 25.07.2019.

² Vgl. Elsner/Garstenauer, 6/2019, S, 300f.

³ Vgl. Ebenda.

Züge ist dies aufgrund der Bahnsteiglängen entlang der Stammstrecke nur langfristig möglich. Da diese fast an jeder Betriebsstelle auf die Länge einer doppelten Triebwagengarnitur ausgelegt sind, müssten diese kostenintensiv ausgebaut werden, wenn noch längere Garnituren zur Erhöhung der Kapazität eingesetzt werden sollen.

Eine weitere Möglichkeit ist eine infrastruktureitige Maßnahme zur Erhöhung der Trassenanzahl pro Stunde und Richtung. Dadurch können mehr Züge verkehren, was die Kapazität dieser Strecke vergrößert. Es gibt viele Arten, um dies erreichen zu können. Diese reichen von einer Verlängerung der Bahnsteige in den Betriebsstellen bis hin zur Erweiterung der Strecke um ein oder gar zwei Gleise. Da jedoch diese Varianten, aufgrund eines zu großen Platzbedarfs, speziell innerhalb von Städten, nur schwer umsetzbar sind, wird in dieser Arbeit auf die Möglichkeiten eingegangen, die sich zur Kapazitätssteigerung durch den Einsatz moderner Zugsicherungssysteme eignen.

1.2 Ziel der Arbeit/Forschungsfragen

Das erste Ziel dieser Diplomarbeit ist es, die Vorbereitungen zur Simulation von speziellen Szenarien zu treffen. Hierzu gehört die Nachbildung der Infrastruktur der Wiener S-Bahn-Stammstrecke zwischen den Bahnhöfen Wien Meidling und Wien Floridsdorf mithilfe des Simulationsprogrammes „OpenTrack“ und das Anlegen der auf dieser Strecke verkehrenden Fahrzeuge.

Im nächsten Schritt werden die möglichen Mindestzugfolgezeiten auf der Stammstrecke unter der Verwendung verschiedener Zugsicherungssysteme und der Berücksichtigung verschiedenster Fahrzeugtypen simuliert. Begonnen wird hierbei mit dem aktuellen Stand der Strecke, die mit dem Zugsicherungssystem PZB ausgerüstet ist.

Ein weiteres Ziel ist es, die möglichen Mindestzugfolgezeiten unter ETCS Level 2 zu ermitteln. Hierfür werden im Simulationsprogramm die Infrastruktur sowie die Fahrzeuge mit diesem Zugsicherungssystem ausgerüstet. In weiterer Folge wird ermittelt, inwieweit durch eine Blockverdichtung in den Haltestellenbereichen die Mindestzugfolgezeiten bei Verwendung von ETCS Level 2 verbessert werden können und wo die zusätzlichen Blöcke eingefügt werden müssen.

Zum Schluss wird untersucht, welche Mindestzugfolgezeiten unter ETCS Level 3 möglich sind und inwieweit sich diese im Vergleich zum aktuell verwendeten Zugsicherungssystem verringern.

Die jeweiligen zu beantwortenden Forschungsfragen sind:

- Welche Mindestzugfolgezeiten können mit dem aktuellen Zugsicherungssystem PZB auf der Wiener S-Bahn-Stammstrecke erreicht werden?

- Wie ändern sich die Mindestzugfolgezeiten auf der Wiener S-Bahn-Stammstrecke unter Verwendung des Zugsicherungssystems ETCS Level 2?
- Welche Mindestzugfolgezeiten können erzielt werden, wenn in den Haltestellenbereichen der Wiener S-Bahn-Stammstrecke mithilfe von zusätzlichen virtuellen Blöcken die Blockabstände verdichtet werden?
- Welche zusätzlichen Verkürzungen bei den Mindestzugfolgezeiten sind bei einer Umstellung auf ETCS Level 3 mit „Moving Block“ möglich?

1.3 Methoden

Für diese Diplomarbeit wurden als Methoden Literaturrecherchen und Internetrecherchen angewendet, um an Informationen, wie beispielsweise zu den Streckencharakteristika der Stammstrecke, zu gelangen. Diese daraus gewonnenen Daten werden im nächsten Schritt herangezogen, um anhand derer die Wiener S-Bahn-Stammstrecke zwischen den Bahnhöfen Meidling und Floridsdorf nachstellen zu können. Für die Konstruktion dieser Strecke wird das Simulationsprogramm OpenTrack verwendet.

Mithilfe dieses Programmes kann, nach der Erfassung der Infrastruktur und der Triebfahrzeuge, der Zugverkehr auf der Wiener S-Bahn-Stammstrecke simuliert werden. Je nachdem, welche Parameter an der Strecke geändert werden, können die verschiedensten Szenarien simuliert werden. In dieser Arbeit sind dies im Konkreten die Abänderung der Zugsicherungssysteme von PZB auf ETCS Level 2 und Level 3 sowie die sinnvolle Ergänzung einiger Blockabschnitte. Diese Analysen geben daraufhin einen Aufschluss zu den Mindestzugfolgezeiten im jeweiligen Szenario.

1.4 Untersuchungsraum

Räumlich betrachtet grenzt sich der Untersuchungsraum dieser Diplomarbeit ausschließlich auf die Wiener S-Bahn-Stammstrecke zwischen Meidling und Floridsdorf ein. Die angrenzenden Streckenabschnitte werden nicht mehr betrachtet. Es wird somit nicht darauf eingegangen, mit welchen Mindestzugfolgezeiten die Züge über die Stammstrecke hinaus verkehren und ob es dort, aufgrund größerer Blockabschnitte, zu einem Rückstau der Züge kommen kann bzw. die Züge gar nicht in so kurzen Intervallen in den Untersuchungsraum einfahren können.

Mittels OpenTrack werden die Mindestzugfolgezeiten der Züge ermittelt, die ausschließlich auf diesem Streckenabschnitt verkehren. Diese Berechnungen geschehen unter der Berücksichtigung dreier verschiedener Zugsicherungssysteme. Das erste ist die PZB, mit der

die Strecke derzeit ausgerüstet ist. Dies dient zur Erfassung des Ist-Zustandes und stellt die Referenz für alle weiteren Ausrüstungsszenarien dar.

Im nächsten Schritt werden die Zugfolgezeiten unter der Verwendung von ETCS Level 2 ermittelt. In weiterer Folge wird versucht, diese durch eine Blockverdichtung im Haltestellenbereich gegenüber der PZB noch weiter zu verringern. Durch die Führerstandsignalisierung in den Fahrzeugen ist es möglich, die Blockabstände durch die Einfügung von virtuellen Blöcken weit unter die Bremsweglänge herabzusetzen, d.h. der Bremsweg kann sich über mehrere, kürzere Blöcke erstrecken.

Das dritte in dieser Arbeit untersuchte Zugsicherungssystem ist das ETCS Level 3, in welchem keine klassischen festen Blöcke, sondern nur mehr sogenannte „Moving Blocks“ existieren. Dies ermöglicht es, nicht auf ortsfeste Blöcke, sondern auf Bremsabstand zum vorderen Fahrzeug zu fahren.

Es wird somit ausschließlich darauf eingegangen, welche Einflüsse die Verwendung verschiedenster Zugbeeinflussungssysteme, bei ETCS Level 2 zusätzlich mit einer Betrachtung der Blockverdichtung im Haltestellenbereich, auf die Mindestzugfolgezeiten hat. Nicht betrachtet wird, welche fahrzeugseitigen Änderungen durchgeführt werden müssten, um die Kapazität dieser Strecke zu erhöhen. Hierzu würde beispielsweise eine stärkere Beschleunigung und Verzögerung der Fahrzeuge oder die Verwendung von mehr bzw. breiteren Türen für einen zügigeren Fahrgastwechsel in den Bahnhöfen und Haltestellen zählen. Dem Einsatz stärkerer Fahrzeuge sind allerdings Grenzen gesetzt, da die Beschleunigungs- und Verzögerungswerte schon heute die Komfortgrenze für stehende Reisende erreicht haben. Weiters werden infrastrukturelle Maßnahmen zur Erhöhung der Kapazität, mit Ausnahme einer Blockverdichtung im Haltestellenbereich, in dieser Diplomarbeit nicht betrachtet.

2 Beschreibung der Wiener S-Bahn-Stammstrecke

Zu Beginn dieser Diplomarbeit wird in den nachfolgenden Unterkapiteln die Wiener S-Bahn-Stammstrecke anhand der Infrastruktur, der eingesetzten Triebfahrzeuge und des Wagenmaterials kurz vorgestellt.

2.1 Streckeninfrastruktur

2.1.1 Allgemeines

Als Wiener S-Bahn-Stammstrecke wird das Teilstück der Strecken 114 und 122 zwischen den Bahnhöfen Wien Meidling und Floridsdorf bezeichnet. Bei diesem Abschnitt kommen mehrere S-Bahn-Linien aus verschiedenen Richtungen auf zwei Gleisen zusammen. In der Abbildung 1 ist dies anhand einer graphischen Übersicht der wichtigsten Nahverkehrslinien im Großraum Wien zu erkennen. In Blau und Grün sind alle Linien des Wiener S-Bahn-Netzes abgebildet. Die Stammstrecke ist in strichliertem Rosa gekennzeichnet. Von Norden münden in Floridsdorf die S-Bahn-Linien S1 aus Gänserndorf, S2 und S7 aus Laa an der Thaya bzw. Mistelbach, S3 aus Hollabrunn bzw. Stockerau sowie S4 aus Absdorf-Hippersdorf bzw. Stockerau ein. Bis zum Bahnhof Wien Meidling verkehren diese Linien gemeinsam auf der Stammstrecke. Eine Ausnahme bildet lediglich die Linie S7, die im Bahnhof Rennweg abzweigt und Richtung Flughafen Wien und Wolfsthal weitergeführt wird. Am südlichen Ende der Stammstrecke, dem Bahnhof Wien Meidling, trennen sich die S-Bahn-Linien wieder. Die S1 wendet direkt im Bahnhof Wien Meidling, die S2 verkehrt weiter nach Mödling und die S3 sowie S4 nach Wiener Neustadt Hbf.⁴

⁴ Vgl. https://www.oebb.at/dam/jcr:cc6cd585-cb39-4fdd-9039-9c88ff53ab2d/liniennetz_w-noe-bgld.pdf, 23.06.2019.

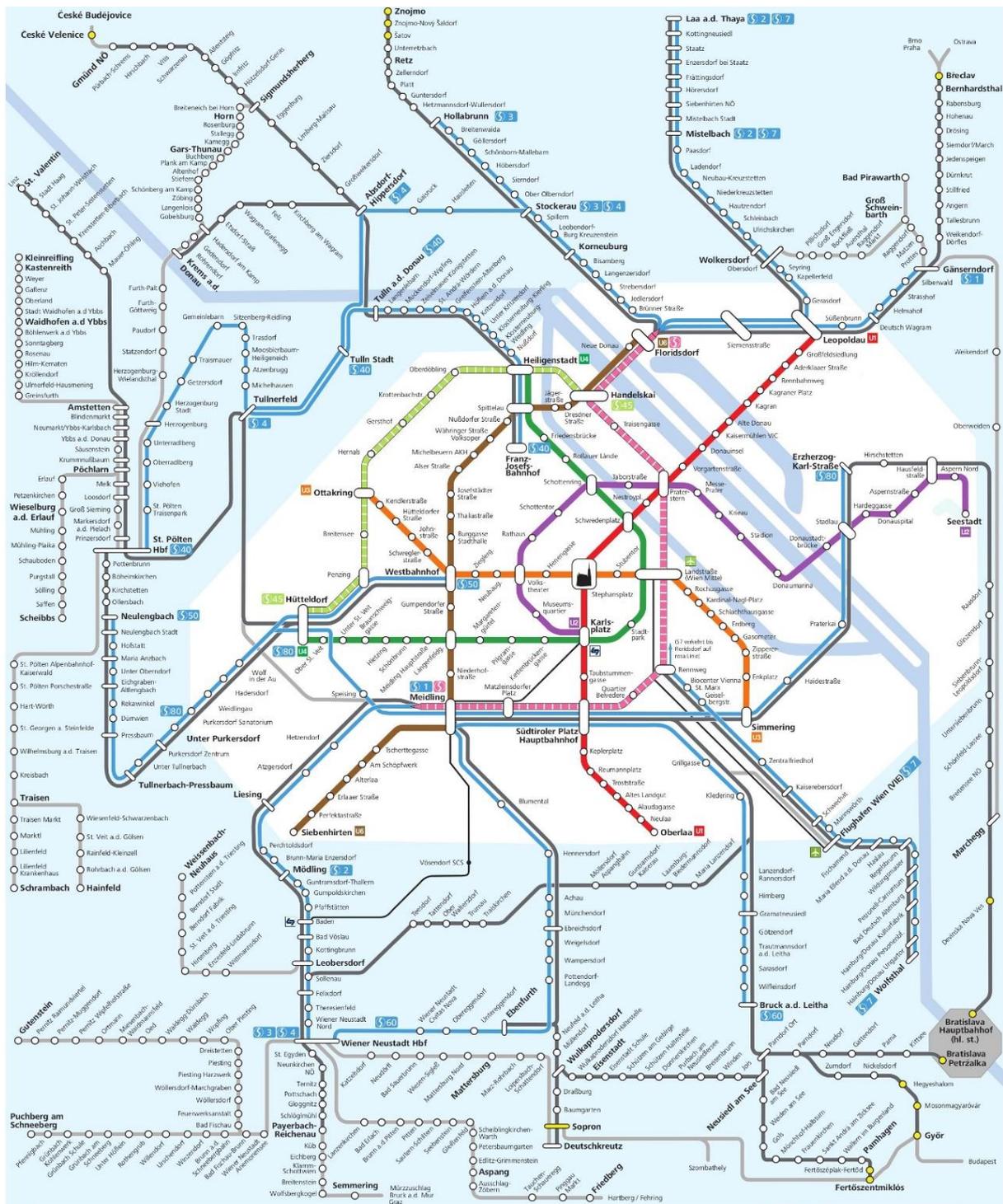


Abbildung 1: Übersichtskarte Nahverkehr im Großraum Wien⁵

⁵ Vgl. https://www.oebb.at/dam/jcr:cc6cd585-cb39-4fdd-9039-9c88ff53ab2d/liniennetz_w-noe-bgld.pdf, 23.06.2019.

2.1.2 Infrastruktur in OpenTrack

Im ersten Schritt wurde für diese Arbeit die Infrastruktur mithilfe des Simulationsprogrammes OpenTrack nachgebaut.⁶ Um dies umsetzen zu können, wurden die wichtigsten Infrastrukturdaten von der Open Railway Map herangezogen. Mithilfe dieser Quelle ist es möglich, unter anderem die Lage der Weichen, die maximal zulässigen Geschwindigkeiten und die Lage der Signale bestimmen zu können.⁷

Bei der Umsetzung der Infrastruktur in das Simulationsprogramm OpenTrack wurde darauf geachtet, dass diese in Richtung 1, also vom jeweiligen Streckenausgang zum Streckenende, konstruiert wird. In der Simulation wurden als Startpunkt die im Bahnhof Wien Meidling den Bahnsteig nach Westen begrenzenden Zwischensignale L2, L4, L6, L8 und L10 definiert. Da es in Wien Meidling ausschließlich von den Gleisen 2, 4, 6, 8 und 10 aus möglich ist, auf die beiden Gleise der Stammstrecke sowie auf den nördlich vom TS-Werk Matzleinsdorf verlaufenden Gleis der Strecke 105 zu gelangen, wurden nur diese fünf Gleise, statt der tatsächlich vorhandenen acht, abgebildet. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sowie der Tatsache, dass die auf der Stammstrecke verkehrenden Züge nicht durch das TS-Werk Matzleinsdorf verkehren, wurden in OpenTrack ausschließlich die Ein- und Ausfahrten des Werkes von den Betriebsstellen Wien Meidling und Wien Matzleinsdorfer Platz aus angedeutet. Das gesamte TS-Werk wurde nicht nachgebildet. In Wien Meidling besteht die Möglichkeit, von Gleis 2 aus auf den südlich des TS-Werks Matzleinsdorf verlaufenden Teil der Strecke 105 zu wechseln.

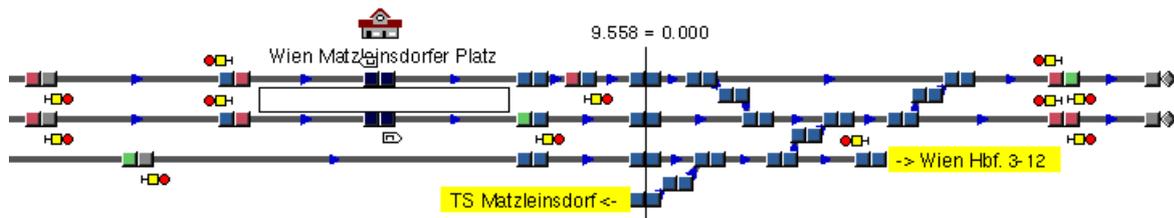
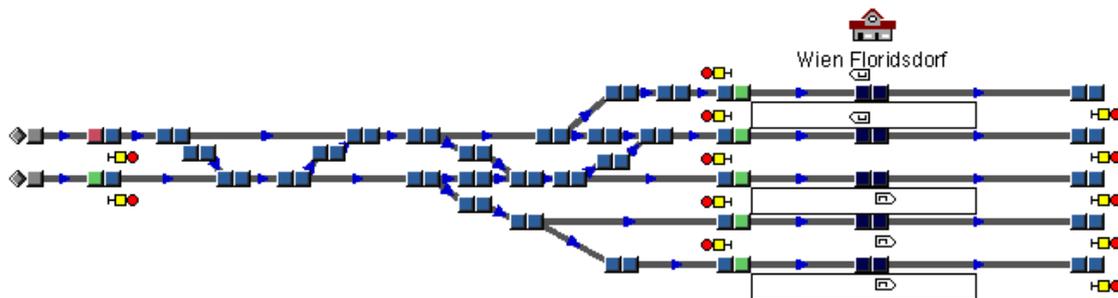
In Wien Matzleinsdorfer Platz zweigt das dritte Gleis in Richtung Wien Hbf. Gl. 3-12 ab, was in der Simulation als „Ein- bzw. Ausfahrt“ gekennzeichnet wurde. Ab dieser Betriebsstelle ist die konstruierte Strecke, mit Ausnahme der Bahnhöfe Wien Mitte und Wien Praterstern, durchgehend zweigleisig. Im weiteren Verlauf der Stammstrecke existieren noch zwei weitere Ein- bzw. Ausfahrten, die in OpenTrack nachgebildet wurden. Zum einen ist das eine weitere Verbindung zum oberen Teil des Wiener Hauptbahnhofes zwischen den Betriebsstellen Wien Matzleinsdorfer Platz und Wien Hbf. – Südtiroler Platz, zum anderen die Abzweigung der Strecke 191 im Bahnhof Rennweg, die über den Flughafen Wien nach Wolfsthal führt.

Danach verläuft die Strecke über die Bahnhöfe Wien Mitte und Praterstern sowie über die Haltestellen Traisengasse und Handelskai nach Wien Floridsdorf, der mit allen fünf vorhandenen Gleisen nachgebildet wurde. Als Endpunkt für die Simulation wurden hier, wie auch in Meidling, die den Bahnsteig in Richtung Osten begrenzenden Zwischensignale E1 – E5 herangezogen.

⁶ Vgl. http://www.opentrack.ch/opentrack/opentrack_d/opentrack_d.html, 27.07.2019.

⁷ Vgl. <https://www.openrailwaymap.org/>, 27.07.2019.

Im Anhang 1 ist, mit Ausnahme der bereits erwähnten Vereinfachungen in Wien Meidling und Matzleinsdorf, das mit OpenTrack erstellte komplette Gleisbild der Stammstrecke zwischen den Bahnhöfen Wien Meidling und Wien Floridsdorf abgebildet. Mit den gelb hinterlegten Beschriftungen der Ein- und Ausfahrten, den Darstellungen der Bahnsteige und der Markierung der Kilometerbrüche bei Wien Matzleinsdorfer Platz, zwischen Quartier Belvedere und Rennweg sowie in Wien Praterstern wurde das Gleisbild optisch ansprechender und übersichtlicher gestaltet. In den nachfolgenden beiden Abbildungen sind zwei Bereiche aus dem erstellten Gleisbild zu sehen. Die Abbildung 2 zeigt den Bereich um Wien Matzleinsdorfer Platz, in dem die angedeuteten Gleisverbindungen zum TS-Werk Matzleinsdorf und dem oberen Wien Hbf. sowie ein Kilometerbruch gekennzeichnet sind. In der Abbildung 3 ist anhand des Bahnhofes Wien Floridsdorf verdeutlicht, wie die Infrastruktur in der Simulation mit den bereits erwähnten Zwischensignalen begrenzt wird. Die in OpenTrack eingezeichneten Bahnsteige dienen ausschließlich der Kennzeichnung der Lage und sind nicht maßstabsgetreu abgebildet.

Abbildung 2: Gleisplan Wien Matzleinsdorfer Platz⁸Abbildung 3: Gleisplan Wien Floridsdorf⁹⁸ Eigene Darstellung.⁹ Eigene Darstellung.

2.2 Triebfahrzeuge und Wagenmaterial

Nachdem im vorherigen Kapitel die Infrastruktur beschrieben wurde, wird nun das Augenmerk auf die Fahrzeuge gelegt, die im Fahrplanjahr 2019 auf der Stammstrecke verkehren. Es werden in den nachfolgenden Unterkapiteln mit einer Ausnahme die Fahrzeuge vorgestellt, die in der Simulation zur Ermittlung der Mindestzugfolgezeiten berücksichtigt wurden.

Um die Fahrdynamik eines Triebfahrzeuges bzw. eines Triebwagens darstellen zu können, eignet sich ein Zugkraft-Geschwindigkeits-Diagramm (z-v oder F-v Diagramm). Dies stellt einen Zusammenhang zwischen den Größen Zugkraft und Geschwindigkeit dar. Des Weiteren werden dadurch folgende Kennwerte sichtbar:¹⁰

- Maximale Anfahrzugkraft:
Dies ist der Punkt, an dem der lineare Teil die y-Achse des Diagrammes schneidet.
- Maximale Reibungszugkraft:
Dies ist die Kraft, die mit der Reibung von dem Triebfahrzeug auf die Schiene übertragen werden kann.
- Motorleistung:
Diese wirkt sich auf das Gefälle des zweiten, parabolischen Teiles aus.
- Höchstgeschwindigkeit des Triebfahrzeuges¹¹

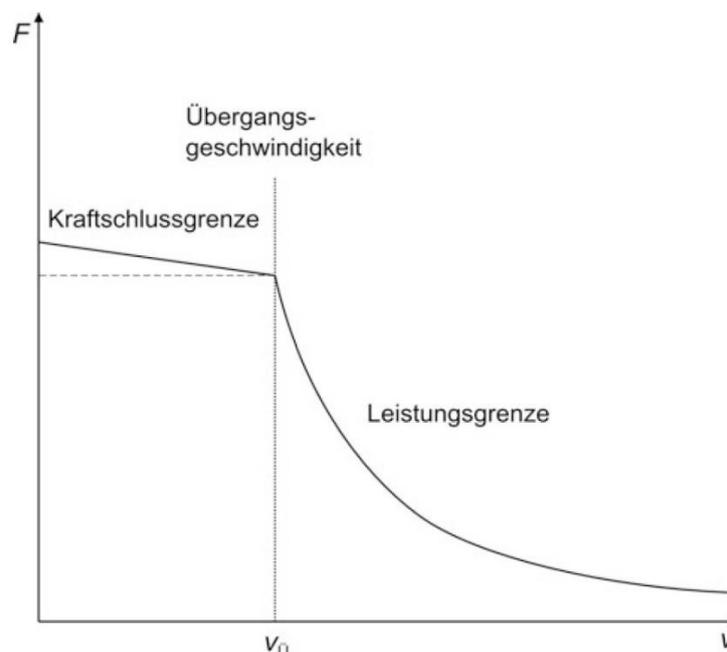


Abbildung 4: Beispiel eines Zugkraftdiagrammes¹²

¹⁰ Vgl. Pachi, 2016, S.22f.

¹¹ Vgl. Hürlimann, 2001, S.51

¹² Pachi, 2016, S.22.

Wie anhand des z-v-Diagrammes in der Abbildung 4 ersichtlich wird, besteht dieses grundsätzlich aus zwei Bereichen. Der erste, lineare Teil ist der der Reibungszugkraft und hängt, neben der Zugkraft der Lokomotive, vom Reibbeiwert zwischen Rad und Schiene ab. Je kleiner dieser Wert ist, umso schlechter kann die Kraft des Triebfahrzeuges auf die Schiene übertragen werden. Der zweite, parabolische Teil ist der der Leistungszugkraft und hängt von der Motorleistung ab. Dieser Bereich wird durch eine senkrechte Linie abgegrenzt, welche die zulässige Höchstgeschwindigkeit des Triebfahrzeuges kennzeichnet. Die Stelle, an der sich die beiden Kurven schneiden, wird Übergangsgeschwindigkeit genannt.¹³

In den nachfolgenden Unterkapiteln ist jeder Baureihe das dazugehörige z-v Diagramm beigelegt.

2.2.1 Reihe 4020

Zu den ältesten auf der Wiener S-Bahn-Stammstrecke verkehrenden Fahrzeugen zählt die Reihe 4020 der ÖBB. Diese dreiteilige Elektrotriebwagengarnitur, bestehend aus einem Triebwagen, Zwischenwagen und Steuerwagen, ist seit 1978 in Betrieb und wird hauptsächlich für den S-Bahn-Verkehr im Raum Wien und anderen Großstädten eingesetzt.¹⁴

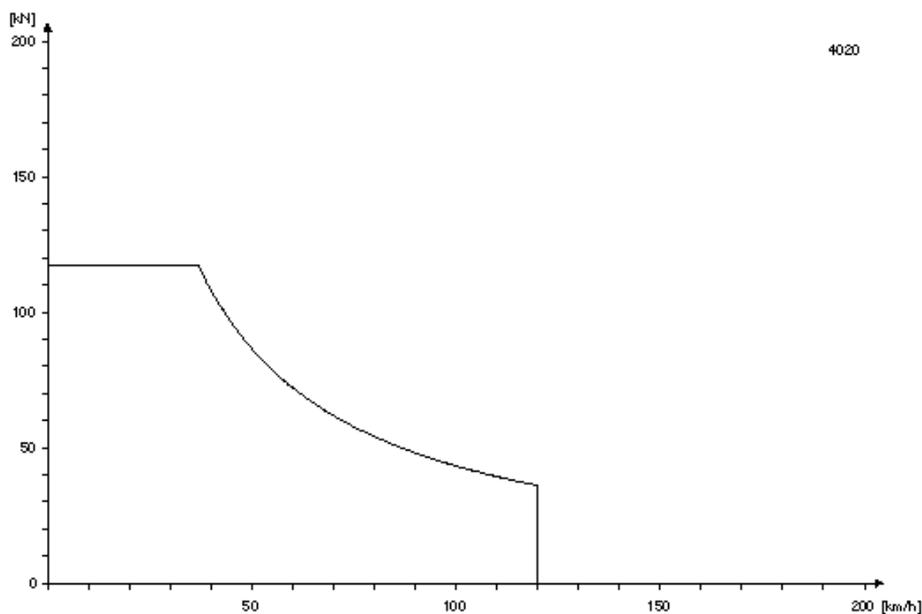


Abbildung 5: Zugkraftdiagramm der Reihe 4020¹⁵

¹³ Vgl. Pachi, 2016, S.22f.

¹⁴ Vgl. <http://www.eisenbahn.gerhard-obermayr.com/oebb/die-oebb-fahrzeuge/elektrotriebwagen/4020/>, 23.06.2019.

¹⁵ Eigene Darstellung in OpenTrack.

Die dreiteilige Einfachgarnitur hat folgende technische Daten:

- Hersteller: Simmering-Graz-Pauker AG
- Länge über Kupplung: 69,4 m
- Eigengewicht: 129 t
- V_{\max} : 120 km/h
- Sitzplätze: 184

Auf der Stammstrecke verkehrt dieser Triebwagen in der Regel als Doppelgarnitur, wie es in der Abbildung 6 zu sehen ist.



Abbildung 6: Doppelgarnitur der Reihe 4020¹⁶

2.2.2 Reihe 4024

Um die in die Jahre gekommenen Personenwagen und Altbautriebwagen zu ersetzen, beschloss die ÖBB Personenverkehr um die Jahrtausendwende, moderne Niederflurfahrzeuge zu beschaffen. Die Entscheidung ist dabei auf den Elektrotriebwagen „Talent“ gefallen, von dem 2004 die ersten Fahrzeuge in drei verschiedenen Arten an die ÖBB geliefert wurden. Die Reihe 4023 war die dreiteilige, die Reihe 4024 die vierteilige und die Reihe 4124 die Mehrsystemvariante des Elektrotriebwagens, die für den Verkehr in Richtung Ungarn konzipiert war.¹⁷

Die Einfachgarnitur hat folgende technische Daten:

¹⁶ Erhart, Maximilian.

¹⁷ Vgl. <http://blog.oebb.at/talente-fuer-die-oebb-die-reihen-4023-4024-und-4124/>, 23.06.2019.

- Hersteller: Bombardier
- Länge über Kupplung: 69 m
- Eigengewicht: 116 t
- V_{\max} : 140 km/h
- Sitzplätze: 199

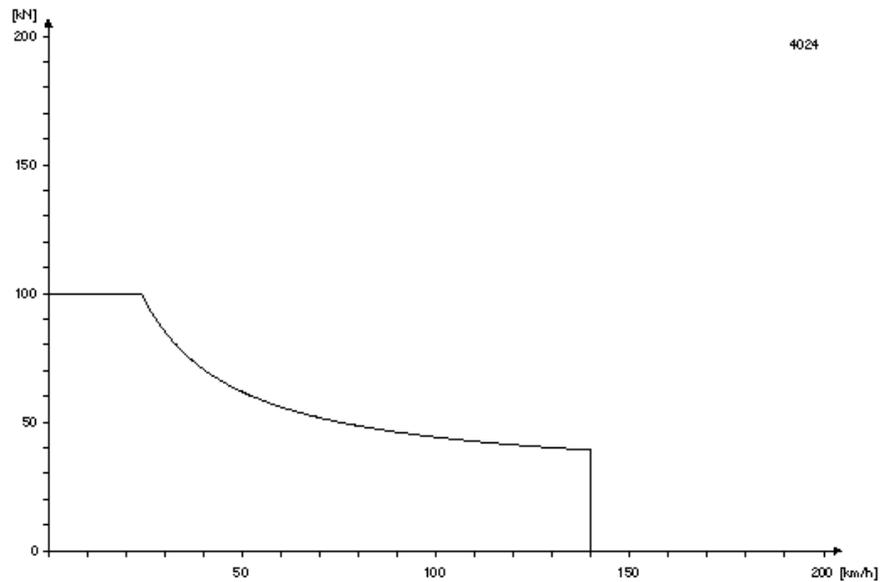


Abbildung 7: Zugkraftdiagramm der Reihe 4024¹⁸

Wie auch die vorhin erwähnte Reihe 4020, verkehrt dieser Elektrotriebwagen der Reihe 4024 auf der Wiener Stammstrecke als Doppelgarnitur, was in der Abbildung 8 ersichtlich wird.



Abbildung 8: Doppelgarnitur der Reihe 4024¹⁹

¹⁸ Eigene Darstellung in OpenTrack.

¹⁹ Erhart, Maximilian.

2.2.3 Reihe 4746

Die derzeit modernsten auf der Stammstrecke verkehrenden Garnituren sind die dreiteiligen Elektrotriebwagen der Reihe 4746, die seit 2015 in Österreich im Einsatz sind. Wie auch bei der vorhin vorgestellten Reihe 4024 ist das Ziel deren Beschaffung jenes, die in die Jahre gekommenen und nicht mehr zeitgemäßen Fahrzeuge durch modernere Niederflurfahrzeuge zu ersetzen.

Auch bei diesem Triebwagen des Typs Desiro ML gibt es verschiedene Varianten. Die Reihe 4744 ist mit vier Türen an jeder Seite ausgestattet und wird überwiegend für den Regionalverkehr eingesetzt. Die Reihe 4746 hingegen, die über sechs Türen an jeder Seite verfügt, verkehrt hauptsächlich im S-Bahn-Verkehr in den Ballungsräumen.^{20,21}

Die dreiteilige Einfachgarnitur hat folgende technische Daten:

- Hersteller: Siemens Mobility
- Länge über Kupplung: 75,2 m
- Gewicht: 144 t
- V_{\max} : 160 km/h
- Sitzplätze: 244

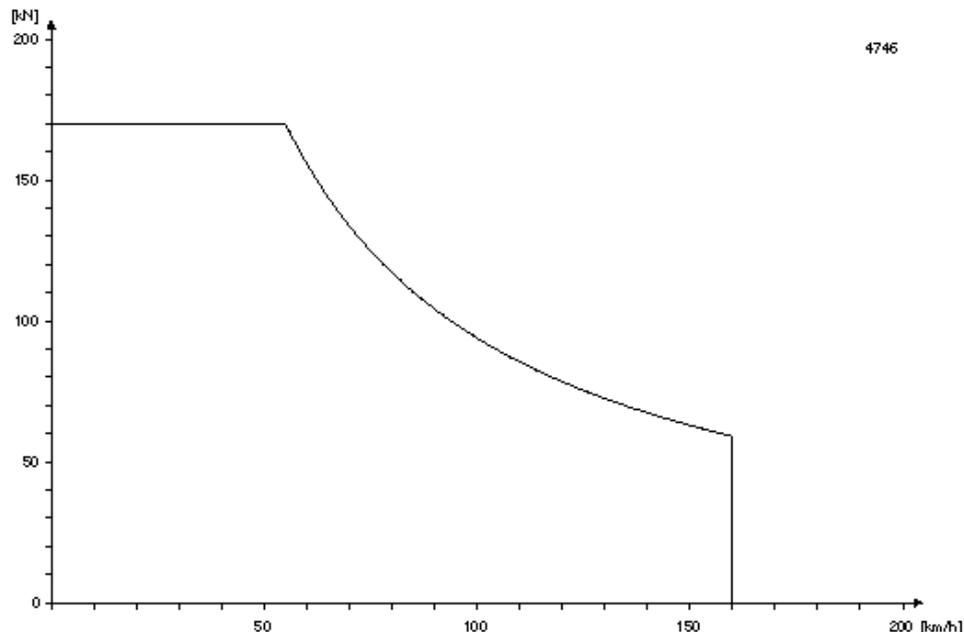


Abbildung 9: Zugkraftdiagramm der Reihe 4746²²

²⁰ Vgl. <https://www.siemens.com/press/pool/de/pressemitteilungen/2013/infrastructure-cities/IC20130130001d.pdf>, 24.06.2019.

²¹ Vgl. <https://www.mobility.siemens.com/mobility/global/SiteCollectionDocuments/de/rail-solutions/commuter-and-regional-trains/desiro-platform/datasheet-desiro-oebb-de.pdf>, 24.06.2019.

²² Eigene Darstellung in OpenTrack.

Dieser Triebwagen verkehrt, wie auch die anderen in den vorhergehenden Kapiteln vorgestellten Fahrzeuge, auf der Wiener Stammstrecke in der Regel in Doppeltraktion. Die Abbildung 10 verdeutlicht dies ebenfalls.



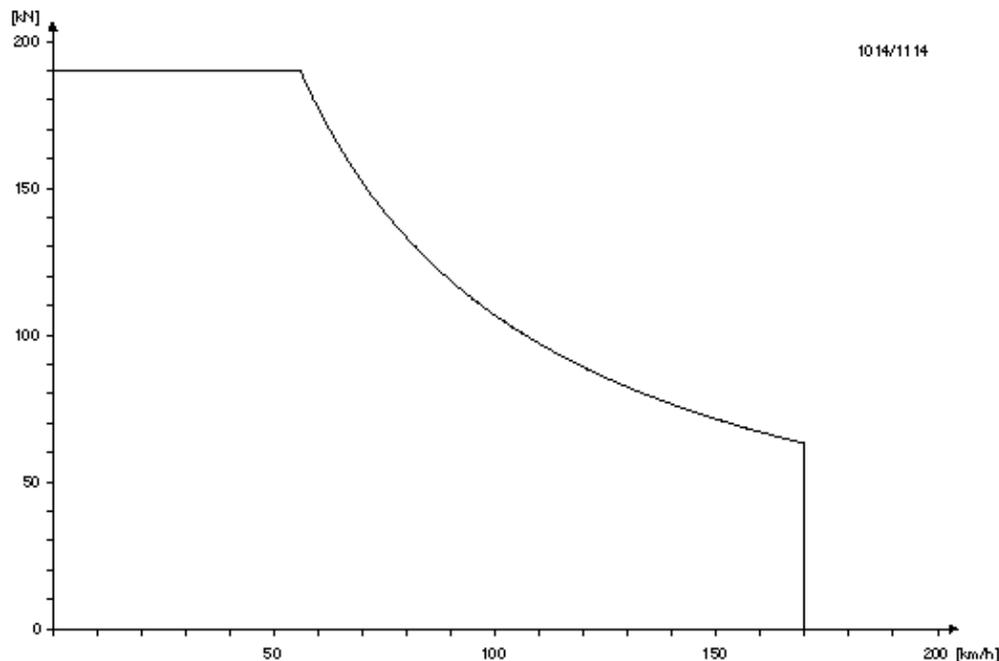
Abbildung 10: Doppelgarnitur der Reihe 4746²³

2.2.4 ÖBB Doppelstock-Wendezug

Um die steigende Anzahl an Pendlern und die damit verbundene Erhöhung der Fahrgäστεanzahl bewältigen zu können, entschloss sich die ÖBB im Jahr 1994 zur Beschaffung neuer Garnituren. Ein Jahr später erhielt die ARGE Doppelstockwagen, die eine Kooperation von Siemens SGP Verkehrstechnik und der Jenbacher-Transportsysteme war, den Zuschlag zur Herstellung dieses Wagenmaterials. Der große Vorteil dieser Garnitur ist die größere Kapazität bei gleicher Länge im Vergleich zum herkömmlichen Wagenmaterial. Dadurch war es möglich, mehr Passagiere zu transportieren, ohne die Zug- und Bahnsteiglängen vergrößern zu müssen. Des Weiteren ist durch den Niederflureinstieg sowie die breiten Türen ein schnellerer Passagierwechsel an den Bahnsteigen und ein erleichtertes Ein- und Aussteigen für mobilitätseingeschränkte Personen möglich.²⁴

²³ <https://www.bahnbilder.de/1200/oebb-4746-068--4746-1153134.jpg>, 25.06.2019.

²⁴ Vgl. <http://www.eisenbahn.gerhard-obermayr.com/oebb/die-oebb-fahrzeuge/reisezugwagen/city-shuttle-zweistoeckig/>, 25.06.2019.

Abbildung 11: Zugkraftdiagramm der Reihe 1144²⁵

Bei den ÖBB wurden ab dem Jahr 1997 die Doppelstockwenzüge für den regionalen Zubringerverkehr in die Ballungszentren eingesetzt. Auf der Wiener Stammstrecke sind diese Garnituren in der Regel fünfteilig, mit einem Steuerwagen und vier Zwischenwagen, unterwegs. Als Lokomotiven werden für gewöhnlich die Baureihen 1142, 1144, 1016 oder 1116, sowie für nicht elektrifizierte Strecken die dieselelektrische Lokomotive der Baureihe 2016 herangezogen. Für die Simulation in OpenTrack wurde als Doppelstockgarnitur die fünfteilige Variante mit einer Lokomotive der Baureihe 1144 verwendet, die in dieser Konstellation regelmäßig auf der Wiener Stammstrecke vorzufinden ist. Diese Garnitur, wie sie auch in der Abbildung 12 veranschaulicht wurde, hat folgende technische Daten:

- Hersteller: Siemens SGP Verkehrstechnik und Jenbacher-Transportsysteme
- Länge über Puffer: 150 m
- Gewicht: 325 t
- V_{\max} : 140 km/h
- Sitzplätze: 558

²⁵ Eigene Darstellung in OpenTrack.

Abbildung 12: Fünfteilige Doppelstockgarnitur mit Lokomotive der Baureihe 1144²⁶

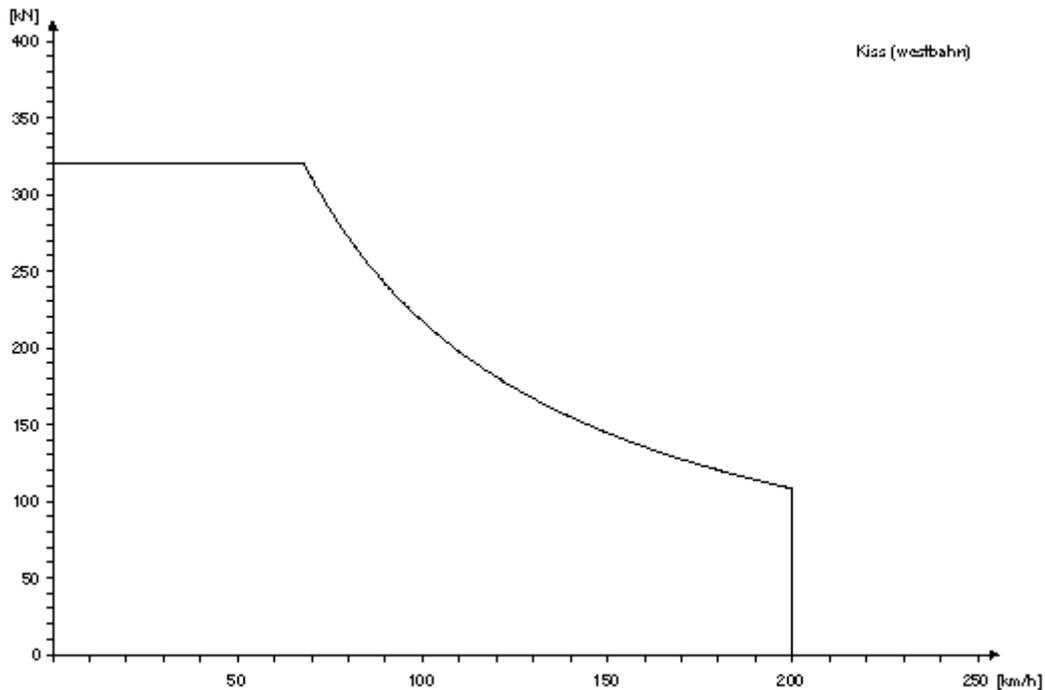
2.2.5 Westbahn

Mit der Liberalisierung der Bahnen in der Europäischen Union wurde 2008 die Westbahn als erste operative Tochtergesellschaft der Rail Holding AG gegründet. Ab Ende 2011 wurde damit begonnen, im Stundentakt die Städte Wien und Salzburg miteinander zu verbinden und somit mit der ÖBB im Personenverkehr auf dieser Strecke zu konkurrieren. Nachdem die Fahrzeugflotte mehr als verdoppelt wurde, kann seit Ende 2017 ein Halbstundentakt auf dieser Strecke angeboten werden. Die Westbahn fährt seitdem im Stundentakt zwischen Wien Westbahnhof und Salzburg Hbf. und neu eine halbe Stunde versetzt im Stundentakt zwischen Wien Praterstern und Salzburg Hbf. Somit erreicht die Westbahn auch die Wiener Stammstrecke im Abschnitt Wien Meidling und Wien Praterstern und wird in dieser Arbeit bei der Ermittlung der Mindestzugfolgezeiten ebenfalls berücksichtigt.^{27,28}

²⁶ Erhart, Maximilian.

²⁷ Vgl. <https://westbahn.at/unternehmen/ueber-westbahn/>, 26.06.2019.

²⁸ Vgl. <http://fahrplan.oebb.at/bin/query.exe/dn?>, 26.06.2019.

Abbildung 13: Zugkraftdiagramm der Reihe Kiss²⁹

Für die Westbahn sind derzeit 16 vier- und sechsteilige Niederflur-Doppelstocktriebwagen vom Typ „Kiss“ der Firma Stadler Rail AG im Einsatz.³⁰ Die sechsteiligen Garnituren haben, wie auch im Beispiel in Abbildung 14 ersichtlich ist, folgende technische Daten:

- Hersteller: Stadler Rail AG
- Länge über Kupplung: 150m
- Gewicht: 296 t
- Vmax: 200 km/h
- Sitzplätze: 501³¹

²⁹ Eigene Darstellung in OpenTrack.

³⁰ Vgl. <https://westbahn.at/fragen-antworten/faq/die-westbahn/>, 26.06.2019.

³¹ Vgl. https://www.tuv-akademie.at/fileadmin/dateien/Downloads/08_EBT_120202_Zulassungskonzept_des_Stadler_Doppelstockzuges_KISS_Starlinger.pdf, 26.06.2019.



Abbildung 14: Sechsteilige Doppelstockgarnitur „Kiss“ der Westbahn³²

2.2.6 City Airport Train

Im Dezember des Jahres 2003 startete der City Airport Train den Betrieb zwischen Wien und dem Flughafen Wien mit dem Ziel, möglichst viele Fluggäste mit einer schnellen Zugverbindung per Schiene in das Wiener Stadtzentrum zu befördern. Die eingesetzten Doppelstockgarnituren verkehren im Halbstundentakt ohne Aufenthalt zwischen den Bahnhöfen Wien Mitte und Flughafen Wien und benötigen für diese Strecke 16 Minuten.³³

Da dieser Zug die Wiener Stammstrecke einen nur sehr kurzen Teil befährt, nämlich im Abschnitt Wien Mitte bis zur Abzweigung in Richtung Flughafen in Rennweg, wurde dieser Zug in der Simulation nicht berücksichtigt.

2.3 Umsetzung in OpenTrack

Nach der Fertigstellung der Infrastruktur im Simulationsprogramm wurde damit begonnen, die Fahrwege für die Züge anzulegen. Für OpenTrack muss dies in den folgenden drei Schritten erfolgen:

■ Routes (Zugfahrstraßen):

Die Routes sind die kleinste Einheit der Fahrwege. Diese verbinden ausschließlich zwei Hauptsignale in derselben Fahrtrichtung miteinander und können mit verschiedensten Attributen, wie beispielsweise Auflösezeiten, Fahrbegriffen und Langsamfahrzonen, versehen werden.

³² Erhart, Maximilian.

³³ Vgl. <https://web.archive.org/web/20130927052541/http://austrianaiviation.net/news-regional/news-detail/datum/2009/01/14/5-jahre-city-airport-train.html>, 26.06.2018.

■ Paths (Pfade):

Die nächstgrößere Einheit sind die Paths, welche eine Gruppierung aufeinanderfolgender Routes darstellen. Diese sind in OpenTrack eine rein organisatorische Struktur, da sie in der realen Eisenbahnwelt keine Anwendung finden. Bei der Abbildung der Wiener S-Bahn-Stammstrecke wurden die Paths grundsätzlich von einem Einfahrsignal zum Einfahrsignal des darauffolgenden Bahnhofes gezogen. Eine Ausnahme bildeten Betriebsstellen auf der freien Strecke, wie beispielsweise Überleitstellen oder Abzweigstellen. Dort wurden die Paths unterbrochen, also vom Einfahrsignal des ersten Bahnhofes bis zum Deckungssignal, und dann von dort an als zweiten Path bis zum Einfahrsignal des darauffolgenden Bahnhofes errichtet.

■ Itineraries (Fahrwege):

Im letzten Schritt wurden Itineraries angelegt. Diese bestehen aus mehreren hintereinanderliegenden Paths, die zu einer Itinerary zusammengefasst werden. Die Fahrwege werden verwendet, um einen kompletten Zuglauf („course“) von einem Startpunkt A zu einem Zielpunkt B vorzugeben. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, durch kürzere, lokale Itineraries Umleitungen zu definieren, die im Falle von Gleissperren oder zu dispositiven Zwecken alternativ verwendet werden können.

In der Simulation der Wiener S-Bahn-Stammstrecke wurden folgende Itineraries angelegt:

- S-Bahn von Wien Meidling, Gleis 506, am Regelgleis über Wien Mitte, Gleis 134, und Wien Praterstern, Gleis 224, nach Wien Floridsdorf, Gleis 103.
- S-Bahn von Wien Floridsdorf, Gleis 102, am Regelgleis über Wien Praterstern, Gleis 221, und Wien Mitte, Gleis 131, nach Wien Meidling, Gleis 508.
- Westbahn von Wien Meidling, Gleis 504, am Regelgleis über Wien Mitte, Gleis 134, nach Wien Praterstern, Gleis 222.
- Westbahn von Wien Praterstern, Gleis 222, am Regelgleis über Wien Mitte, Gleis 131 nach Wien Meidling, Gleis 502.

Da im Zuge dieser Arbeit die Mindestzugfolgezeiten ausschließlich für Fahrten am Regellaufweg bestimmt und Gleissperren nicht berücksichtigt werden, wurden für die verkehrenden Züge keine lokalen Itineraries für Umleitungen angelegt.³⁴

Nach der Anlegung der Fahrwege können diese auch den auf der Strecke verkehrenden Garnituren zugewiesen werden, die bereits in Kapitel 2.2 vorgestellt wurden. Um den Einfluss der Haltezeiten für den Fahrgastwechsel in den Bahnhöfen und Haltestellen auf die Mindestzugfolgezeiten ermitteln zu können, wurden für die Analysen jeweils zwei Züge pro Garnitur und Richtung erstellt. Beim ersten Zug wurde eine Haltezeit von 30 s, beim zweiten von 60 s angenommen. In der Tabelle 1 sind die erstellten Züge im Detail mit den Garnituren,

³⁴ Vgl. Hürlimann, 2019, S.43ff.

Relationen und Haltezeiten aufgelistet. Die Zugnummern wurden an die der real auf der S-Bahn-Stammstrecke verkehrenden Züge angelehnt.

Zugnummer	Garnitur	Relation	Haltezeit [s]
800	Stadler „Kiss“ - Westbahn	Meidling – Praterstern	60
801	Stadler „Kiss“ - Westbahn	Praterstern – Meidling	60
810	Stadler „Kiss“ - Westbahn	Meidling – Praterstern	30
811	Stadler „Kiss“ - Westbahn	Praterstern – Meidling	30
2300	ÖBB Doppelstockwendezug	Meidling - Floridsdorf	60
2301	ÖBB Doppelstockwendezug	Floridsdorf - Meidling	60
2310	ÖBB Doppelstockwendezug	Meidling - Floridsdorf	30
2311	ÖBB Doppelstockwendezug	Floridsdorf - Meidling	30
22000	ÖBB 4020	Meidling - Floridsdorf	60
22001	ÖBB 4020	Floridsdorf - Meidling	60
22010	ÖBB 4020	Meidling - Floridsdorf	30
22011	ÖBB 4020	Floridsdorf - Meidling	30
24000	ÖBB 4024	Meidling - Floridsdorf	60
24001	ÖBB 4024	Floridsdorf - Meidling	60
24010	ÖBB 4024	Meidling - Floridsdorf	30
24011	ÖBB 4024	Floridsdorf - Meidling	30
25000	ÖBB 4746	Meidling - Floridsdorf	60
25001	ÖBB 4746	Floridsdorf - Meidling	60
25010	ÖBB 4746	Meidling - Floridsdorf	30
25011	ÖBB 4746	Floridsdorf - Meidling	30

Tabelle 1: Auflistung der für die Simulation erstellten Züge³⁵

³⁵ Eigene Darstellung.

3 Analysen

Nach der Vorstellung der Infrastruktur der Wiener S-Bahn-Stammstrecke und des darauf verkehrenden Wagenmaterials im vorhergehenden Kapitel widmet sich dieser Punkt nun mit den im Simulationsprogramm OpenTrack durchgeführten Analysen. Diese wurden in Abhängigkeit von unterschiedlichen Zugsicherungssystemen durchgeführt und miteinander verglichen.

3.1 PZB

Um einen Vergleich darstellen zu können, inwieweit sich die Mindestzugfolgezeiten durch die Verwendung modernerer Zugsicherungssysteme verändern lassen, wird im ersten Schritt der aktuelle Stand der Infrastruktur analysiert. Im derzeitigen Zustand ist die Wiener S-Bahn-Stammstrecke mit dem Zugsicherungssystem PZB ausgestattet.

3.1.1 Funktionsprinzip

3.1.1.1 Grundlagen

Die PZB, oder auch Indusi genannt, ist eine Form der induktiven Zugbeeinflussung, die in den Dreißigerjahren des 20. Jahrhunderts eingeführt wurde. Wie der Name schon sagt, erfolgt bei dieser Art der Zugsicherung die Überwachung punktuell an definierten Punkten auf der Infrastruktur. Nach diesen Punkten geordnet werden folgende Sachverhalte überwacht:

- Restriktive Begriffe an schaltbaren Signalen
 - Hauptsignal in der Stellung „Halt“ oder Schutzsignal in der Stellung „Fahrverbot“
 - Vorsignal in der Warnstellung „Vorsicht“
 - Signalisierte Geschwindigkeitseinschränkungen
 - Überwachungssignal an einer EK

- Statische Geschwindigkeitsbeschränkungen
 - Vorübergehende Langsamfahrstellen
 - Statische Langsamfahrstellen aufgrund von trassierungsbedingten Einschränkungen der maximal erlaubten Geschwindigkeiten

- Sonstige Geschwindigkeitsbeschränkungen
 - Höchstgeschwindigkeit des Zuges in Abhängigkeit von der eingestellten Zugart
 - Höchstgeschwindigkeit des führenden Fahrzeuges

- 50 km/h bei ausgeschalteter oder gestörter PZB-Fahrzeugeinrichtung

An diesen definierten Punkten befinden sich Gleismagnete, deren darin sich befindliche Schwingkreise auf eine Frequenz von entweder 500 Hz, 1000 Hz oder 2000 Hz abgestimmt sind. Das Gegenstück dazu ist der Fahrzeugmagnet, der sich am führenden Fahrzeug befindet und elektromagnetische Wellen mit diesen drei Frequenzen aussendet. Sobald sich dieser Fahrzeugmagnet nun über den Gleismagneten bewegt, entzieht der sich im Gleismagneten befindende Schwingkreis dem Fahrzeugmagneten durch induktive Kopplung Energie. Durch diesen Energieentzug wird eine Stromabsenkung im Fahrzeug hervorgerufen, die in Abhängigkeit der drei Frequenzen detektiert wird. Für den Fall, dass keine Zugbeeinflussung notwendig ist, wird der Gleismagnet durch einen Kurzschluss des Schwingkreises unwirksam geschaltet. Der im vorherigen Fall eingetretene Energieentzug im Fahrzeug bleibt dadurch aus. In der Abbildung 15 ist der Aufbau dieser beiden Magnete graphisch dargestellt.³⁶

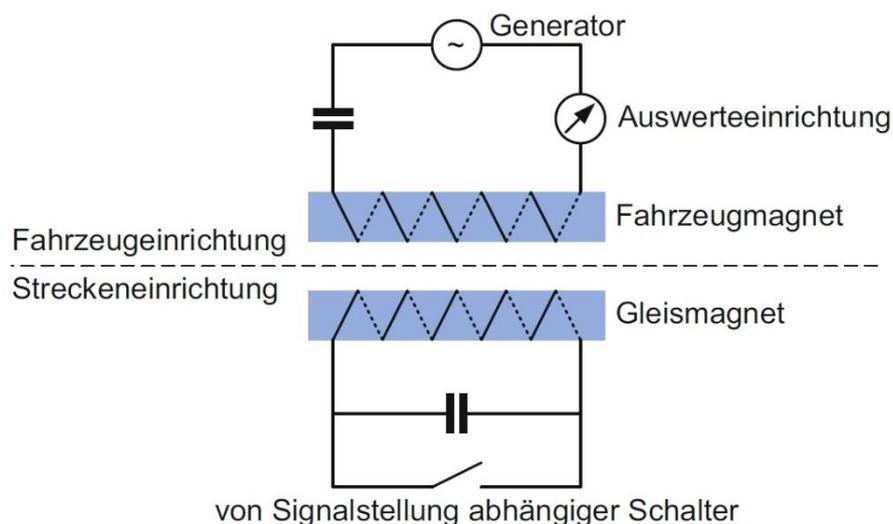


Abbildung 15: Schematischer Aufbau der PZB Magnete³⁷

3.1.1.2 Zugarten

In Abhängigkeit vom Bremsvermögen und des damit verbundenen Bremsweges werden die Züge in drei verschiedene Klassen eingeteilt:

- Obere Klasse: Zugart O
- Mittlere Klasse: Zugart M
- Untere Klasse: Zugart U

³⁶ Vgl. Maschek, 2015, S. 214f.

³⁷ Maschek, 2015, S. 215.

In jeder Zugart sind unterschiedliche Bremskurven und angepasste Höchstgeschwindigkeiten unterlegt. Damit wird sichergestellt, dass der Triebfahrzeugführer den Zug in den von der Infrastruktur vorgegebenen Bremsweglängen sicher zum Stillstand abbremsen kann. In der Tabelle 2 sind die Kriterien für die Wahl der Zugart und die damit verbundenen überwachten Höchstgeschwindigkeiten aufgelistet:³⁸

Zugart	Bremsstellung	Bremswert	Überwachte V_{\max} [km/h]	Entlassungsgeschwindigkeit [km/h]	
				1000 Hz	500 Hz
O	R oder P	>110	165	85	45
M	R oder P	66-110	125	70	35
U	R oder P	<66	105	55	25
U	G	Alle	105	55	25

Tabelle 2: Zugarten der PZB³⁹

3.1.1.3 Signalisierung

3.1.1.3.1 Arten der Signalisierung

Da Züge aufgrund der langen Bremswege nicht auf Sicht fahren können, muss die Stellung des Hauptsignals mit einem zu diesem im Bremswegabstand stehenden Vorsignal angekündigt werden. Wie in Abbildung 16 ersichtlich ist, gibt beim „Two-Aspect-Signalling“ das Hauptsignal nur Informationen darüber, ob der nachfolgende Block bis zum nächsten Hauptsignal befahren werden kann oder nicht, was der klassischen Art der Signalisierung entspricht.

Wird bei stärker befahrenen Strecken der Abstand der Hauptsignale auf den Bremswegabstand reduziert, wie es beispielsweise bei der Wiener S-Bahn-Stammstrecke der Fall ist, eignet sich eher das sog. „Three-Aspect-Signalling“. In diesem Fall ist das Hauptsignal mit dem Vorsignal für das darauffolgende Hauptsignal kombiniert. Diese sog. kombinierten Signale können drei unterschiedliche Aspekte darstellen:

- Halt
- Vorsicht – Ein Block ist noch frei, Halt ist am nächsten Signal zu erwarten
- Frei – Zwei oder mehr Blöcke sind frei, es sind keine Einschränkungen vorhanden.⁴⁰

³⁸ Vgl. Maschek, 2015, S. 216.

³⁹ Vgl. Ebenda.

⁴⁰ Vgl. Theeg/Vlasenko, 2018, S. 189.

Two-Aspect-Signalling:



Three-Aspect-Signalling:

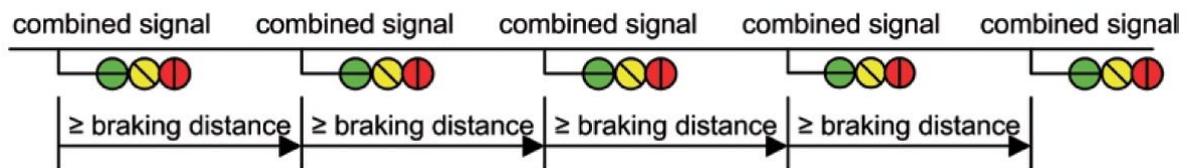


Abbildung 16: Zwei- und Drei-Aspekte-Signalisierung⁴¹

Signalsysteme mit einer inkludierten Geschwindigkeitssignalisierung können, abhängig von der Art, wie die Signalaspekte der Haupt- und Vorsignale kombiniert werden, in drei verschiedene Gruppen unterteilt werden. Diese sind anhand der Abbildung 17 graphisch veranschaulicht dargestellt.

- **Getrennte Vor- und Hauptsignale**

In diesem Fall werden die Vor- und Hauptsignalbegriffe getrennt voneinander angezeigt, unabhängig davon, ob diese sich an der gleichen Stelle oder an unterschiedlichen Orten befinden. Diese Art der Signalisierung ist direkt aus vorhergegangenen mechanischen Signalen entstanden, ohne weitere Möglichkeiten zu nutzen, welche Lichtsignale bieten können.

- **Kombinierte Signale des 1. Grades**

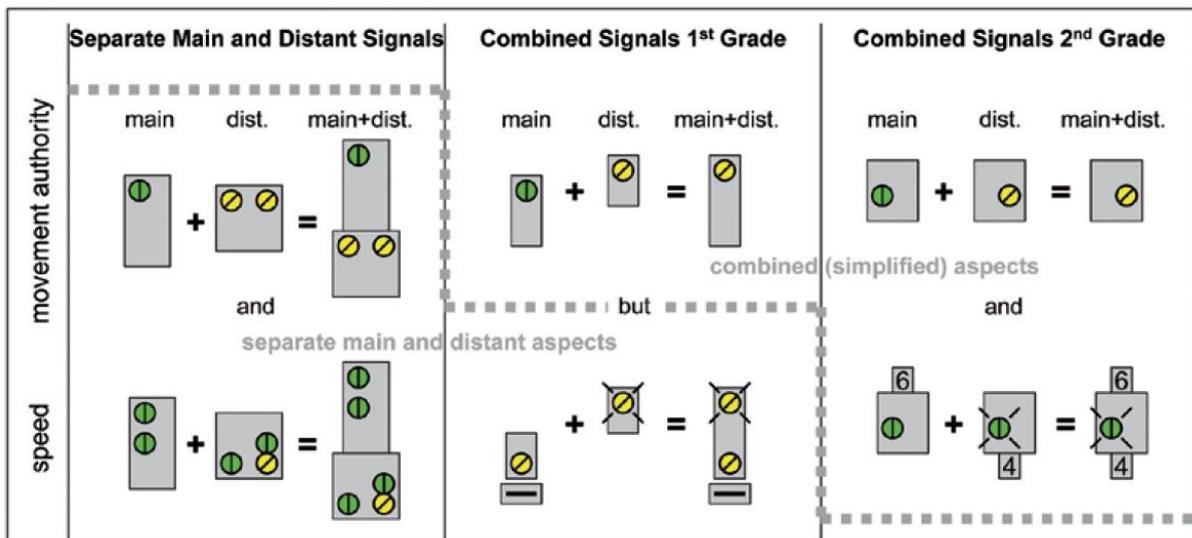
Hier können die Begriffe „Frei“ und „Halt“ und die am Vorsignal dazugehörigen Begriffe kombiniert auf einem Signal dargestellt werden. In Abbildung 17 ist dies in der ersten Zeile, mittlere Spalte, dargestellt. Zeigt das Hauptsignal „Frei“, das Vorsignal aber „Vorsicht“, kann dies beispielsweise durch einen gelben Lichtpunkt am kombinierten Signal angezeigt werden. Die Begriffe für Geschwindigkeitsreduktionen müssen hier aber dennoch getrennt in Vor- und Hauptsignalen angegeben werden.

- **Kombinierte Signale des 2. Grades**

Im Gegensatz zum 1. Grad können hier nun zusätzlich Geschwindigkeitsänderungen kombiniert angegeben werden. Im einfachsten Fall werden hier nurmehr ein Lichtpunkt und Geschwindigkeits(vor)anzeiger angezeigt.⁴²

⁴¹ Theeg/Vlasenko, 2018, S. 189.

⁴² Vgl. Theeg/Vlasenko, 2018, S. 195.

Abbildung 17: Möglichkeiten zur Kombination von Haupt- und Vorsignalen⁴³

3.1.1.3.2 Überwachung an Haupt- und Vorsignalen

Abhängig vom Lageort in der Infrastruktur sind die Frequenzen der Schwingkreise in den Gleismagneten unterschiedlich eingestellt. Der 1000 Hz-Magnet befindet sich am Vorsignal, der 2000 Hz-Magnet am Hauptsignal und der 500 Hz-Magnet 250m vor dem Hauptsignal. Im folgenden Abschnitt wird die Wirkungsweise der Magneten unter einer Beeinflussung dargestellt.⁴⁴

■ 1000 Hz Gleismagnet

Dieser 1000 Hz Gleismagnet ist aktiv, wenn das von diesem überwachten Vorsignal „Vorsicht“ zeigt oder eine Geschwindigkeitsbegrenzung bis 60km/h am darauffolgenden Hauptsignal vorhersagt. Ist dies der Fall, muss der Triebfahrzeugführer beim Passieren des Signales die Wachsamkeitstaste quittieren, um die Wahrnehmung des Signales zu bestätigen. Geschieht dies nicht innerhalb von vier Sekunden nach der Überfahrt des Gleismagneten, wird unverzüglich eine Zwangsbremung veranlasst. Nach der Betätigung der Wachsamkeitstaste wird eine zeitabhängige, lineare Bremskurve eingeleitet, die den Triebfahrzeugführer dazu zwingt, den Zug auf die von der Zugart abhängige Entlassungsgeschwindigkeit abzubremsen. Beim Erreichen dieser Geschwindigkeit wird diese weiter überwacht. In der Zugart O bedeutet das beispielsweise, dass der Zug nach Betätigung der Wachsamkeitstaste innerhalb von 23 s

⁴³ Theeg/Vlasenko, 2018, S. 196.

⁴⁴ Vgl. Maschek, 2015, S. 217.

von 165 auf 85 km/h abgebremst werden muss. Diese und die Werte der übrigen Zugarten können der Tabelle 2 entnommen werden.

Für den Fall, dass das Hauptsignal während der 1000 Hz-Überwachung in die Fahrtstellung wechselt, besteht die Möglichkeit, sich 700 m nach der Beeinflussung aus der Überwachung zu befreien. Die Zahl resultiert daraus, dass bei einem regulären Vorsignalabstand von 1000 m und einer üblichen Signalsicht von 300 m spätestens nach 700 m der Begriff des Hauptsignales erkannt werden kann. Eine Befreiung vor der Sichtbarkeit des Hauptsignales wird damit verhindert.⁴⁵

■ 500 Hz Gleismagnet

Der 500 Hz Gleismagnet befindet sich 250 m vor dem dazugehörigen Hauptsignal. Dieser ist dann aktiv, wenn das Signal „Halt“ oder einen sehr restriktiven Fahrbezug zeigt. Bei der Beeinflussung mit diesem Magneten wird eine weitere, im Vergleich zur 1000 Hz-Überwachung deutlich restriktivere, Bremskurve eingeleitet. Zuerst wird der Zug mit einer wegabhängigen Bremskurve überwacht, daraufhin erfolgt die Überwachung der Entlassungsgeschwindigkeit. Im Falle des Beispiels mit dem Zug in der Zugart O bedeutet das, dass dieser ab dem Standort des 500 Hz Gleismagneten in 153 m von 65 km/h auf 45 km/h verzögern muss. Daraufhin erfolgt bis zum Standort des Hauptsignales die Überwachung auf 45 km/h. Im Gegensatz zur 1000 Hz-Überwachung ist hier keine Befreiung mehr möglich.⁴⁶

■ 2000 Hz Gleismagnet

Der 2000 Hz Gleismagnet befindet sich am Hauptsignal und ist ausschließlich bei einer Haltstellung aktiv. Bei einer Vorbeifahrt an einem aktiven 2000 Hz Gleismagneten wird unmittelbar eine Zwangsbremmung eingeleitet, die den Zug zum Stehen bringt. Die Bremskurve besteht in diesem Fall nur aus einem Punkt, der sich bei der Geschwindigkeit von 0 km/h befindet. In der Abbildung 18 wird dies mit einer senkrechten, rot strichlierten Linie gekennzeichnet. Mit den Beeinflussungen der vorhergehenden 1000 Hz- und 500 Hz-Bremskurven wird sichergestellt, dass der Zug bei einer ungewollten Signalüberfahrt dieses nur mit einer geringen Geschwindigkeit passiert. Der daraus resultierende, deutlich kürzere Bremsweg lässt die Chance auf einen Unfall mit einem zweiten Schienenfahrzeug geringer werden, als wenn der Zug ohne vorhergehende Überwachungen das Signal mit einer deutlich höheren Geschwindigkeit passiert hätte.⁴⁷

⁴⁵ Vgl. Maschek, 2015, S. 217f.

⁴⁶ Vgl. Maschek, 2015, S. 218.

⁴⁷ Vgl. Ebenda.

In der Abbildung 18 sind die eben erläuterte Bremskurvenüberwachung an Vor- und Hauptsignalen sowie die üblichen Abstände der drei Gleismagneten graphisch dargestellt.

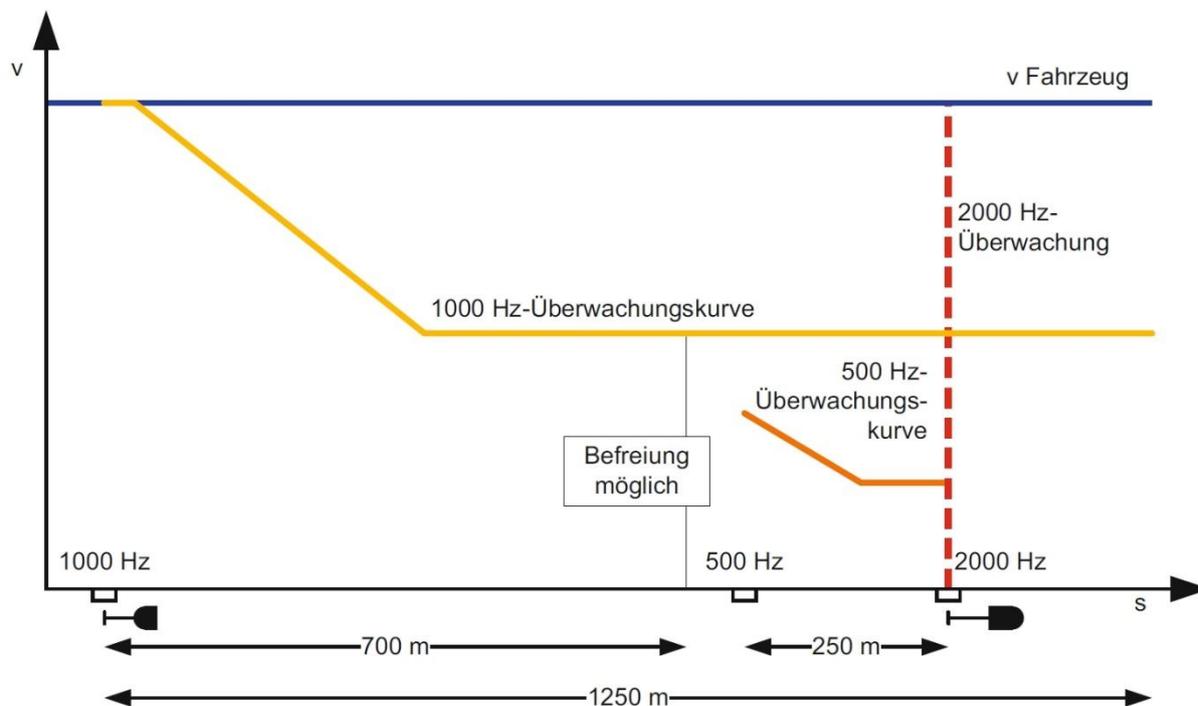


Abbildung 18: Bremskurvenüberwachung an Vor- und Hauptsignalen bei PZB 90⁴⁸

3.1.1.4 Restriktive Überwachung

In den Vorläufern der heutigen PZB 90 war die restriktive Überwachung so konzipiert, dass, wenn der Triebfahrzeugführer vergessen hatte, bei einem „Vorsicht“ zeigenden Vorsignal die Wachsamkeitstaste zu betätigen oder dieser nicht ausreichend bremste und deshalb über das Halt zeigende Hauptsignal fahren würde, der Zug dennoch rechtzeitig vor dem Ende des Durchrutschweges stehen bleiben kann. Die Überprüfung der korrekten Bremsfahrt fand hier mit der sogenannten „angehängten Geschwindigkeitsprüfung“ und der Prüfung am 500 Hz Magneten statt, falls dieser vorhanden war. Die „angehängte Geschwindigkeitsprüfung“ war eine punktförmige Prüfung der Geschwindigkeit am Fußpunkt der heutigen 1000 Hz-Überwachungskurve, was der Entlassungsgeschwindigkeit entspricht.

Da es jedoch in den 1980er Jahren zu mehreren schweren Eisenbahnunfällen kam, musste die PZB sicherer gestaltet werden, um die Gefahren der im Laufe der Jahre gestiegenen Beschleunigungs- und Bremsvermögen der Triebfahrzeuge abzudecken. Im Konkreten sind dies die Risiken, dass der Zug bei Halt zeigendem Hauptsignal trotz bestätigter Vorsignalwarnstellung über den Schutzweg hinausfahren könnte oder nach der Anfahrt von

⁴⁸ Maschek, 2015, S.217.

einem zwischen Vor- und Hauptsignal liegenden Haltepunkt eine hinter dem Hauptsignal liegende Gefahrenstelle überfahren könnte. Um diese Risiken minimieren zu können, wurden der restriktiven Überwachung folgende zwei Aspekte hinzugefügt.⁴⁹

- Weiterfahrt gegen Halt zeigende Signale überwachen

Der Triebfahrzeugführer hatte die Möglichkeit, bei bestätigter Wachsamkeit am Vorsignal nach der Unterschreitung der Entlassungsgeschwindigkeit mit dieser weiterzufahren. Der darauffolgende Prüfpunkt am 500 Hz Gleismagneten oder am Halt zeigenden Hauptsignal wäre so schnell überfahren worden, dass ein rechtzeitiges Anhalten vor der Gefahrenstelle nicht mehr möglich gewesen wäre. Damit das vermieden werden kann, wurde die bereits in Kapitel 3.1.1.3.2 beschriebene kontinuierliche Überwachung durch eine Bremskurve sichergestellt.⁵⁰

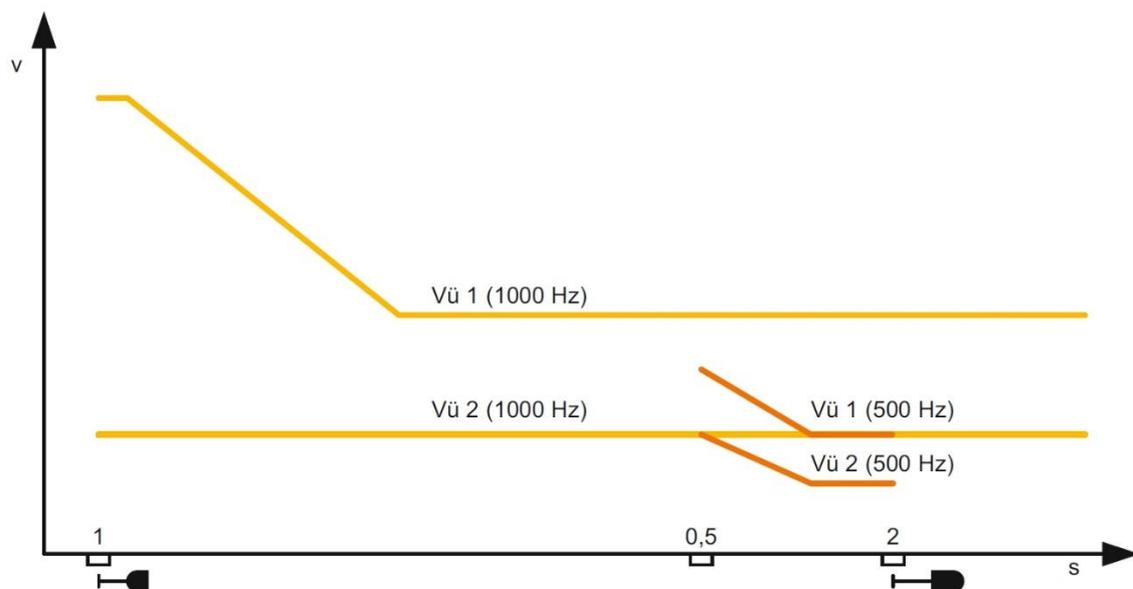


Abbildung 19: PZB 90 Überwachungskurven ohne (Vü1) und mit Restriktion (Vü 2)⁵¹

- Anfahren gegen Halt zeigende Signale überwachen

Solange der Zug fährt, ist die Zugfahrt durch einen Schutzweg hinter dem Signal geschützt. Sobald der Zug jedoch zum Stehen kommt, wird dieser Durchrutschweg nicht mehr berücksichtigt, da von einem stehenden Zug keine Gefahr mehr ausgeht. Daher ist die am Vorsignal eingeleitete Überwachung ab dem Stillstand zwischen Vor- und Hauptsignal nicht

⁴⁹ Vgl. Maschek, 2015, S.218f.

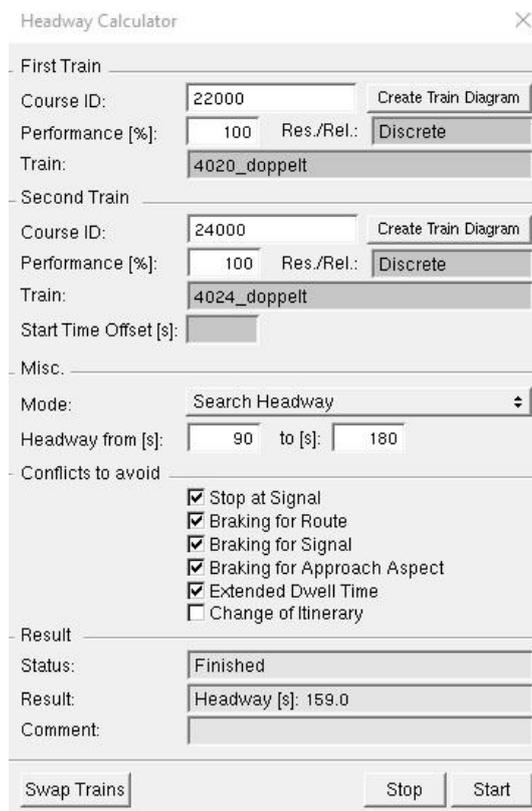
⁵⁰ Vgl. Maschek, 2015, S.219.

⁵¹ Maschek, 2015, S.220.

mehr aufrecht. Fährt der Triebfahrzeugführer in dieser Situation mit dem Zug wieder an, könnte dieser ungehindert beschleunigen und hinter dem Halt zeigenden Signal eine Gefährdung herbeiführen. Um dieses Risiko zu minimieren, wurde bei der PZB 90 eine zusätzliche, restriktive Überwachungskurve eingebaut. Wird für mehr als 15 s eine definierte Umschaltgeschwindigkeit unterschritten, gelten für den Zug automatisch die restriktiven Bremskurven der 1000 Hz- und 500 Hz-Überwachung. Dies kann zwar einerseits zu betrieblichen Behinderungen aufgrund der geringeren Geschwindigkeiten führen, andererseits wird das Risiko eines unerwünschten Ereignisses durch diese Maßnahme deutlich reduziert. In der Abbildung 19 sind diese Kurven mit „Vü2“ beschriftet.⁵²

3.1.2 Erreichbare Mindestzugfolgezeiten

Mithilfe des Tools „Headway Calculator“ von OpenTrack konnten im nächsten Schritt die Mindestzugfolgezeiten berechnet werden.



The screenshot shows the 'Headway Calculator' window with the following details:

- First Train:** Course ID: 22000, Performance [%]: 100, Res./Rel.: Discrete, Train: 4020_doppelt.
- Second Train:** Course ID: 24000, Performance [%]: 100, Res./Rel.: Discrete, Train: 4024_doppelt, Start Time Offset [s]: (empty).
- Misc.:** Mode: Search Headway, Headway from [s]: 90, to [s]: 180.
- Conflicts to avoid:**
 - Stop at Signal
 - Braking for Route
 - Braking for Signal
 - Braking for Approach Aspect
 - Extended Dwell Time
 - Change of Itinerary
- Result:** Status: Finished, Result: Headway [s]: 159.0, Comment: (empty).
- Buttons:** Swap Trains, Stop, Start.

Abbildung 20: Aufbau des Headway Calculators⁵³

⁵² Vgl. Maschek, 2015, S.219f.

⁵³ Vgl. OpenTrack.

Nachdem der vorausfahrende, der nachfahrende Zug und die zu vermeidenden Konflikte eingegeben wurden, berechnet das Programm automatisch die Mindestzugfolgezeiten. In dieser Arbeit wurde die Mindestzugfolgezeit zwischen zwei Zügen als jene Zeit definiert, nach welcher der zweite Zug dem ersten frühestens folgen kann, ohne Fahrzeitenverluste aufgrund von Beeinflussungen durch den vorfahrenden Zug davonzutragen. In der Abbildung 20 ist der Aufbau und die Ausgabe des Ergebnisses durch den „Headway Calculator“ anhand der Züge 22000 und 24000 ersichtlich.

Für das derzeitig verwendete Zugsicherungssystem PZB ergeben sich, unterteilt in die Richtung und die Haltezeiten, auf der Wiener S-Bahn-Stammstrecke folgende Mindestzugfolgezeiten:

■ Wien Meidling – Wien Floridsdorf, Haltezeit 30 s:

Nach Vor	Doppelstock- Wendezug [s]	4020 [s]	4024 [s]	4746 [s]	Westbahn [s]
Doppelstock- Wendezug	124	107	109	140	187
4020	149	127	129	181	212
4024	142	120	124	174	202
4746	105	100	100	118	169
Westbahn	51	51	51	64	114

Tabelle 3: Mindestzugfolgezeiten PZB, Meidling - Floridsdorf, Haltezeit 30 s⁵⁴

■ Wien Floridsdorf – Wien Meidling, Haltezeit 30 s:

Nach Vor	Doppelstock- Wendezug [s]	4020 [s]	4024 [s]	4746 [s]	Westbahn [s]
Doppelstock- Wendezug	132	115	114	147	133
4020	151	134	133	176	137
4024	153	136	135	187	142
4746	111	102	101	126	128
Westbahn	120	118	117	119	120

Tabelle 4: Mindestzugfolgezeiten PZB, Floridsdorf - Meidling, Haltezeit 30 s⁵⁵

⁵⁴ Eigene Darstellung.

⁵⁵ Eigene Darstellung.

■ Wien Meidling – Wien Floridsdorf, Haltezeit 60 s:

Vor \ Nach	Doppelstock- Wendezug [s]	4020 [s]	4024 [s]	4746 [s]	Westbahn [s]
Doppelstock- Wendezug	154	137	139	170	247
4020	179	157	159	211	272
4024	172	150	154	204	262
4746	135	130	130	148	228
Westbahn	51	51	51	64	144

Tabelle 5: Mindestzugfolgezeiten PZB, Meidling - Floridsdorf, Haltezeit 60 s⁵⁶

■ Wien Floridsdorf – Wien Meidling, Haltezeit 60 s:

Vor \ Nach	Doppelstock- Wendezug [s]	4020 [s]	4024 [s]	4746 [s]	Westbahn [s]
Doppelstock- Wendezug	162	145	144	177	163
4020	181	164	163	206	167
4024	183	166	165	217	172
4746	141	132	131	156	158
Westbahn	150	148	147	149	150

Tabelle 6: Mindestzugfolgezeiten PZB, Floridsdorf - Meidling, Haltezeit 60 s⁵⁷

Wie in den vorhergehenden Tabellen 3-6 ersichtlich ist, können die Mindestzugfolgezeiten stark variieren. Ein dazu beitragender Faktor ist die eingesetzte Garnitur. Eine stärkere, die höhere Beschleunigungs- und Verzögerungswerte besitzt, benötigt für die Fahrt zwischen Wien Meidling und Wien Floridsdorf weniger Zeit als eine schwächere Garnitur. Fährt nun eine stärkere Garnitur einer schwächeren nach, so läuft diese mit der Zeit dem vorhergehenden Zug auf. Die Folge ist, dass der nachfahrende Zug mehr Abstand lassen muss, um bis zum Zielbahnhof dem vorherfahrenden Zug nicht aufzulaufen. Im umgekehrten Fall zeigt sich genau das Gegenteil. Ist die vorausfahrende Garnitur stärker als die nachfahrende, kann der zweite Zug früher abfahren, da diesem der erste im Laufe der Zeit davonfährt. Im Hinblick auf die Mindestzugfolgezeiten bedeutet dies, dass große Werte darauf schließen lassen, dass die

⁵⁶ Eigene Darstellung.

⁵⁷ Eigene Darstellung.

nachfahrende Garnitur stärker ist als die vorausfahrende. Kleinere Werte lassen hingegen auf das Gegenteil schließen.

Des Weiteren zeigt sich, dass die Haltezeit an den Bahnsteigen eine additive Größe ist. Bei der Erhöhung der Haltezeit um 30 s auf 60 s erhöht sich die Mindestzugfolgezeit ebenfalls um diesen Wert. In den meisten Fällen ist die Voraussetzung dafür jedoch, dass die Züge auf dem gleichen Laufweg mit gleichem Haltemuster verkehren. Anhand dieser Auswertungen ist beispielsweise zu erkennen, dass sich die Mindestzugfolgezeiten bei Beteiligungen der Westbahn nicht zwangsläufig um den Wert der Erhöhung der Haltezeit addieren.

Der Blick auf die Tabellen 3 und 5, die sich auf die Fahrtrichtung Wien Meidling – Wien Floridsdorf beziehen, zeigt dies deutlich. Bei vorausfahrender Westbahn bleiben die Mindestzugfolgezeiten konstant, unabhängig von der Haltezeit. Dies liegt daran, dass die Westbahn in Wien Matzleinsdorfer Platz nicht stehen bleibt, die S-Bahn und der Regionalzug jedoch schon. Durch diesen zusätzlichen Halt vergrößert sich der Abstand ab dieser Betriebsstelle auf die vorausfahrende Westbahn. In diesem Fall ist die Mindestzugfolgezeit abhängig von den Blockabständen zwischen Wien Meidling und Wien Matzleinsdorfer Platz, jedoch nicht von den Haltezeiten. Eine Ausnahme dazu bildet das Szenario Westbahn folgt Westbahn, da hier das Haltemuster wieder gleich ist und sich die Änderung der Haltezeit additiv auf die Mindestzugfolgezeit auswirkt.

In der gleichen Richtung lässt sich aber auch der gegenteilige Fall beobachten. Bei nachfahrender Westbahn erhöht sich die Mindestzugfolgezeit um 60 s, also um das doppelte des Wertes, um den die Haltezeit geändert wird. Der Grund hierfür ist wieder in Wien Matzleinsdorfer Platz zu finden, wo die Westbahn keinen planmäßigen Halt hat. Würde die einer S-Bahn oder einem Regionalzug nachfahrende Westbahn um die Zeit später nachfahren, die der Erhöhung der Haltezeit entspricht, wäre dieser Puffer aufgrund des fehlenden Halts bereits nach der Haltestelle Wien Matzleinsdorfer Platz verbraucht. In der darauffolgenden Station Wien Hbf. – Südtiroler Platz müsste die nachfahrende Westbahn nochmals diese Zeit abwarten. Im konkreten Fall bei der Erhöhung der Haltezeit um 30 s bedeutet dies also, dass die Westbahn einer S-Bahn oder einem Regionalzug 60 s später nachfahren muss, um durch die 30-sekündigen Haltezeitzuschläge des vorausfahrenden Zuges in Wien Matzleinsdorfer Platz und Wien Hbf. – Südtiroler Platz nicht beeinflusst zu werden.

3.2 ETCS Level 2

Im nächsten Schritt wurde die Infrastruktur im Simulationsprogramm mit einem der aktuell modernsten Zugsicherungssysteme, dem ETCS Level 2, ausgerüstet. Die daraus berechneten Mindestzugfolgezeiten können dann mit denen von der PZB verglichen werden, um Unterschiede daraus abzuleiten.

3.2.1 Funktionsprinzip

3.2.1.1 Grundlagen

Aufgrund von vielen verschiedenen, teilweise länderspezifischen Systemen, die europaweit vorherrschen, ist es schwierig, einen durchgehenden, länderübergreifenden Eisenbahnverkehr in Europa realisieren zu können. Beispiele für derartige innereuropäische Unterschiede finden sich in folgenden Bereichen:

- Bahnstromversorgung
- Spurweite
- Betriebsverfahren
- Signalisierung
- Zugsicherungssysteme

Da grenzüberschreitende Verkehre aufgrund der unterschiedlichen Systeme dazu gezwungen sind, sich den jeweiligen nationalen Standards anzupassen, können solche Transporte viel Zeit in Anspruch nehmen. Als Beispiele dafür, warum dadurch längere Aufenthalte an den Staatsgrenzen notwendig werden, können der Wechsel von Lokomotiven aufgrund unterschiedlicher Bahnstromversorgungen sowie das Umspuren von Zügen wegen verschiedenen Spurweiten genannt werden. Früher war dies kein Problem, da aufgrund von Grenzkontrollen ohnehin eine längere Standzeit an den Grenzbahnhöfen zu berücksichtigen war. Durch den Wegfall dieser Kontrollen in den letzten Jahren wurde jedoch der Wunsch immer lauter, mit einer Lokomotive grenzüberschreitende Verkehre abwickeln und behinderungsfrei durch ganz Europa fahren zu können.

Während sich einige dieser Unterschiede, wie beispielsweise die Überwindung von Bahnstromsystemgrenzen durch den Einsatz von Mehrsystemlokomotiven, leicht in den Griff bekommen lassen, ist dies in anderen Bereichen nur sehr schwierig. Zu nennen sind beispielsweise Zugsicherungssysteme, die ein europaweites freizügiges Verkehren verhindern. Für jedes Zugsicherungssystem, das die Lokomotive benötigt, muss die komplette Ausrüstung darin verbaut sein. So kann es passieren, dass die Triebfahrzeuge mit einer Doppel- oder Dreifachausrüstung von Zugbeeinflussungssystemen ausgestattet sind. Mit je mehr Systemen eine Lokomotive ausgerüstet ist, desto uneingeschränkter kann diese in Europa verkehren. Da jedoch jedes Zugsicherungssystem eine eigene Ausrüstung sowie eigene Bedien- und Anzeigeelemente benötigt, wird der Platzbedarf im Maschinenraum der Lokomotive zu groß und die Situation im Führerstand durch eine Vielzahl an Instrumenten zu unübersichtlich.

Aus diesen Gründen wurde Ende der 1980er Jahre eine Initiative vom internationalen Eisenbahnverband UIC gestartet. Diese hatte das Ziel, zumindest die Vielzahl an

europäischen Zugsicherungssystem in dem europäischen System „European Train Control System“ (ETCS) zu vereinen.⁵⁸

3.2.1.2 Komponenten

Folgende Komponenten werden für das ETCS benötigt:

■ Eurobalise

Dies ist eine europäisch standardisierte Balise, die anhand ihrer Funktion in Festdaten- und Transparentdatenbalisen unterschieden werden kann. Festdatenbalisen senden immer nur die gleichen Telegramme, die auf ihnen im Vorfeld abgespeichert wurden. Dies können beispielsweise Informationen über das Geschwindigkeitsprofil oder die aktuelle Position sein. Transparentdatenbalisen sind hingegen schaltbar und können somit unterschiedliche Telegramme senden. Das klassische Anwendungsgebiet dieser Art von Balisen ist an dynamischen, ortsfesten Signalen zur Informationsübertragung. Hierfür wird eine Kabelverbindung zu einer LEU benötigt.

Für die Übertragung sendet die Fahrzeugantenne ein kontinuierliches Energiesignal von ca. 27 MHz. Durch das induktive Transponder-Verfahren wird die Eurobalise beim Überfahren aktiviert und übermittelt dem Triebfahrzeug deren Telegramm. Die Balise benötigt aufgrund dieses Verfahrens keine externe Stromversorgung. In der Abbildung 21 ist eine solche Eurobalise ersichtlich.



Abbildung 21: Eurobalisen für ETCS⁵⁹

⁵⁸ Vgl. Maschek, 2015, S. 225.

⁵⁹ <http://www.blueprintrecruit.com/news/ETCS-coming-to-London-in-2017-289>, 02.07.2019.

■ Euroloop

Als Ergänzung zu der nur punktförmigen Übertragung von Informationen durch die Eurobalise dient der Euroloop. Dieser wird durch eine Balise angekündigt und trägt insbesondere vor Hauptsignalen dazu bei, eine kontinuierliche Datenübertragung herzustellen. Dies rechnet sich speziell dann, wenn der Zug aufgrund einer Annäherung an ein „Halt“ zeigendes Signal in einer Bremskurve gefangen ist. Wenn das Signal in dieser Phase der Annäherung wieder auf „Frei“ schaltet, muss sich der Triebfahrzeugführer, wenn kein Euroloop verbaut ist, bis zum Erreichen der nächsten Transparentdatenbalise an die ihm vorgegebene Bremskurve halten. Kommt jedoch ein Euroloop zum Einsatz, wird dem Triebfahrzeug der Freibegriff des Signales unmittelbar übermittelt und der Triebfahrzeugführer kann wieder beschleunigen.

Technisch wird dies mit einem am Schienenfuß verlegten Leckwellenleiter realisiert, der eine maximale Länge von 800 m aufweisen kann. An einem Ende ist dieser mit der LEU, am anderen Ende mit einem Abschlusswiderstand verbunden.

■ Lineside Electronic Unit (LEU)

Diese Komponente ist dafür zuständig, Transparentdatenbalisen und Euroloops mit Informationen zu versorgen, die aus der Stellwerkstechnik entnommen und in die jeweiligen Datentelegramme umgewandelt werden. Aufgrund einer Vielzahl an Stellwerkstechniken ist die Schnittstelle zwischen LEU und Stellwerkstechnik nicht spezifiziert.

■ Radio Bloc Centre (RBC)

Wenn bei höheren ETCS-Leveln GSM-R zur Datenübertragung zwischen der Infrastruktur und dem Fahrzeug genutzt wird, ist das RBC von wichtiger Bedeutung. Zu dieser Komponente hält das Fahrzeug ständig Kontakt, da dort die aktuellen Zugpositionen verwaltet und die Informationen aus der Stellwerkstechnik so aufbereitet werden, dass daraus die Fahrerlaubnis hergestellt wird. Speziell bei Zügen, die über die RBC-Grenzen hinaus verkehren, ist es wichtig, dass die Informationen zwischen den jeweiligen RBC-Nachbarn ausgetauscht werden.⁶⁰

Neben den eben aufgezählten Komponenten, die auf der Infrastruktur zu finden sind, benötigt das Triebfahrzeug ebenfalls eine spezielle Ausrüstung für die Verwendung von ETCS. Diese sind im Nachfolgenden aufgelistet:

■ Odometrie

Diese ist dafür zuständig, die Geschwindigkeits- und Wegmessung vornehmen zu können. Die Odometrie ist ein Radumdrehungszähler, der zur Erhöhung der Genauigkeit mit einem Radar unterstützt wird.

⁶⁰ Vgl. Maschek, 2015, S. 226f.

- **Train Interface Unit (TIU)**
Das TIU bildet die Schnittstelle zu den Antriebs- und Bremskomponenten des Fahrzeuges.
- **Balise Transmission Module (BTM)**
Das BTM dient zur Kommunikation mit der Eurobalise.
- **Loop Transmission Module (LTM)**
Das LTM dient zur Kommunikation mit dem Euroloop.
- **Euroradio:**
Diese Einrichtung dient zur Kommunikation über das GSM-R Netz.
- **Driver Machine Interface (DMI)**
Das DMI ist im Führerstand platziert und dient als Schnittstelle zum Triebfahrzeugführer. Auf einem Bildschirm werden diesem die Ist-Geschwindigkeit, Zielgeschwindigkeit, die Zielentfernung sowie weitere Zustände und Hinweise angezeigt. Die Bedienung des DMI kann mittels Touchscreens oder Soft-Keys erfolgen.⁶¹

3.2.1.3 Ausrüstungsstufen

Das ETCS kann in verschiedenen Ausrüstungsstufen, sogenannten Levels, eingesetzt werden. Diese verschiedenen Levels werden im nachfolgenden Abschnitt vorgestellt.

- **Level 0**

Diese Ausrüstungsstufe ist die einfachste dieses Zugsicherungssystems. Sie tritt dann ein, wenn das Fahrzeug mit ETCS, jedoch nicht mit dem nationalen System, und die Infrastruktur ausschließlich mit diesem nationalen System ausgerüstet ist. Sollte diese Situation der Fall sein, kann die ETCS-Ausrüstung des Fahrzeuges mit Level 0 betrieben werden. In diesem Level wird ausschließlich die Ist-Geschwindigkeit angezeigt und gemeinsam mit der Geschwindigkeit für Strecken ohne Zugbeeinflussung überwacht.⁶²

- **Level NTC**

Ist jedoch das Triebfahrzeug mit dem STM des nationalen Zugsicherungssystems versehen, mit dem auch die befahrende Infrastruktur ausgerüstet ist, kann im ETCS Level NTC gefahren

⁶¹ Vgl. Maschek, 2015, S. 228.

⁶² Vgl. Maschek, 2015, S. 228f.

werden. NTC steht hierbei für „National Train Control“. In dieser Ausrüstungsstufe werden die jeweiligen Informationen vom nationalen Zugsicherungssystem über das STM empfangen und durch ausgewählte ETCS-Fahrzeugkomponenten weiterverarbeitet. Es können jedoch ausschließlich die Funktionen verwendet werden, die das nationale System bietet. Die ETCS-Balisen werden nur für die Ankündigung eines Wechsels des Levels verwendet. Andere Informationsübertragungen mit den Eurobalisen sind in dieser Ausrüstungsstufe noch nicht möglich.⁶³

■ Level 1

Ab dieser Ausrüstungsstufe besitzt das ETCS die volle Funktionalität. Der Zug kann nun im Modus „Full Supervision“ verkehren. Infrastruktureseitig kann durch die Verwendung des DMI im Führerstand auf ortsfeste Signale verzichtet werden. Diese dienen ausschließlich als Rückfallebene für den Fall, dass das Zugsicherungssystem ausfällt. Aus diesem Grund belassen die meisten Infrastrukturbetreiber die ortsfesten Signale bei einer Umrüstung auf ETCS. Was jedoch im Gegensatz dazu weiterhin erforderlich ist, sind Gleisfreimeldeanlagen auf der Strecke. Da die Züge in diesem Level mit keinem System ausgerüstet sind, die eine fahrzeugeitige Zugvollständigkeit überprüfen und gewährleisten können, muss diese Kontrolle weiterhin infrastruktureitig durchgeführt werden. In der Abbildung 22 ist dies zur besseren Veranschaulichung graphisch dargestellt.

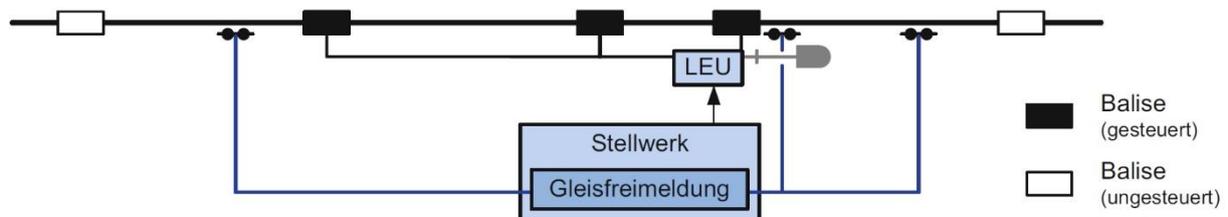


Abbildung 22: Benötigte Komponenten für ETCS Level 1⁶⁴

Die Kommunikation in dieser Ausrüstungsstufe findet mithilfe von Eurobalisen statt, die durch Infill-Elemente an ausgewählten Stellen ergänzt werden können. Allerdings ist diese Informationsübermittlung nur einseitig, da die Kommunikation ausschließlich von der Infrastruktur zum Fahrzeug stattfindet, welches somit keine Informationen an die Strecke übertragen kann. Im Level 1 sind neben Festdatenbalisen zwingend auch Transparentdatenbalisen zu verwenden, die zumindest an den Standorten von Vor- und Hauptsignalen platziert werden müssen. Dadurch kann die Übertragung einer Movement Authority (MA) bewerkstelligt werden. Da Änderungen an der MA nur über

⁶³ Vgl. Maschek, 2015, S. 229.

⁶⁴ Maschek, 2015, S.229.

Transparentdatenbalisen dem Fahrzeug übermittelt werden können, ist es von Vorteil, speziell in den Abständen zwischen den Vor- und Hauptsignalen mit Infill-Elementen zu arbeiten. Es entsteht in diesen Bereichen ein dichter frequentierter Informationsfluss, wodurch die eben genannten Änderungen an der MA schneller an das Fahrzeug übermittelt werden können.

Ein Beispiel dazu ist die Annäherung an ein „Halt“ zeigendes Signal. Durch die Transparentdatenbalisen erhält das Fahrzeug die Information, an diesem Signal anhalten zu müssen. Der Triebfahrzeugführer hat nun anhand der ETCS-Bremskurven die Geschwindigkeit des Zuges zu verringern. Erhält der Zug im Laufe der Annäherung am „Halt“ zeigenden Signal einen Freibegriff, darf der Lokführer nicht ohne Weiteres wieder beschleunigen. Da das Fahrzeug aufgrund fehlender Infill-Balisen in diesem Bereich noch keine MA erhalten hat, zwingt das Zugsicherungssystem den Triebfahrzeugführer weiterhin, sich an die Bremskurve zu halten. Dieser muss deshalb nach wie vor die Geschwindigkeit verringern, um vor dem mittlerweile einen Freibegriff zeigenden Signal stehen bleiben zu können. Die MA wird in diesem Beispiel dem Zug erst bei der Transparentdatenbalise übermittelt, die sich auf Höhe des Signalstandortes befindet. Bei Verwendung von Infill-Elementen wäre die Übertragung der MA schon bedeutend früher möglich gewesen. Der Triebfahrzeugführer hätte dadurch früher wieder beschleunigen können, wodurch Energiekosten und Fahrzeit eingespart werden.

Es gibt drei verschieden Varianten, die in ETCS Level 1 als Infill-Elemente verwendet werden können:

- Infill-Balisen
Diese geben zusätzliche Möglichkeiten einer punktförmigen Datenübertragung.
- Euroloop:
Durch den Euroloop können auf dessen Länge die Daten kontinuierlich übertragen werden. Die Frequenz, mit der die Informationen übermittelt werden, ist hier deutlich höher als bei Infill-Balisen.
- Infill-Radio:
Das Infill-Radio ist vergleichbar mit dem Euroloop, nur dass hier die kontinuierliche Datenübertragung mittels eines örtlich begrenzten Funks geschieht. Der Vorteil besteht darin, dass hier keine teuren Kabel zur Informationsübermittlung in die Gleise verlegt werden müssen.⁶⁵

⁶⁵ Vgl. Maschek, 2015, S. 229f.

■ Level 2

Im Gegensatz zu Level 1, wo es auf nur sehr kurzen Abschnitten annähernd möglich ist, ist bei Level 2 die Übertragung und Überwachung auf der gesamten Strecke kontinuierlich. Um dies erreichen zu können, basiert die Kommunikation bei dieser Ausbaustufe des Zugsicherungssystems ETCS auf GSM-R. Durch die Übermittlung von Daten über Funk ist der Gebrauch von Transparentdatenbalisen in Level 2 nicht mehr notwendig. Es werden somit ausschließlich Festdatenbalisen verwendet, die für die Ortung der Züge relevant sind.

Mithilfe des RBC, der zentralen Schnittstelle zwischen dem Fahrzeug und dem Stellwerk, kann der Standort jedes ETCS-geführten Zuges bestimmt werden. Aufgrund der fehlenden Zugintegritätsprüfung kann auf diese Art jedoch nicht festgestellt werden, ob der Zug vollständig ist. Um die komplette Räumung eines Abschnittes sicherstellen zu können, ist hier, wie auch bei Level 1, eine infrastrukturseitige Gleisfreimeldeanlage unbedingt erforderlich. Das Stellwerk ist für die Sicherung des Fahrweges und das RBC für die zur Verfügungstellung der Informationen verantwortlich. Daraus wird dann die Movement Authority für das Fahrzeug generiert. Durch die Verwendung des DMI im Führerstand kann auch hier auf ortsfeste Signale verzichtet werden. Diese dienen ausschließlich als Rückfallebene für den Fall, dass das Zugsicherungssystem ausfällt. Aus diesem Grund belassen die meisten Infrastrukturbetreiber die ortsfesten Signale bei einer Umrüstung auf ETCS Level 2. In der Abbildung 23 ist der eben erläuterte Aufbau zur besseren Veranschaulichung graphisch dargestellt.⁶⁶

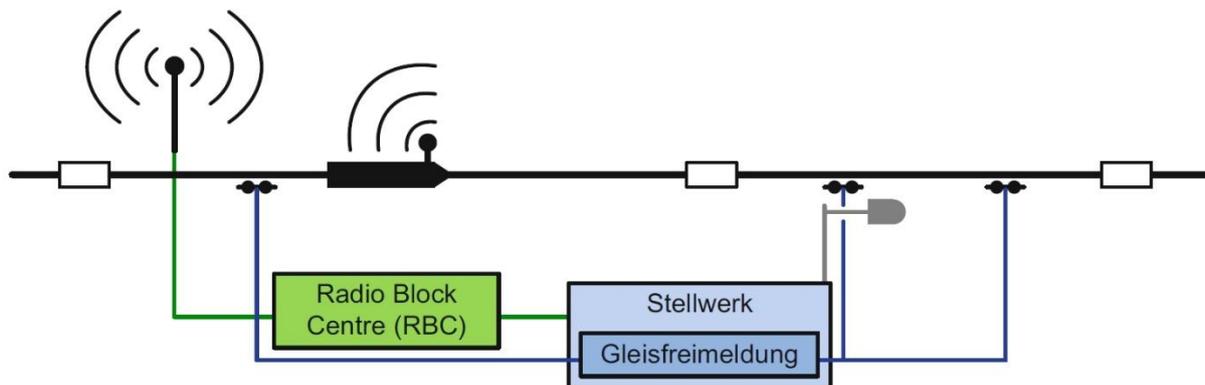


Abbildung 23: Benötigte Komponenten für ETCS Level 2⁶⁷

■ Level 3

In dieser Weiterentwicklung von ETCS Level 2 ist eine Zugintegritätsprüfung für jeden Zug erforderlich. Durch diese wird fahrzeugseitig sichergestellt, dass der Zug vollständig ist. Eine infrastrukturseitige Prüfung durch ortsfeste Gleisfreimeldeanlagen wird somit nicht mehr

⁶⁶ Vgl. Maschek, 2015, S. 230.

⁶⁷ Maschek, 2015, S.231.

benötigt. Gemeinsam mit der sicheren Ortung der Züge kann somit ein Fahren im wandernden Raumabstand, dem sogenannten „Moving Block“, realisiert werden. Ortsfeste Signale können in dieser Ausrüstungsstufe nicht mehr aufgestellt werden, da es hier keine fixen Blockabstände mehr gibt. Somit müssen alle Züge, die auf einer Strecke, die mit ETCS Level 3 ausgerüstet ist, ausnahmslos über dieses Zugsicherungssystem und eine Zugintegritätsprüfung verfügen. Eine Rückfallebene im Störfall gibt es aufgrund des Wegfalles der ortsfesten Signalisierung nicht. In diesem Fall müssten die Fahrten auf Sicht erfolgen, um den Eisenbahnbetrieb im Störfall mit einem vertretbaren Sicherheitsniveau aufrechterhalten zu können.

Aufgrund des „Moving Blocks“ ist nun das RBC und nicht mehr das Stellwerk mit der Gleisfreimeldeanlage für die Abstandhaltung zwischen den Zügen verantwortlich. Durch den Verzicht auf infrastrukturelle Elemente, wie ortsfeste Signale und Gleisfreimeldeanlagen, können in diesem Bereich Einsparungen gemacht werden. In finanzieller Hinsicht ergeben sich einerseits Vorteile, da der Errichtungs- und Instandhaltungsaufwand geringer wird. Andererseits wird durch den Wegfall dieser Elemente die Verfügbarkeit größer, da keine Signale und Gleisfreimeldeanlagen mehr ausfallen können. Ob die Verfügbarkeit des ETCS Level 3 jedoch besser als die dieser ortsfesten Elemente sein wird, wird sich erst noch zeigen müssen. Aktuell scheitert die Umsetzung dieser Ausbaustufe noch an einigen Punkten, die im Unterkapitel 3.3.2 genauer erläutert werden.

In der Abbildung 24 ist der Aufbau des ETCS Level 3 graphisch dargestellt. Wie zu sehen ist, werden auch hier, wie beim Level 2, keine Transparentdatenbalisen mehr verwendet.⁶⁸

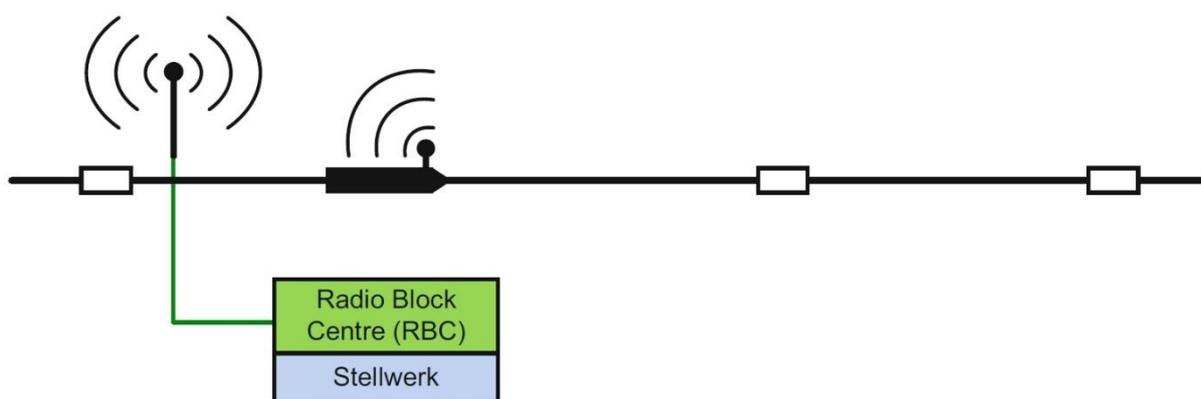


Abbildung 24: Benötigte Komponenten für ETCS L3⁶⁹

⁶⁸ Vgl. Maschek, 2015, S. 230f.

⁶⁹ Maschek, 2015, S.231.

3.2.2 Erreichbare Mindestzugfolgezeiten

Nach der Fertigstellung der Analysen zur Ermittlung der Mindestzugfolgezeiten auf PZB, was dem aktuellen Stand der Wiener S-Bahn-Stammstrecke entspricht, wurde die Infrastruktur in OpenTrack so umgebaut, dass im nächsten Schritt die Analysen für ETCS Level 2 durchgeführt werden konnten. So wurden alle Kanten mit ETCS versehen und an allen Ein- und Ausfahrten der Stammstrecke CAB-Anfangs- und CAB-Endsignale platziert.

In der Abbildung 25 ist dies anhand eines Ausschnittes des Bahnhofes Wien Meidling ersichtlich. Deutlich zu erkennen sind hier die CAB-Signale, die unmittelbar vor den die Bahnsteige begrenzenden Signalen platziert wurden. Weitere dieser Signale sind direkt an den Ausfahrten Richtung Wien Hbf. Gleise 3-12 und zum TS-Werk Matzleinsdorf gesetzt worden. Diese Signale bedeuten, dass ab deren Standort die Infrastruktur mit dem Zugsicherungssystem ETCS inklusive Führerstandssignalisierung ausgerüstet ist (CAB-Anfangssignal) bzw. die ETCS-Ausrüstung endet (CAB-Endsignal). Die gesamte in OpenTrack auf ETCS Level 2 umgebaute Infrastruktur ist im Anhang 2 ersichtlich.

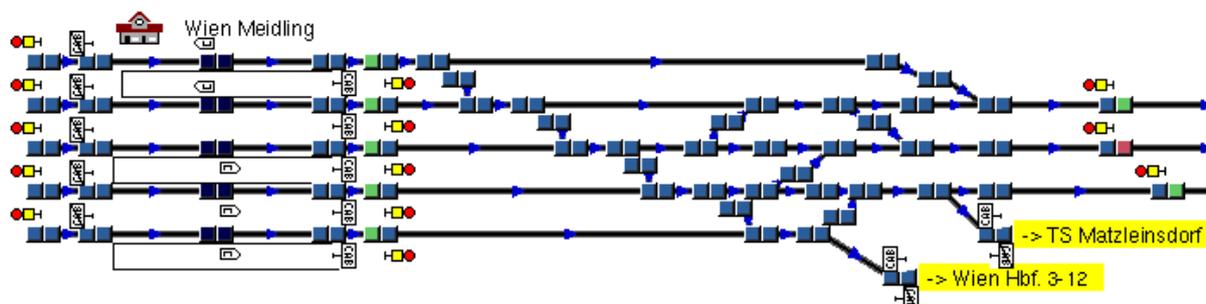


Abbildung 25: Gleisplan Wien Meidling unter ETCS Level 2⁷⁰

Nach der Anpassung der Infrastruktur konnten mithilfe des Headway Calculators, der bereits in Kapitel 3.1.2 vorgestellt wurde, die erreichbaren Mindestzugfolgezeiten bestimmt werden. Die Vorgehensweise war die gleiche wie unter dem Zugsicherungssystem PZB. In den Tabellen 7-10 werden die Ergebnisse, unterteilt in Richtung und Haltezeiten in den Betriebsstellen, vorgestellt.

⁷⁰ Eigene Darstellung.

■ Wien Meidling – Wien Floridsdorf, Haltezeit 30 s:

Vor \ Nach	Doppelstock- Wendezug [s]	4020 [s]	4024 [s]	4746 [s]	Westbahn [s]
Doppelstock- Wendezug	131	113	116	152	198
4020	157	134	138	193	223
4024	150	128	132	186	215
4746	111	105	105	126	178
Westbahn	53	53	53	53	120

Tabelle 7: Mindestzugfolgezeiten ETCS Level 2, Wien Meidling – Wien Floridsdorf, Haltezeit 30 s⁷¹

■ Wien Floridsdorf – Wien Meidling, Haltezeit 30 s:

Vor \ Nach	Doppelstock- Wendezug [s]	4020 [s]	4024 [s]	4746 [s]	Westbahn [s]
Doppelstock- Wendezug	140	122	121	155	139
4020	159	141	140	186	143
4024	161	143	142	198	150
4746	118	110	109	133	134
Westbahn	128	125	124	126	127

Tabelle 8: Mindestzugfolgezeiten ETCS Level 2, Wien Floridsdorf – Wien Meidling, Haltezeit 30 s⁷²

■ Wien Meidling – Wien Floridsdorf, Haltezeit 60 s:

Vor \ Nach	Doppelstock- Wendezug [s]	4020 [s]	4024 [s]	4746 [s]	Westbahn [s]
Doppelstock- Wendezug	161	143	146	182	258
4020	187	164	168	223	283
4024	180	158	162	216	275
4746	141	135	135	156	238
Westbahn	53	53	53	53	150

Tabelle 9: Mindestzugfolgezeiten ETCS Level 2, Wien Meidling – Wien Floridsdorf, Haltezeit 60 s⁷³⁷¹ Eigene Darstellung.⁷² Eigene Darstellung.⁷³ Eigene Darstellung.

■ Wien Floridsdorf – Wien Meidling, Haltezeit 60 s:

Vor \ Nach	Doppelstock- Wendezug [s]	4020 [s]	4024 [s]	4746 [s]	Westbahn [s]
Doppelstock- Wendezug	170	152	151	185	169
4020	189	171	170	216	173
4024	191	173	172	228	180
4746	148	140	139	163	164
Westbahn	158	155	154	156	157

Tabelle 10: Mindestzugfolgezeiten ETCS Level 2, Wien Floridsdorf – Wien Meidling, Haltezeit 60 s⁷⁴

Werden nun die errechneten Mindestzugfolgezeiten der Zugsicherungssysteme PZB und ETCS Level 2 miteinander verglichen, ergeben sich daraus die Werte, die in den Tabellen 11 und 12 abgebildet sind. Für die Berechnung wurden die Mindestzugfolgezeiten unter PZB von jenen unter ETCS Level 2 subtrahiert. Die Differenz aus dieser Rechnung ergibt, um wie viele Sekunden die Mindestzugfolgezeiten unter ETCS Level 2 von jenen unter PZB abweichen. Da die Haltezeiten in beiden Fällen nur additive Größen sind, ergeben sich die gleichen Differenzen, die unabhängig von den gewählten Haltezeiten sind. Die erste der beiden nachfolgenden Tabellen repräsentiert die Richtung Wien Meidling – Wien Floridsdorf, die andere Wien Floridsdorf – Wien Meidling.

■ Wien Meidling – Wien Floridsdorf:

Vor \ Nach	Doppelstock- Wendezug [s]	4020 [s]	4024 [s]	4746 [s]	Westbahn [s]
Doppelstock- Wendezug	7	6	7	12	11
4020	8	7	9	12	11
4024	8	8	8	12	13
4746	6	5	5	8	9
Westbahn	2	2	2	-11	6

Tabelle 11: Differenz der Mindestzugfolgezeiten zwischen ETCS Level 2 und PZB von Meidling nach Floridsdorf⁷⁵

⁷⁴ Eigene Darstellung.

⁷⁵ Eigene Darstellung.

■ Wien Floridsdorf – Wien Meidling:

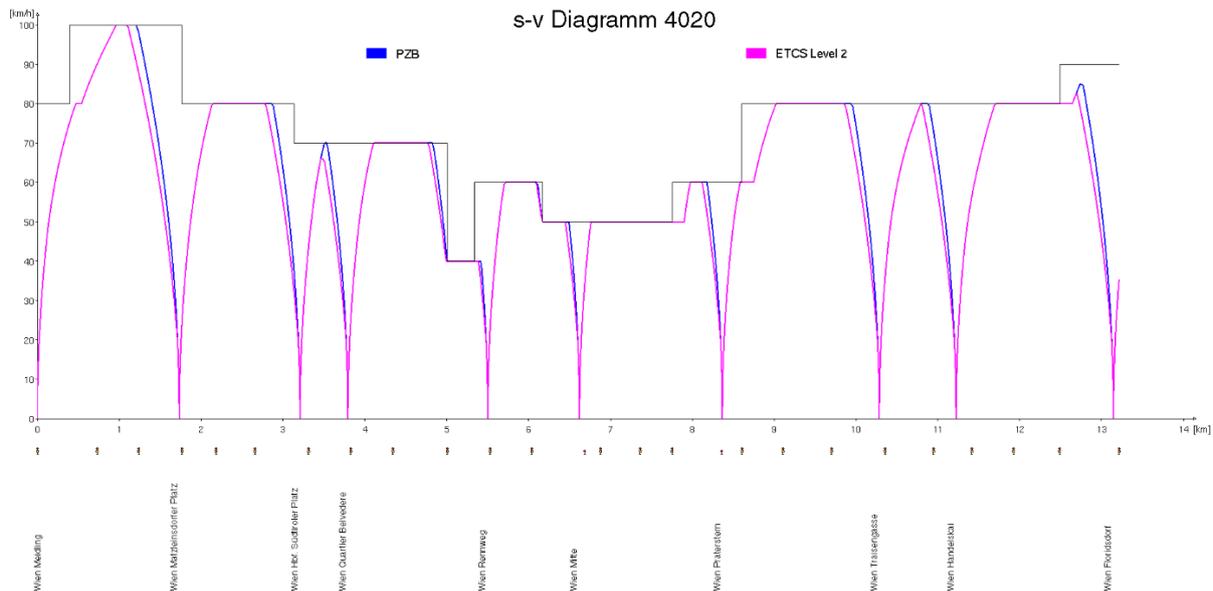
Vor \ Nach	Doppelstock- Wendzug [s]	4020 [s]	4024 [s]	4746 [s]	Westbahn [s]
Doppelstock- Wendzug	8	7	7	8	6
4020	8	7	7	10	6
4024	8	7	7	11	8
4746	7	8	8	7	6
Westbahn	8	7	7	7	7

Tabelle 12: Differenz der Mindestzugfolgezeiten zwischen ETCS Level 2 und PZB von Floridsdorf nach Meidling⁷⁶

Anhand der beiden Tabellen 11 und 12 lässt sich erkennen, dass eine Umrüstung der Wiener S-Bahn-Stammstrecke auf ETCS Level 2 einen Kapazitätsverlust zur Folge hätte, da sich die Mindestzugfolgezeiten, abhängig von den Garnituren, um bis zu 13 Sekunden erhöhen würden. Ein Grund dafür sind die restriktiveren Bremskurven des ETCS. Diese wurden zwar im Laufe der letzten Jahrzehnte stärker gekrümmt und dadurch steiler gestaltet, allerdings sind diese trotzdem noch flacher als die der PZB. Durch eine daraus resultierende langsamere Annäherung an einen Haltepunkt, der in diesem Fall ein Halt zeigendes Signal oder ein Punkt am Bahnsteig, an dem ein haltender Personenzug stehen bleiben soll, sein kann, werden die nachfolgenden Blockabschnitte später freigegeben. Daraus folgt, dass der nachfahrende Zug einen größeren Abstand zum vorausfahrenden Zug halten muss, um ohne Einschränkungen folgen zu können.

In der Abbildung 26 sind die Geschwindigkeitsverläufe der Baureihe 4020 unter der Verwendung der Zugsicherungssysteme PZB und ETCS Level 2 in einem Weg-Geschwindigkeitsdiagramm (s-v Diagramm) dargestellt. Es lässt sich deutlich erkennen, dass das ETCS beim Abbremsen auf eine Geschwindigkeitsreduktion oder einem Halt in einer Betriebsstelle den Zug aufgrund der flacheren Bremskurve deutlich früher zu bremsen beginnen lässt als die PZB.

⁷⁶ Eigene Darstellung.

Abbildung 26: Vergleich PZB-ETCS Level 2 im s-v Diagramm der BR 4020⁷⁷

Damit der Zug bei einer Überschreitung der Bremskurve durch kleinere Ungenauigkeiten in der Geschwindigkeitsregelung nicht unmittelbar eine Zwangsbremmung erfährt, sind folgende verschiedene Überwachungsstufen errichtet worden, die auch in der Abbildung 27 graphisch veranschaulicht sind.

■ Zulässige Geschwindigkeit

Diese Geschwindigkeit wird dem Triebfahrzeugführer am DMI angezeigt.

■ Vorwarngeschwindigkeit

Bei einer bevorstehenden Geschwindigkeitsreduktion wird der Triebfahrzeugführer beim Erreichen der Vorwarngeschwindigkeit auf die bevorstehende Abbremsung hingewiesen.

■ Warnung

Wird die Vorwarngeschwindigkeit geringfügig überschritten und dadurch die Warnkurve erreicht, erfolgt eine Warnung des Triebfahrzeugführers. Diese bleibt so lange bestehen, bis die zulässige Geschwindigkeit wieder erreicht wurde.

■ Schnellbremseinsatzgeschwindigkeit

Beim Erreichen der Schnellbremseinsatzgeschwindigkeit durch eine weitere Erhöhung der Geschwindigkeit über die Warnkurve hinaus, wird automatisch eine Schnellbremsung eingeleitet. Diese wird beim Erreichen der zulässigen Geschwindigkeit jedoch wieder gelöst. Diese Bremskurve ist so berechnet, dass deren Fußpunkt an der End of Authority (EoA) liegt. Das ist jener Punkt auf der Strecke, an dem die zuvor erteilte Movement

⁷⁷ Eigene Darstellung.

Authority endet. In diesem Beispiel ist dieser Punkt am Standort eines „Halt“ zeigenden Signales. Da die Reaktionszeit der Bremsen miteinbezogen wurde, liegt die Kurve der Schnellbremseinsatzgeschwindigkeit unterhalb jener der Schnellbremsgeschwindigkeit.

■ Zwangsbremseinsatzgeschwindigkeit

Als letzte Interventionsebene ist die Zwangsbremseinsatzgeschwindigkeit errichtet worden. Diese liegt, aufgrund der berücksichtigten Reaktionszeit der Bremsen, ebenfalls unterhalb der Kurve der Zwangsbremsgeschwindigkeit. Für diese Kurve werden nicht alle, sondern nur die sicheren Bremsen, zu denen die direkten und indirekten Bremsen eines Zuges gezählt werden, eingerechnet. Dies hat zur Folge, dass die Zwangsbremskurve flacher wird. Da jedoch die anderen Kurven einen vordefinierten Abstand zur Zwangsbremskurve halten müssen, werden diese als Resultat ebenfalls abgeflacht. Dadurch lassen sich die flacheren ETCS-Bremskurven in Abbildung 26 erklären, die in weiterer Folge die in den Tabellen 11 und 12 ersichtliche Vergrößerung der Mindestzugfolgezeiten im Vergleich zur PZB nach sich ziehen.

Um die daraus resultierende Betriebsbehinderung abzumindern, wird der Fußpunkt der Zwangsbremsgeschwindigkeit nicht auf die EoA, sondern auf die Supervised Location (SvL) gelegt. Dies ist der Punkt, bis zu dem der Gleisabschnitt bei der Überfahrt der EoA als gesichert angesehen werden kann. Ein Beispiel für eine SvL ist das Ende des Durchrutschweges hinter einem Signal. Dadurch, dass die SvL hinter der EoA liegt, entfernt sich die Kurve der Zwangsbremsgeschwindigkeit automatisch von den anderen Bremskurven. Somit können diese bei Gewährleistung des erforderlichen Abstandes zur Zwangsbremsgeschwindigkeit steiler gestaltet werden, was eine Verringerung der Betriebsbehinderungen zur Folge hat.⁷⁸

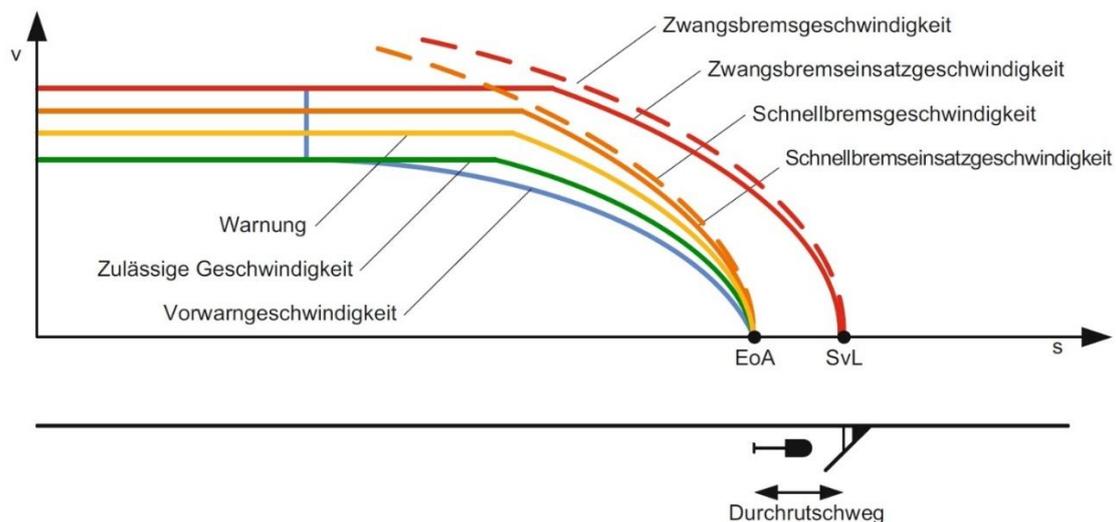


Abbildung 27: ETCS-Überwachungskurven⁷⁹

⁷⁸ Vgl. Maschek, 2015, S. 232ff.

⁷⁹ Maschek, 2015, S. 235.

3.3 ETCS Level 3

3.3.1 Umsetzung in OpenTrack

Da das ETCS Level 2 im Vergleich zum derzeitigen Stand mit PZB in puncto Mindestzugfolgezeiten eine Verschlechterung darstellt, wird im nächsten Schritt die Simulation in OpenTrack unter ETCS Level 3 durchgeführt. Hierfür wurden im Simulationsprogramm die Courses in der Einstellung „Route Reservation / Release“ von „Discrete“ auf „Moving“ umgestellt. Dadurch fahren die Züge nicht mehr im festen Blockabstand, sondern im „Moving Block“, was das wesentliche Merkmal des ETCS Level 3 ist. Die in OpenTrack erstellte Infrastruktur, die für die Untersuchungen mit Level 2 abgeändert wurden, wird auch für die Simulationen mit Level 3 unverändert herangezogen. Da die Courses auf „Moving“ umgestellt wurden, werden die ortsfesten Signale nicht mehr beachtet. Diese können somit für die Simulation mit ETCS Level 3 belassen werden, ohne dass diese das Ergebnis beeinflussen. Die auf ETCS abgeänderte Infrastruktur ist im Anhang 2 abgebildet.

Weiters wurde der „Safety Margin“ auf 50m eingestellt. Dies ist der minimale Sicherheitsabstand zwischen den Zügen, die unter dem „Moving Block“ in ETCS Level 3 verkehren. Da dieser Wert bis jetzt in nur wenigen Ausnahmefällen geregelt wurde, ist im Zuge dieser Arbeit der Safety Margin auf 50m gesetzt worden, was in Österreich der Länge des Schutzweges nach S60 entspricht. Kleinere Werte wären von der Aufsichtsbehörde zu genehmigen. Ein Abstand von 0 m bedeutet beispielsweise, dass die Züge sich im Extremfall Puffer an Puffer folgen würden. Bei einer vollständigen Überwachung der Bremskurve wäre dieses Szenario im Hinblick auf die Sicherheit jedoch unbedenklich.

3.3.2 Erreichbare Mindestzugfolgezeiten

Nach den im Kapitel 3.3.1 erläuterten Anpassungen wurden mithilfe des Headway Calculators von OpenTrack die mit ETCS Level 3 erreichbaren Mindestzugfolgezeiten bestimmt. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 13-16 aufgeführt.

■ Wien Meidling – Wien Floridsdorf, Haltezeit 30 s:

Vor \ Nach	Doppelstock- Wendzug [s]	4020 [s]	4024 [s]	4746 [s]	Westbahn [s]
Doppelstock- Wendzug	90	85	84	121	146
4020	126	92	95	164	169
4024	118	91	91	155	161
4746	83	78	77	81	133
Westbahn	20	15	15	18	67

Tabelle 13: Mindestzugfolgezeiten ETCS Level 3, Wien Meidling – Wien Floridsdorf, Haltezeit 30 s⁸⁰

■ Wien Floridsdorf – Wien Meidling, Haltezeit 30 s:

Vor \ Nach	Doppelstock- Wendzug [s]	4020 [s]	4024 [s]	4746 [s]	Westbahn [s]
Doppelstock- Wendzug	84	80	79	118	95
4020	113	87	86	148	103
4024	126	99	86	164	108
4746	76	72	71	78	76
Westbahn	71	66	66	72	66

Tabelle 14: Mindestzugfolgezeiten ETCS Level 3, Wien Floridsdorf - Wien Meidling, Haltezeit 30 s⁸¹

■ Wien Meidling – Wien Floridsdorf, Haltezeit 60 s:

Vor \ Nach	Doppelstock- Wendzug [s]	4020 [s]	4024 [s]	4746 [s]	Westbahn [s]
Doppelstock- Wendzug	120	115	114	151	206
4020	156	122	125	194	229
4024	148	121	121	185	221
4746	113	108	107	111	193
Westbahn	20	15	15	18	97

Tabelle 15: Mindestzugfolgezeiten ETCS Level 3, Wien Meidling – Wien Floridsdorf, Haltezeit 60 s⁸²⁸⁰ Eigene Darstellung.⁸¹ Eigene Darstellung.⁸² Eigene Darstellung.

■ Wien Floridsdorf – Wien Meidling, Haltezeit 60 s:

Vor \ Nach	Doppelstock-Wendzug [s]	4020 [s]	4024 [s]	4746 [s]	Westbahn [s]
Doppelstock-Wendzug	114	110	109	148	125
4020	143	117	116	178	133
4024	156	129	116	194	138
4746	106	102	101	108	106
Westbahn	101	96	96	102	96

Tabelle 16: Mindestzugfolgezeiten ETCS Level 3, Wien Floridsdorf - Wien Meidling, Haltezeit 60 s⁸³

Werden nun, wie es auch schon in Kapitel 3.2.2 bei ETCS Level 2 gemacht wurde, die errechneten Mindestzugfolgezeiten der Zugsicherungssysteme PZB und ETCS Level 3 miteinander verglichen, ergeben sich daraus die Werte, die in den Tabellen 17 und 18 abgebildet sind. Für die Berechnung wurden die Mindestzugfolgezeiten unter PZB von jenen unter Level 3 subtrahiert. Die Differenz aus dieser Rechnung ergibt, um wie viele Sekunden die Mindestzugfolgezeiten unter ETCS Level 3 von jenen unter PZB abweichen. Da die Haltezeiten in beiden Fällen nur additive Größen sind, ergeben sich die gleichen Differenzen, die unabhängig von den gewählten Haltezeiten sind. Die erste der beiden nachfolgenden Tabellen repräsentiert die Richtung Wien Meidling – Wien Floridsdorf, die andere Wien Floridsdorf – Wien Meidling.

■ Wien Meidling – Wien Floridsdorf

Vor \ Nach	Doppelstock-Wendzug [s]	4020 [s]	4024 [s]	4746 [s]	Westbahn [s]
Doppelstock-Wendzug	-34	-22	-25	-19	-41
4020	-23	-35	-34	-17	-43
4024	-24	-29	-33	-19	-41
4746	-22	-22	-23	-37	-36
Westbahn	-31	-36	-36	-46	-47

Tabelle 17: Differenz der Mindestzugfolgezeiten zwischen ETCS Level 3 und PZB von Meidling nach Floridsdorf⁸⁴

⁸³ Eigene Darstellung.

⁸⁴ Eigene Darstellung.

■ Wien Floridsdorf – Wien Meidling

Vor \ Nach	Doppelstock- Wendezug [s]	4020 [s]	4024 [s]	4746 [s]	Westbahn [s]
Doppelstock- Wendezug	-48	-35	-35	-29	-38
4020	-38	-47	-47	-28	-34
4024	-27	-37	-49	-23	-34
4746	-35	-30	-30	-48	-52
Westbahn	-49	-52	-51	-47	-54

Tabelle 18: Differenz der Mindestzugfolgezeiten zwischen ETCS Level 3 und PZB von Floridsdorf nach Meidling⁸⁵

Hier ist festzustellen, dass sich durch die Ausrüstung der Stammstrecke mit dem Zugsicherungssystem ETCS Level 3 die Mindestzugfolgezeiten gegenüber der PZB deutlich verringern. Diese sind, abhängig von den eingesetzten Garnituren, bis knapp eine Minute geringer als es mit dem aktuell verwendeten Zugsicherungssystem der Fall ist. Der Grund dafür liegt in der Verwendung des „Moving Blocks“. Da die Züge nicht auf ortsfeste Signale fahren, können diese sich nach dem vorausfahrenden Fahrzeug richten und mit einem fixen Zeitabstand folgen. Für den Fall, dass der zeitliche Abstand zweier Züge eine Konstante ist, wird der räumliche Abstand zwischen ihnen kleiner, je geringer die Geschwindigkeit ist. Mithilfe des „Moving Blocks“ von Level 3 können die Fahrzeuge sich bei kleineren Geschwindigkeiten annähern, um den zeitlichen Abstand gleich zu halten. Einzig der definierte Sicherheitsabstand (Safety Margin), der zwischen zwei Zügen zumindest eingehalten werden muss, verhindert, dass sich diese bei sehr kleinen Geschwindigkeiten zu stark annähern.

Bei konventionellen Zugsicherungssystemen ohne „Moving Block“, wie beispielsweise der PZB, können die Züge aufgrund der festgelegten ortsfesten Blockabstände nicht auf gleichbleibenden zeitlichen Abstand fahren. Diese verkehren hier mit gleichbleibenden räumlichen Abständen. Für den Fall, dass dieser Abstand eine Konstante ist, bedeutet das, dass bei geringer werdenden Geschwindigkeiten der zeitliche Abstand zwischen den Zügen größer wird. Somit sind die Bereiche rund um Bahnhöfe und Haltestellen jene Orte, durch die die Mindestzugfolgezeiten anwachsen.

Derzeit gibt es allerdings noch einige Hürden, die für eine Verwendung des ETCS Level 3 überwunden werden müssen. Diese sind nachfolgend aufgelistet.⁸⁶

⁸⁵ Eigene Darstellung.

⁸⁶ Vgl. <http://www.svenherzfeld.de/bahnen/ETCS/level.htm#Level3>, 28.07.2019.

■ Zugintegritätsprüfung

Eine Freimeldung funktioniert nur dann, wenn die Zugintegrität durch den Ausschluss einer Zugtrennung gewährleistet werden kann. Des Weiteren muss die Zuglänge genau bekannt sein, um die Bremskurve des folgenden Zuges bestimmen zu können. Bei Triebwagen bzw. Triebwagenzügen mit Bus ist das sehr leicht, da die Zuglängen automatisch ermittelt und Zugtrennungen so gut wie nie auftreten. Falls doch, wird dies sofort bemerkt. Bei Güterzügen ist dies nicht mehr so ohne weiteres möglich, da hier Zugtrennungen durchaus öfter vorkommen und die Wagenzüge aufgrund der großen Vielfalt an Wagentypen immer unterschiedlich lang sein können. Die Ermittlung der Wagenzuglänge ist hier vielmehr nur manuell möglich, was durch menschliches Versagen ein großes Sicherheitsrisiko bergen kann.

■ Datenübermittlung bei „Moving Block“

Aufgrund der begrenzten Bandbreite, die das GSM-R zur Datenübertragung zwischen Fahrzeug und RBC zur Verfügung hat, ist nur eine zyklische und keine kontinuierliche Freimeldung seitens RBC möglich. Realistisch sind hier Zeiten, die bei mindestens 6 s liegen. In dieser Zeit hat ein Zug zwischen 150 m (Güterzug) und bis über 500 m (Hochgeschwindigkeitszug) zurückgelegt. Aufgrund dieser nur zyklischen Datenübertragung kann hier nicht mehr von einem klassischen „Moving Block“ gesprochen werden.

■ Genauigkeit der Positionsbestimmung

Um die Position der Züge genau bestimmen zu können, ist eine Wegstreckenmessung erforderlich. Ein einfacher Umdrehungszähler ist dabei nicht genug, da die Räder beim Bremsen und Beschleunigen gleiten bzw. schleudern können. Im ungünstigsten Fall kann die Ungenauigkeit über 100% betragen. Um die Genauigkeit zu verbessern, kann eine Vergleichsmessung an allen Radsätzen, eine Messung der nicht angetriebenen bzw. gebremsten Achsen oder eine Radarmessung durchgeführt werden. Zusätzlich dienen ortsfeste Balisen dazu, punktuell die genaue Position der darüberfahrenden Züge zu bestimmen.⁸⁷

■ Funktionsfähigkeit bei ETCS-Ausfall

Bei einem Ausfall der ETCS-Fahrzeuggeräte bzw. des Funks funktioniert die konventionelle Freimeldung und erlaubt grundsätzlich auch einen Mischbetrieb zwischen Fahrzeugen mit und

⁸⁷ Vgl. <http://www.svenherzfeld.de/bahnen/ETCS/hardware.htm#Odometrie>, 28.07.2019.

ohne ETCS. Bei Level 3 ist dies nicht mehr möglich, da die auf solch ausgerüsteten Strecken verkehrenden Züge aufgrund der fahrzeugseitig benötigten Ausrüstung (DMI, Zugintegritätsprüfung etc.) ETCS eingebaut haben müssen. Bei einem Ausfall der ETCS-Fahrzeuggeräte kann der Zug somit, anders als es bei den unteren Leveln der Fall ist, nicht mehr auf einer mit Level 3 ausgerüsteten Strecke verkehren.

3.4 ETCS Level 2 mit Blockverdichtung

3.4.1 Idee

Eine Möglichkeit, um die Mindestzugfolgezeiten von ETCS gegenüber der PZB zu verbessern, ist der Einsatz von Level 2 mit Blockverdichtung. Bei konventionellen Zugsicherungssystemen, die den Aufbau von ortsfesten Signalen an der Strecke voraussetzen, ist der Blockabstand durch den Bremsweg der Züge begrenzt. Der Grund dafür ist der, dass einerseits der Abstand zwischen Vor- und Hauptsignalen dem Bremsweg entsprechen muss, da sich der Triebfahrzeugführer aufgrund der fehlenden Führerstandssignalisierung nach den ortsfesten Signalen richten muss. Andererseits darf das Vorsignal im Extremfall direkt am Standort des vorhergehenden Hauptsignales stehen. Es darf nicht weiter nach vorne gesetzt werden, da sich sonst ein Hauptsignal zwischen dem Vorsignal und dem Hauptsignal befindet, auf das es sich bezieht. Dies könnte zu Verwirrungen beim Triebfahrzeugführer führen, was als Konsequenzen betriebliche Beeinträchtigungen durch fehlerhaftes Abbremsen bis hin zu sicherheitsgefährdenden Zwischenfällen durch kein oder ein zu spätes Abbremsen herbeirufen kann. Dadurch ist eine derartige Signalanordnung nicht erlaubt. Aus diesen Gründen ist der Blockabstand nach unten begrenzt, wodurch Blockverdichtungen im konventionellen Signalisierungssystem nur bis zu einem gewissen Grad möglich sind, nämlich kombinierte Signale aus Haupt- und Vorsignalen.

Bei ETCS Level 2 fällt diese Begrenzung weg. Durch die Führerstandssignalisierung sind keine ortsfesten Signale mehr notwendig. Das EoA kann durch das Zugsicherungssystem an jeden definierten Punkt der Strecke gesetzt werden und die hinterlegten Bremskurven bringen den Zug dort oder im schlimmsten Fall am SvL zu stehen. Es sind somit weder Vorgaben der Vor- und Hauptsignalsetzung noch die Bremsweglängen bei den Blockabständen zu berücksichtigen, da der Triebfahrzeugführer den Abstand bis zum EoA auf seinem DMI im Führerstand ablesen und dementsprechend rechtzeitig den Bremsvorgang einleiten kann. Die Blockabstände können daher auf einige wenige Meter verkürzt werden. In diesem Bereich haben ortsfeste Signale aufgrund der Übersichtlichkeit und des einzuhaltenden Bremswegabstandes ohnehin keinen Sinn mehr, weswegen diese bei Blockverdichtungen in solchem Ausmaß durch virtuelle Signale ersetzt werden.

Mit dieser Methode kann mit den derzeit vorhandenen technischen Möglichkeiten das Zugsicherungssystem ETCS Level 3 annähernd nachgestellt werden. Die Qualität hängt dabei von der Größe der Blockabstände ab. Je kleiner diese sind, desto eher nähert es sich dem „Moving Block“ an, obwohl noch immer auf festgesetzte virtuelle Blöcke gefahren wird. Die Verkleinerung der Blockabstände kann im Theoretischen so weit geführt werden, dass diese einige Meter kurz werden. Sobald dies der Fall ist, ist der „Moving Block“ praktisch vorhanden. Im Unterschied zu ETCS Level 3 sind aber immer noch infrastrukturseitige Gleisfreimeldeanlagen notwendig.⁸⁸

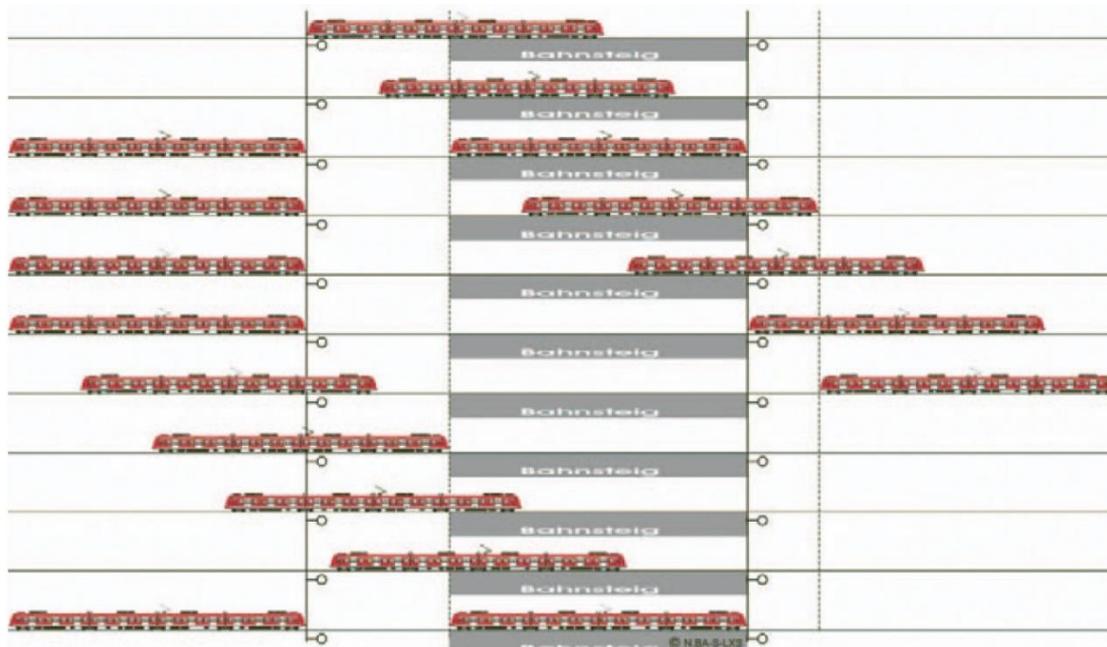


Abbildung 28: Nachrücksequenzen ohne LZB-Ausrüstung⁸⁹

Da sich die Züge bei gleichbleibendem zeitlichem Abstand räumlich weiter annähern, wenn die Geschwindigkeiten sich verringern, ist es am effizientesten, Blockverdichtungen in Abschnitten der Infrastruktur durchzuführen, in welchen geringe Geschwindigkeiten gefahren werden. Wie auch bei der Wiener S-Bahn-Stammstrecke sind dies üblicherweise die Bereiche um Bahnhöfe und Haltestellen, da dort haltende Fahrzeuge aufgrund der Abbrems- und Beschleunigungsvorgänge in bzw. aus dem Stand langsam verkehren. Der nachfolgende Zug kann somit dem am Bahnsteig stehenden Zug näher auffahren. Bei dessen Ausfahrt kann daher der folgende Zug schneller nachrücken, wodurch die Mindestzugfolgezeit verkürzt und die Kapazität der Strecke erhöht werden kann. In der Abbildung 29 ist dies anhand der Münchner S-Bahn-Stammstrecke ersichtlich. Wegen dem Wunsch nach einer Erhöhung der Kapazität der Strecke zwischen München Pasing und München Ost wurde dort der LZB-

⁸⁸ Eichenberger, 3/2007, S.6ff.

⁸⁹ Hornemann, 9/2015, S.15.

Betrieb aufgenommen. Mittels virtueller Signale wurden die Bahnsteigbereiche in kleinere Blockabschnitte unterteilt, die in der Abbildung 29 als Sektoren A-F gekennzeichnet sind. Im Vergleich zu Abbildung 28, in welcher der nachfahrende Zug am Einfahrsignal warten muss, bis der Bahnsteig vollständig geräumt ist, ist zu erkennen, dass aufgrund der Blockverdichtung das Nachrücken des folgenden Zuges mit Blockverdichtung deutlich früher möglich ist. Obwohl sich die vorausfahrende Garnitur noch im Bahnsteigbereich befindet, kann sich der nachfahrende Zug über dem Einfahrsignal hinweg schon annähern. Die Mindestzugfolgezeiten und in weiterer Folge die Kapazitäten der Münchner S-Bahn-Stammstrecke lassen sich alleine durch diese Maßnahme von 24 auf 30 Züge pro Stunde und Richtung anheben, was einem durchschnittlichen Takt von 2 min entspricht.⁹⁰

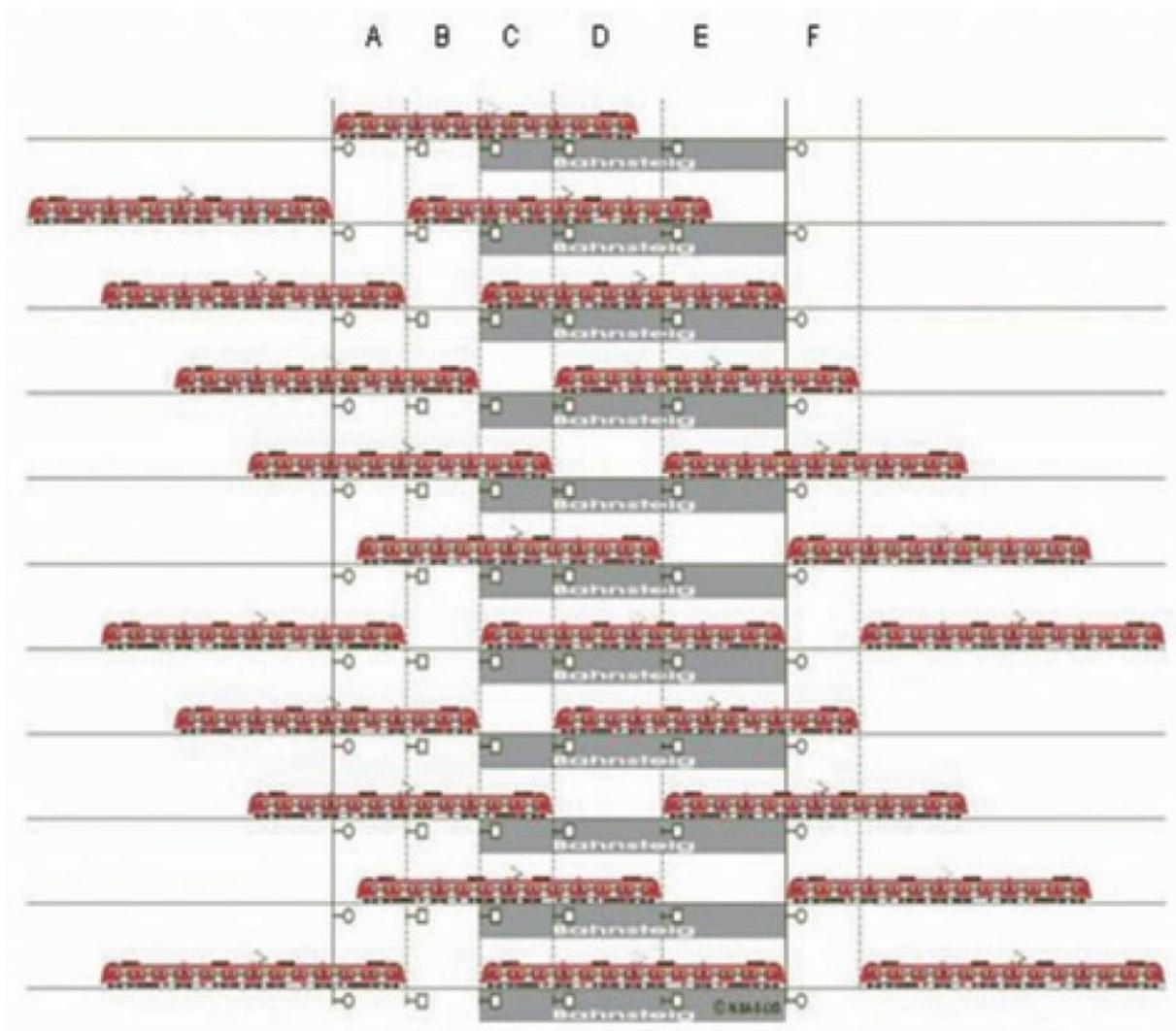


Abbildung 29: Nachrücksequenzen mit LZB-Ausrüstung⁹¹

⁹⁰ Vgl. Hornemann, 9/2015, S.14ff.

⁹¹ Hornemann, 9/2015, S.16.

3.4.2 Erreichbare Mindestzugfolgezeiten

Um mit den Analysen zu den erreichbaren Mindestzugfolgezeiten beginnen zu können, musste in OpenTrack zuerst die Infrastruktur der Wiener S-Bahn-Stammstrecke angepasst werden. Als Grundlage diente die bereits mit ETCS Level 2 ausgerüstete Strecke. In den Bereichen um die Bahnsteige in den Betriebsstellen wurde diese Infrastruktur um weitere Blöcke ergänzt. Hierfür wurden aus den vorhin genannten Gründen virtuelle Signale eingefügt, die sich in einem Abstand von 50 m zueinander befinden. In Anhang 3 ist der gesamte Gleisplan für diese Variante des ETCS Level 2 mit Blockverdichtung im Haltestellenbereich dargestellt. Die Abbildung 30 zeigt mit der Haltestelle Handelskai einen Ausschnitt aus diesem gesamten Plan.

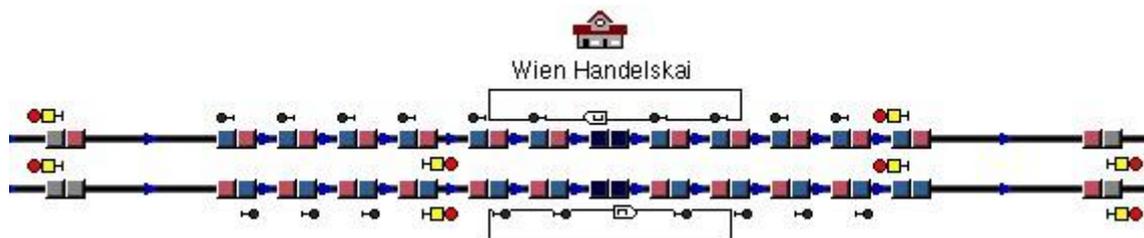


Abbildung 30: ETCS Level 2 mit Blockverdichtung am Beispiel von Wien Handelskai⁹²

Deutlich zu erkennen sind die zusätzlich eingefügten virtuellen Signale, die in OpenTrack als kleinere, graue Signale dargestellt werden. Deren Abstand entspricht genau dem des in Österreich gängigen Schutzweges von 50 m ab dem Signalstandort. Da dieser in den Berechnungen der Mindestzugfolgezeiten berücksichtigt wurde, muss zwischen zwei Zügen immer zumindest einer dieser verkürzten Blockabschnitte frei bleiben.

Wie anhand der Anhänge 1-3 sowie in einem Ausschnitt in Abbildung 28 ersichtlich wird, ist die komplette Wiener S-Bahn-Stammstrecke im Gleiswechselbetrieb ausgerüstet. Dieser ist dadurch gekennzeichnet, dass nicht nur das im Regelfall befahrene Gleis, sondern auch das Gegengleis mit Hauptsignalen ausgerüstet sind. Somit können Züge unter Sicherung des Streckenblocks jederzeit das Gegengleis befahren. Einerseits sind dadurch die Errichtungs- und Instandhaltungskosten aufgrund der doppelten Anzahl an Signalen höher als beim Richtungsbetrieb, andererseits kommt es jedoch zu geringeren betrieblichen Einschränkungen, wenn Züge aufgrund von eingleisigen Sperrungen, Störungen oder aus betrieblichen Gründen das Gegengleis befahren müssen.⁹³

⁹² Eigene Darstellung.

⁹³ Vgl. Pachi, 2017, S.40.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit des Gleisplanes sind die eingefügten virtuellen Signale in OpenTrack nur in eine Richtung eingesetzt. Diese virtuellen Signale gelten jedoch auch für die Gegenrichtung, um im Gleiswechselbetrieb bei der Fahrt am Gegengleis auch von den Vorteilen der Blockverdichtung im Haltestellenbereich profitieren zu können. Aus denselben Gründen wurde die Blockverdichtung in den Bahnhöfen nur auf den in der Simulation befahrenen Gleise vorgenommen. Bei einer Umsetzung des ETCS 2 mit Blockverdichtung sind die virtuellen Signale in den jeweiligen Betriebsstellen dann auch auf den Gleisen einzufügen, die in OpenTrack damit nicht ausgerüstet wurden.

In den nachfolgenden Tabellen 19-22 sind die erreichbaren Mindestzugfolgezeiten unter ETCS Level 2 mit Blockverdichtung im Haltestellenbereich aufgelistet.

■ Wien Meidling – Wien Floridsdorf, Haltezeit 30 s:

Vor \ Nach	Doppelstock-Wendenzug [s]	4020 [s]	4024 [s]	4746 [s]	Westbahn [s]
Doppelstock-Wendenzug	104	99	98	121	160
4020	140	110	109	170	185
4024	131	109	108	160	178
4746	100	95	94	97	152
Westbahn	42	35	34	41	84

Tabelle 19: Mindestzugfolgezeiten ETCS Level 2 mit Blockverdichtung, Meidling – Floridsdorf, Haltezeit 30 s⁹⁴

■ Wien Floridsdorf – Wien Meidling, Haltezeit 30 s:

Vor \ Nach	Doppelstock-Wendenzug [s]	4020 [s]	4024 [s]	4746 [s]	Westbahn [s]
Doppelstock-Wendenzug	98	93	92	135	103
4020	135	100	99	175	111
4024	152	115	98	192	121
4746	90	85	84	90	86
Westbahn	83	78	75	85	91

Tabelle 20: Mindestzugfolgezeiten ETCS Level 2 mit Blockverdichtung, Floridsdorf – Meidling, Haltezeit 30 s⁹⁵

⁹⁴ Eigene Darstellung.

⁹⁵ Eigene Darstellung.

■ Wien Meidling – Wien Floridsdorf, Haltezeit 60 s:

Nach Vor	Doppelstock- Wendenzug [s]	4020 [s]	4024 [s]	4746 [s]	Westbahn [s]
Doppelstock- Wendenzug	134	129	128	151	220
4020	170	140	139	200	245
4024	161	139	138	190	238
4746	130	125	124	127	212
Westbahn	42	35	34	41	114

Tabelle 21: Mindestzugfolgezeiten ETCS Level 2 mit Blockverdichtung, Meidling – Floridsdorf, Haltezeit 60 s⁹⁶

■ Wien Floridsdorf – Wien Meidling, Haltezeit 60 s:

Nach Vor	Doppelstock- Wendenzug [s]	4020 [s]	4024 [s]	4746 [s]	Westbahn [s]
Doppelstock- Wendenzug	128	123	122	165	133
4020	165	130	129	205	141
4024	182	145	128	222	151
4746	120	115	114	120	116
Westbahn	113	108	105	115	111

Tabelle 22: Mindestzugfolgezeiten ETCS Level 2 mit Blockverdichtung, Floridsdorf – Meidling, Haltezeit 60 s⁹⁷

Werden nun, wie es auch schon in Kapitel 3.2.2 bei ETCS Level 2 ohne Blockverdichtung gemacht wurde, die errechneten Mindestzugfolgezeiten der Zugsicherungssysteme PZB und ETCS Level 2 mit Blockverdichtung miteinander verglichen, ergeben sich daraus die Werte, die in den Tabellen 23 und 24 abgebildet sind. Für die Berechnung wurden die Mindestzugfolgezeiten unter PZB von jenen unter Level 2 mit Blockverdichtung subtrahiert. Die Differenz aus dieser Rechnung ergibt, um wie viele Sekunden die Mindestzugfolgezeiten unter ETCS Level 3 von jenen unter PZB abweichen. Da die Haltezeiten in beiden Fällen nur additive Größen sind, ergeben sich die gleichen Differenzen, die unabhängig von den gewählten Haltezeiten sind. Daher sind nachfolgend nur zwei Tabellen aufgezeigt. Eine repräsentiert die Richtung Wien Meidling – Wien Floridsdorf, die andere Wien Floridsdorf – Wien Meidling.

⁹⁶ Eigene Darstellung.

⁹⁷ Eigene Darstellung.

■ Wien Meidling – Wien Floridsdorf:

Vor \ Nach	Doppelstock-Wendenzug [s]	4020 [s]	4024 [s]	4746 [s]	Westbahn [s]
Doppelstock-Wendenzug	-20	-8	-11	-19	-27
4020	-9	-17	-20	-11	-27
4024	-11	-11	-16	-14	-24
4746	-5	-5	-6	-21	-17
Westbahn	-9	-16	-17	-23	-30

Tabelle 23: Differenz der Mindestzugfolgezeiten zwischen ETCS Level 2 mit Blockverdichtung und PZB von Meidling nach Floridsdorf⁹⁸

■ Wien Floridsdorf – Wien Meidling:

Vor \ Nach	Doppelstock-Wendenzug [s]	4020 [s]	4024 [s]	4746 [s]	Westbahn [s]
Doppelstock-Wendenzug	-34	-22	-22	-12	-30
4020	-16	-34	-34	-1	-26
4024	-1	-21	-37	5	-21
4746	-21	-17	-17	-36	-42
Westbahn	-37	-40	-42	-34	-29

Tabelle 24: Differenz der Mindestzugfolgezeiten zwischen ETCS Level 2 mit Blockverdichtung und PZB von Floridsdorf nach Meidling⁹⁹

Anhand der beiden Tabellen 23 und 24 lässt sich erkennen, dass aufgrund der Blockverdichtung eine teilweise deutliche Verbesserung der Mindestzugfolgezeiten gegenüber PZB möglich ist. Im Vergleich zum ETCS Level 2, bei welchem sich die Kapazität der Strecke gegenüber der PZB aufgrund der restriktiveren Bremskurven sogar verschlechtert hat, können durch den Einsatz einer Blockverdichtung in den Haltestellenbereichen die Mindestzugfolgezeiten unter ETCS Level 2 bei fast allen Garnituren verbessert werden. Die Differenzen schwanken hierbei zwischen fast keinen Änderungen der Mindestzugfolgezeiten bis hin zu deutlichen Verbesserungen von bis zu 42 s.

⁹⁸ Eigene Darstellung.

⁹⁹ Eigene Darstellung.

In der Abbildung 31 ist dies graphisch verdeutlicht. Dort sind für einen Zug die Sperrzeiten für zwei verschiedene Signalabstände dargestellt. Die Sperrzeit, die für den vollen Blockabstand gilt, ist in hellgrau eingezeichnet. Wird dieser Blockabstand nun halbiert, ergeben sich zwei Sperrzeiten, die jeweils kleiner als die des gesamten Blockabstandes sind. In der Abbildung 31 sind diese Sperrzeiten in dunkelgrau dargestellt. Dies hat zur Folge, dass ein Teil des gesamten Blocks schon früher freigegeben werden kann, als wenn dieser nicht unterteilt wäre. Diese Zeit ist die Differenz zwischen der Sperrzeit bei vollem Blockabstand und die Sperrzeit bei Halbregelabstand. Somit können folgende Züge schon früher nachfahren, wodurch sich die Mindestzugfolgezeiten verringern.

Wird der gesamte Block nun nicht in der Hälfte, sondern, wie es in dieser Arbeit gemacht wurde, in noch kleinere Abschnitte geteilt, werden diese Sperrzeiten noch kleiner. Dies lässt wiederum die Blockabschnitte hinter einem Zug zu einem noch kürzeren Intervall werden, wodurch folgende Fahrzeuge noch früher nachfahren können. Dieses Gedankenexperiment kann so weit geführt werden, bis die Blockabstände nur mehr unendlich klein sind. Dies würde dann dem „Moving Block“ entsprechen, der bei ETCS Level 3 zum Einsatz kommt. Den Beweis zu dieser Theorie liefern die Ergebnisse der Simulation, die in den Tabellen 23 und 24 dargestellt werden. Diese zeigen, dass die Mindestzugfolgezeiten bei ETCS Level 2 mit Blockverdichtung im Vergleich zur PZB deutlich geringer sind.

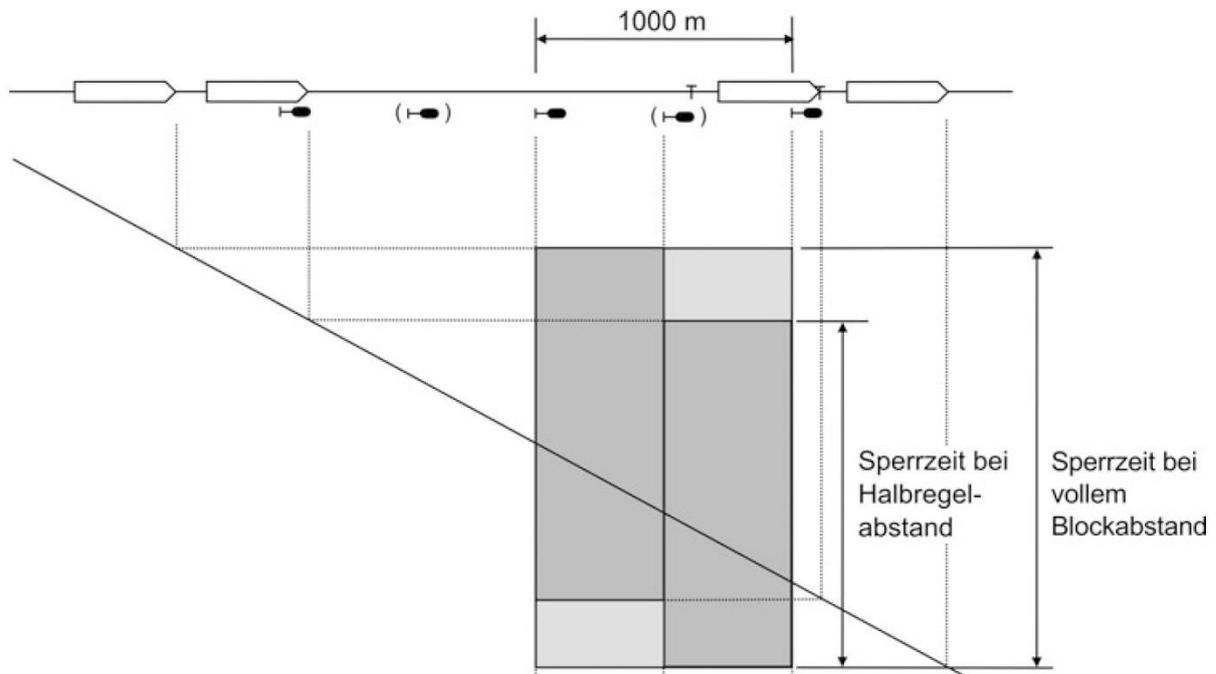


Abbildung 31: Sperrzeiten bei unterschiedlichen Blockabständen¹⁰⁰

¹⁰⁰ Pacht, 2016, S.52.

3.5 Ergebnis der Analysen

3.5.1 Einfluss der Heterogenität auf die Kapazität einer Strecke

Wie anhand der Ergebnisse der Analysen aus dem Kapitel 3 zu sehen ist, verursacht die große Anzahl an unterschiedlichen Garnituren, die auf der Wiener S-Bahn-Stammstrecke verkehren, eine große Bandbreite der Mindestzugfolgezeiten. Dies kann, unabhängig vom verwendeten Zugsicherungssystem, bei jeder Simulation festgestellt werden. Eine große Anzahl unterschiedlicher Fahrzeuge hat, wie in der Abbildung 32 ersichtlich wird, einen negativen Einfluss auf die Kapazität einer Strecke.

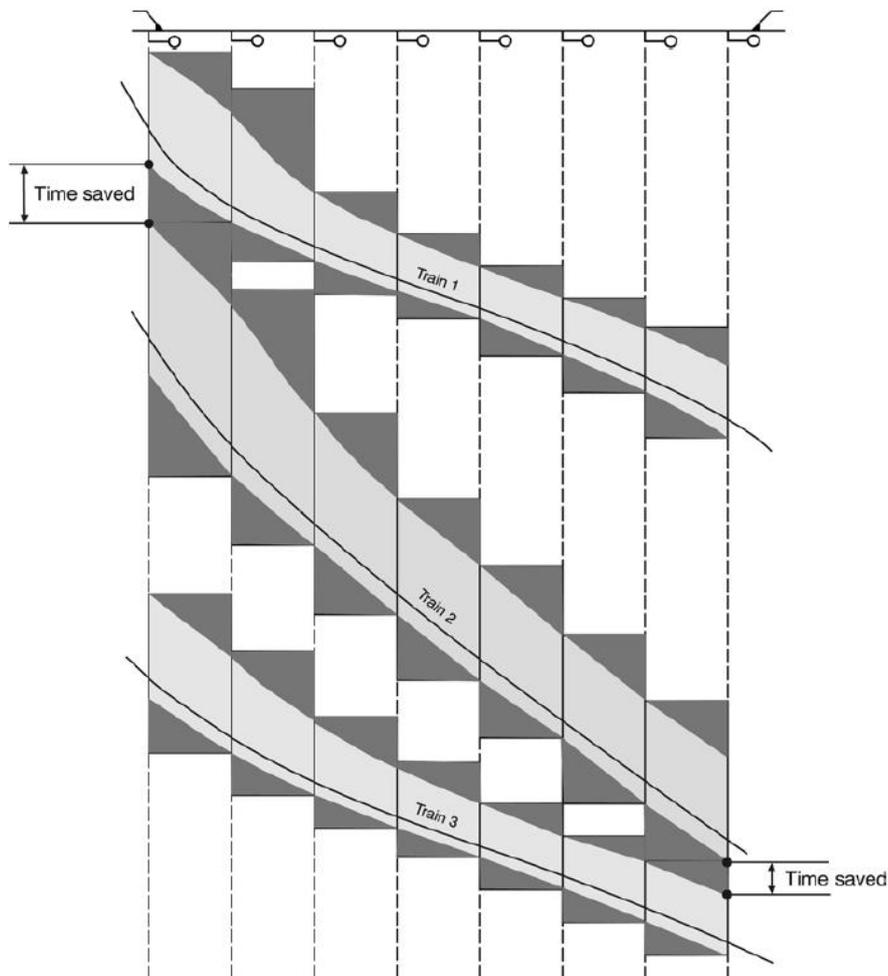


Abbildung 32: Mindestzugfolgezeiten im Mischverkehr¹⁰¹

¹⁰¹ Theeg/Vlasenko, 2018, S. 57.

Die Trassen der Züge 1 und 3 stellen einen schnell verkehrenden Hochgeschwindigkeitszug dar, während die Trasse des Zuges 2 aufgrund des stärkeren Gefälles des Graphen auf einen langsameren Güterzug hinweist. Wenn Zug 2 dem vorherfahrenden Zug 1 direkt im Blockabstand folgt, vergrößert sich aufgrund der geringeren Geschwindigkeit bis zum zweiten Bahnhof der Abstand dieser beiden Züge deutlich. Würde der schnellere Zug 3 nun im Blockabstand nachfahren, würde dieser aufgrund der höheren Geschwindigkeit dem vorausfahrenden Zug 2 auflaufen und dadurch Verspätungen verursachen. Um diese Konflikte zu vermeiden, ist es sinnvoll, Zug 3 später aus dem Abgangsbahnhof abfahren zu lassen, wodurch dieser bis zum Zielbahnhof nicht durch den vorausfahrenden Güterzug beeinflusst wird.

Wie sich anhand der für jeden Zug eingezeichneten Sperrzeiten erkennen lässt, gehen durch die eben erläuterten Folgen des Mischverkehrs viele freie Kapazitäten verloren. Wäre Zug 2 nun ebenfalls ein Hochgeschwindigkeitszug, könnten dieser und in weiterer Folge Zug 3 direkt im Blockabstand nachfahren. Wie in der Abbildung 33 dargestellt ist, entstehen dadurch Bündeltrassen, welche durch eng anliegende Sperrzeiten die Kapazitäten einer Strecke optimal ausnutzen. Dies ist daran zu erkennen, dass so gut wie keine freien Bereiche zwischen den Sperrzeiten mehr existieren.

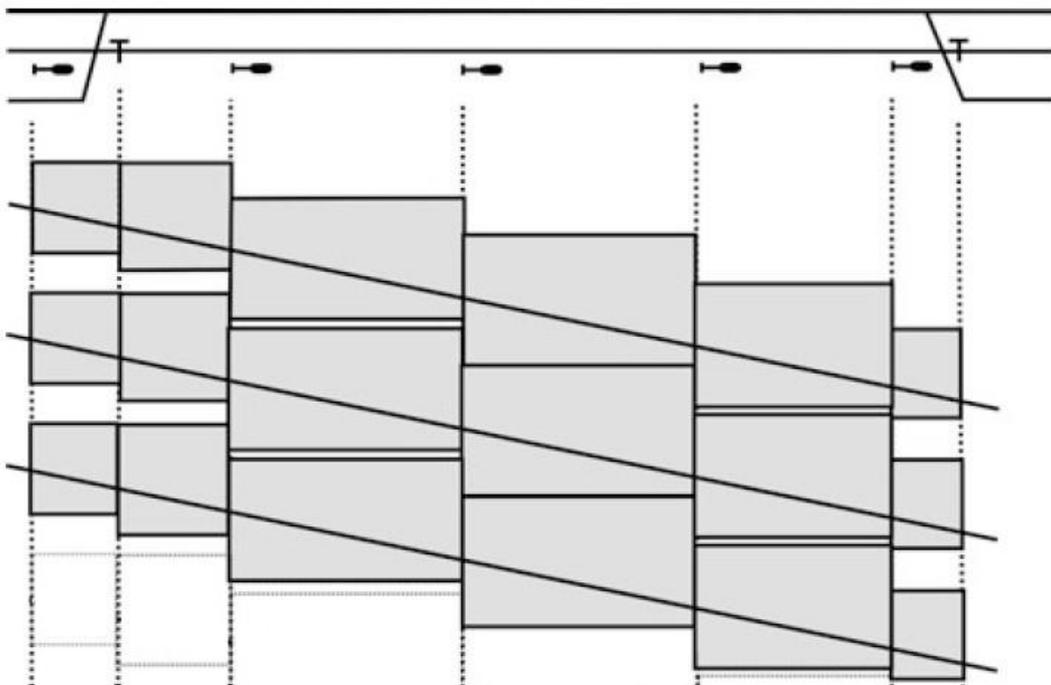


Abbildung 33: Mindestzugfolgezeiten im homogenen Verkehr¹⁰²

¹⁰² Vgl. Pachi, 2016, S.198.

Durch einen Mischverkehr sind in weiterer Folge auch dem „Moving Block“ des ETCS Level 3 Grenzen gesetzt, wie es in Abbildung 32 ersichtlich wird. In dunkelgrau sind die Sperrzeiten bei festen Blockabständen, in hellgrau die bei „Moving Block“ dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die aufgrund der Heterogenität verloren gehende Kapazität deutlich größer ist als die, die durch den „Moving Block“ gewonnen werden kann. Die Mindestzugfolgezeiten der Bündeltrassen im homogenen Verkehr sind kleiner als die im Mischverkehr unter ETCS Level 3. Aus diesem Grund führt der Einsatz des „Moving Blocks“ auf einer von Homogenität geprägten S-Bahn-Stammstrecke zu den gewünschten Kapazitätswüchsen, die in Kapitel 3.3.2 ersichtlich sind. Wären diese Analysen an einer durch Heterogenität geprägten Hochleistungsstrecke durchgeführt worden, hätte es wahrscheinlich keine solch deutlichen Verringerungen in den Mindestzugfolgezeiten gegeben.¹⁰³

Um die Zusammenhänge zwischen der Art der Verkehre und den Parametern Anzahl von Zügen, Stabilität, Heterogenität und Durchschnittsgeschwindigkeit besser verstehen zu können, ist die Abbildung 34 aus dem UIC Merkblatt 406 hilfreich. Hier ist zwar im Speziellen der U-Bahnbetrieb als Beispiel eines homogenen Verkehrs genannt, allerdings kann dies auch auf den S-Bahnverkehr der Wiener Stammstrecke umgelegt werden. Als Beispiel von Strecken mit Mischverkehr eignen sich Hochleistungsstrecken, auf denen sowohl Hochgeschwindigkeitszüge als auch Güterzüge verkehren. Auch hier zeigt sich, dass aus den vorhin genannten Gründen Strecken mit homogenem Verkehr eine deutlich höhere Kapazität aufweisen als Strecken mit heterogenem Verkehr. Des Weiteren lässt sich aus der Abbildung erkennen, dass bei einem gemischten Zugbetrieb die Durchschnittsgeschwindigkeit größer ist. Dies hat den Grund, dass beim Mischverkehr schnellere Hochgeschwindigkeitszüge die durchschnittliche Geschwindigkeit anheben. Aber auch die Güterzüge tragen dazu bei, da diese im Regelfall durch ihre konstante Geschwindigkeit schneller verkehren als Züge der S-Bahn, die regelmäßig nach wenigen Kilometern in Betriebsstellen für den Fahrgastwechsel halten müssen. Ein weiterer Vorteil von Strecken mit homogenem Verkehr ist eine höhere Fahrplanstabilität im Vergleich zu jenen mit heterogenem Verkehr.¹⁰⁴

Diese Grafiken beziehen sich zwar auf unterschiedliche Zuggattungen bei einer mit Mischverkehr bzw. homogenem Verkehr befahrenen Strecke, allerdings kann das Szenario leicht abgeändert auf die Stammstrecke umgelegt werden. In diesem Fall wären dann die drei Züge aus Abbildung 32 keine Hochgeschwindigkeits- bzw. Güterzüge, sondern stärkere und schwächere Fahrzeuge mit unterschiedlichem Beschleunigungs- und Verzögerungsverhalten. Einerseits zeigt sich durch die ermittelten Mindestzugfolgezeiten in Kapitel 3, andererseits anhand der Abbildungen 32-34, dass durch den Einsatz von ausschließlich baugleichen

¹⁰³ Vgl. Theeg/Vlasenko, 2018, S. 56f.

¹⁰⁴ Vgl. o.V.: UIC-Merkblatt 406, 2004, S.3.

Fahrzeugen die Streuung der Zugfolgezeiten verringert und die Kapazität der Wiener S-Bahn-Stammstrecke erhöht werden kann.

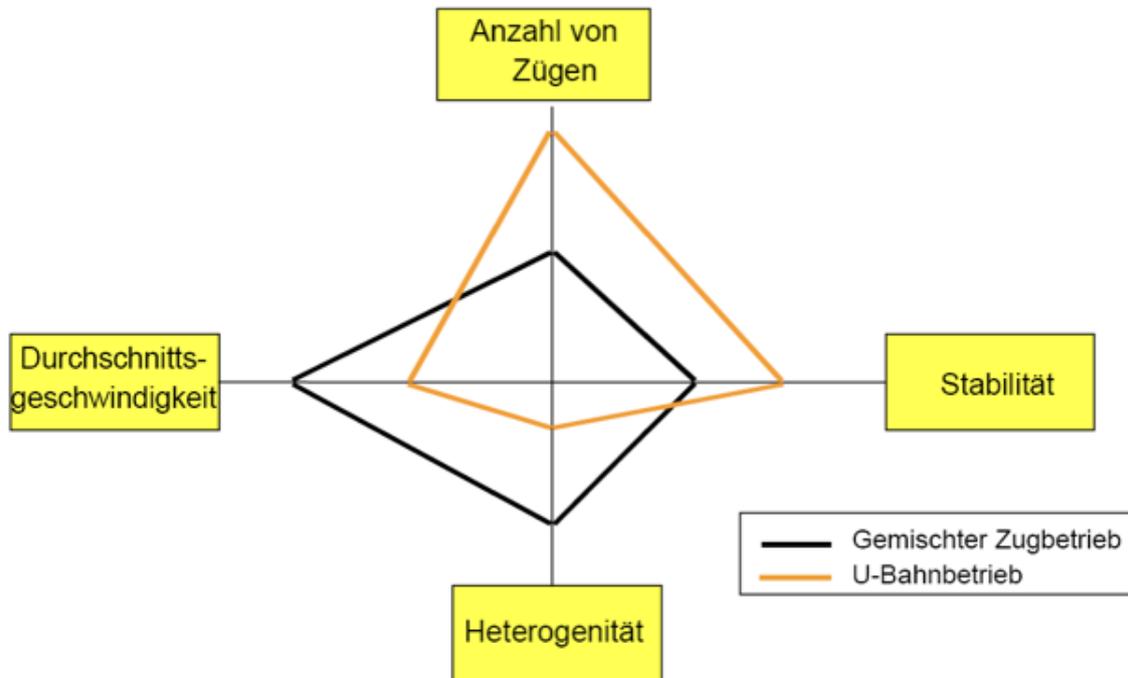


Abbildung 34: Zusammenhang zwischen der Art der Verkehre und der Parameter Anzahl von Zügen, Stabilität, Heterogenität und Durchschnittsgeschwindigkeit¹⁰⁵

3.5.2 Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Analysen

In diesem Unterkapitel werden nun die Ergebnisse der in Kapitel 3 durchgeführten Analysen zusammengefasst und ausgewertet. Aufgrund der in Kapitel 3.5.1 erläuterten höheren Kapazitäten bei einer geringeren Heterogenität sowie aus Gründen der Übersichtlichkeit werden hier nur die Mindestzugfolgezeiten von zwei baugleichen Fahrzeugen herangezogen. In den Abbildungen 35 und 36 ist das Ergebnis der Analysen für die Richtungen Wien Meidling – Wien Floridsdorf und Wien Floridsdorf – Wien Meidling, getrennt nach Garnituren und Zugsicherungssystemen, graphisch dargestellt. Bezüglich der Fahrgastwechselzeit wurde jeweils das Szenario mit der Aufenthaltsdauer von 30 s in den Betriebsstellen herangezogen. Da diese Größe sich additiv auf die Mindestzugfolgezeit auswirkt, kann diese bei unterschiedlichen Verweilzeiten am Bahnsteig ohne großen Aufwand neu berechnet werden.

¹⁰⁵ o.V.: UIC-Merkblatt 406, 2004, S.3.

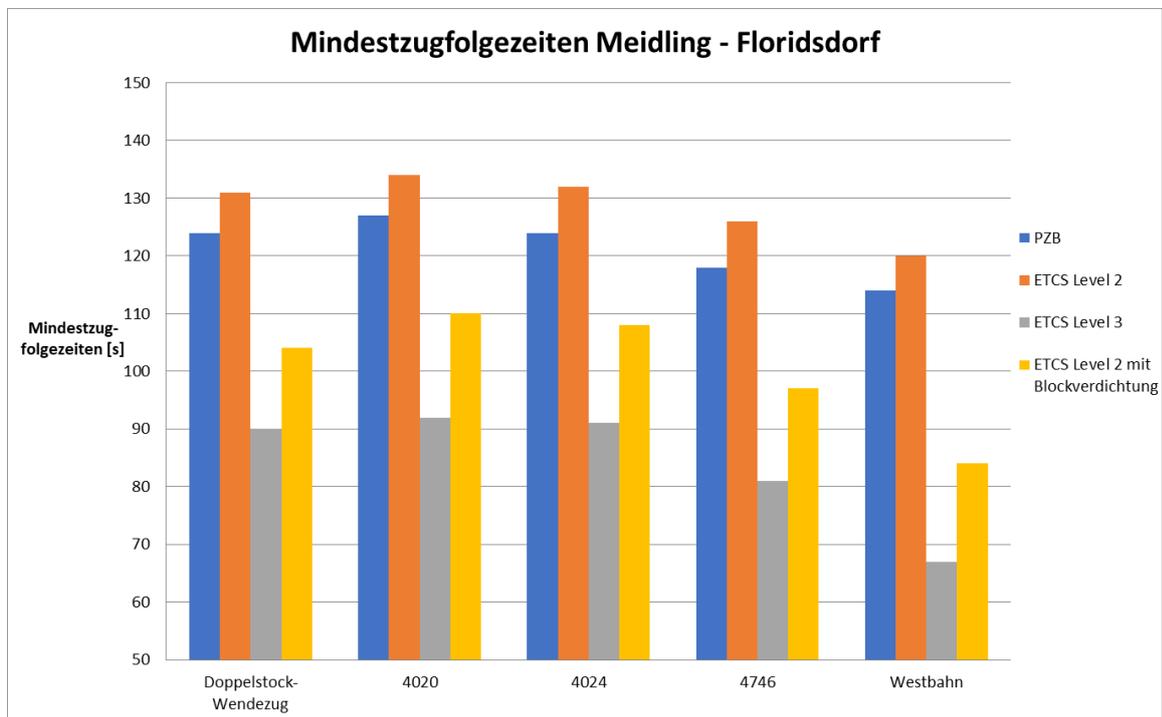


Abbildung 35: Mindestzugfolgezeiten von Meidling – Floridsdorf je Zugsicherungssystem und Garnitur¹⁰⁶

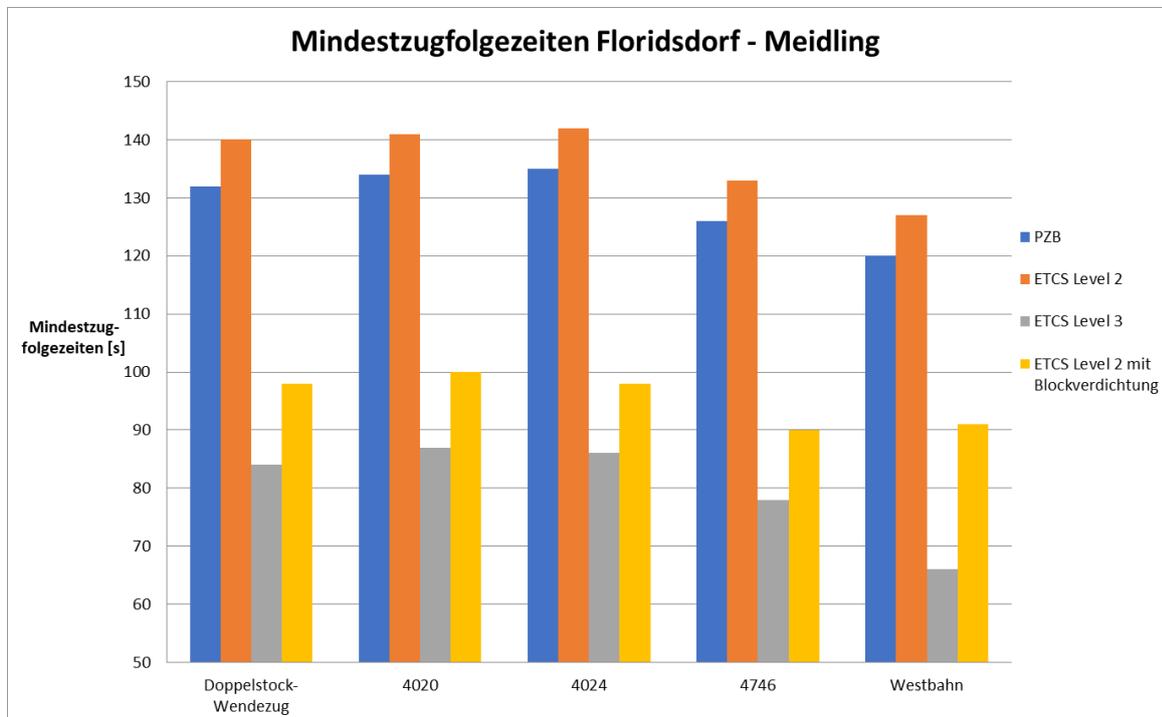


Abbildung 36: Mindestzugfolgezeiten von Floridsdorf – Meidling je Zugsicherungssystem und Garnitur¹⁰⁷

¹⁰⁶ Eigene Darstellung.

¹⁰⁷ Eigene Darstellung.

Mithilfe der Diagramme in den Abbildungen 35 und 36 lässt sich zeigen, dass allein der Einsatz alternativer, moderner Zugsicherungssysteme einige Möglichkeiten bietet, die Mindestzugfolgezeiten auf der Wiener S-Bahn-Stammstrecke zu verringern. Der alleinige Einsatz von ETCS Level 2 führt jedoch im Vergleich mit der derzeitig verwendeten PZB zu keiner Verbesserung. Aufgrund der in Kapitel 3.2.2 erläuterten restriktiveren Bremskurven ist vielmehr das Gegenteil der Fall, da sich die Mindestzugfolgezeiten sogar vergrößern. Somit ist eine Verbesserung dieser Art des Zugsicherungssystems notwendig, um die gewünschten Ergebnisse herbeizuführen zu können. Eine Möglichkeit ist die Erweiterung des ETCS Level 2 um den Einsatz virtueller Signale im Bahnhofs- und Haltestellenbereich, um dort eine Blockverdichtung auf eine Länge von 50 m zu schaffen. Wie das Beispiel der Münchner S-Bahn-Stammstrecke und die Analysen auf OpenTrack für die Wiener S-Bahn-Stammstrecke zeigen, lassen sich dadurch deutliche Kapazitätsgewinne erzielen. Im Beispiel der im Zuge dieser Diplomarbeit durchgeführten Simulationen können die Mindestzugfolgezeiten um durchschnittlich mehr als 25 s verringert werden. In Abhängigkeit davon, wie detailliert und großräumig die Blockverdichtung auf der Infrastruktur durchgeführt wird, können dadurch noch weitere Verringerungen der Zugfolgezeiten erzielt werden.

Das modernste der in dieser Arbeit betrachteten Zugsicherungssysteme, ETCS Level 3, ermöglicht die mit Abstand geringsten Mindestzugfolgezeiten. Durch die Verwendung des „Moving Blocks“ sind keine ortsfesten Blockabschnitte mehr notwendig, wodurch sich die Kapazität einer damit ausgerüsteten Strecke deutlich erhöhen lässt. Im Hinblick auf die Wiener S-Bahn-Stammstrecke lassen sich somit im Vergleich zur PZB die Mindestzugfolgezeiten um durchschnittlich mehr als 40 s verringern, was nochmals eine deutliche Verbesserung zu ETCS Level 2 mit Blockverdichtung darstellt. Um dies jedoch umsetzen zu können, müssen erst alle auf dieser Strecke verkehrenden Züge mit einer funktionsfähigen Zugintegritätsprüfung ausgerüstet sein. Garnituren, die eine solche nicht besitzen, können diesen Streckenabschnitt nicht mehr befahren. Zusätzlich dazu stellen die zu übertragenden Informationen eine weitere Herausforderung dar. Mit der derzeitig verfügbaren Bandbreite des GSM-R Netzes ist es nicht möglich, die Daten zwischen dem Fahrzeug und RBC bei einem hohen Zugaufkommen, speziell in größeren Knotenbahnhöfen, übermitteln zu können.

4 Conclusio

Die im Zuge dieser Diplomarbeit durchgeführten Analysen zeigen, dass nicht immer große, aufwändige infrastrukturelle Ausbaumaßnahmen erforderlich sind, um die Kapazität einer Strecke zu erhöhen. In Bereichen, in welchen mangels freier Flächen derartig große Projekte nicht leicht umsetzbar sind, müssen andere Möglichkeiten gesucht werden, um die vorhandene Infrastruktur so effizient wie möglich ausnutzen zu können. Für die Wiener S-Bahn-Stammstrecke trifft dies zu, da speziell in Städten die Verfügbarkeit an freien Flächen äußerst gering ist. In dieser Arbeit wurde mit dem Einsatz unterschiedlicher Zugsicherungssysteme gearbeitet, um die Mindestzugfolgezeiten zu minimieren und damit in weiterer Folge die Kapazität verbessern zu können.

Die im ersten Schritt durchgeführten Analysen beziehen sich auf die PZB, die den aktuellen Stand der Infrastruktur abbildet. Dieses Szenario dient als Referenz, um daran die Ergebnisse der anderen Szenarien vergleichen zu können. Hier zeigt sich, dass die Mindestzugfolgezeiten von den eingesetzten Garnituren, der gefahrenen Richtung und dem jeweiligen Haltemuster abhängig sind. Die Ergebnisse der S-Bahnen und Regionalzügen bei einer Haltezeit von 30 s reichen von 100 s bei der Zugfolge 4746-4020 und 4746-4024 in Richtung Wien Meidling – Wien Floridsdorf bis hin zu 187 s bei 4024-4746 in Richtung Wien Floridsdorf – Wien Meidling.

Sobald eine Linie ein zu den übrigen unterschiedliches Haltemuster aufweist, erhöht sich die Bandbreite. An der Wiener S-Bahn-Stammstrecke ist dies anhand der Züge der Westbahn in der Richtung Wien Meidling – Wien Floridsdorf zu beobachten. Diese hat an der zweiten Betriebsstelle, Wien Matzleinsdorfer Platz, keinen Halt. Somit können die folgenden Züge früher aus Wien Meidling abfahren, da sie, aufgrund der Durchfahrt der vorausfahrenden Westbahn in Wien Matzleinsdorfer Platz, dieser dort nicht auflaufen. Im umgekehrten Fall zeigt sich genau das Gegenteil. Bei der Zugfolge Westbahn hinter S-Bahn bzw. Regionalzug muss die erstgenannte Garnitur einen größeren Abstand lassen, um dem in der Betriebsstelle Wien Matzleinsdorfer Platz haltenden vorausfahrenden Zug nicht aufzulaufen. Aus diesen Gründen vergrößert sich die Bandbreite der Mindestzugfolgezeiten auf 51 s bei der Zugfolge Westbahn – Doppelstock-Wendezug/4020/4024 und 212 s bei der Zugfolge 4020 – Westbahn. Aufgrund dieser Heterogenität an Garnituren und Haltemustern kommt es zu Einbußen in der Kapazität, wie es in Kapitel 3.5.1 beschrieben wurde. Am vorteilhaftesten ist deshalb der Einsatz einheitlicher Garnituren und Haltemuster, um in dieser Hinsicht die Kapazität der Strecke nicht negativ zu beeinflussen.

In den darauffolgenden Szenarien wurde die Strecke mit unterschiedlichen Ausbaustufen des europäischen Zugsicherungssystems ETCS ausgerüstet. Hier hat sich gezeigt, dass der alleinige Einsatz von ETCS Level 2 aufgrund der restriktiveren Bremskurven eine Erhöhung

der Mindestzugfolgezeiten bewirkt. Daher bedarf es einer Blockverdichtung durch den Einbau virtueller Signale in den Haltestellenbereichen, wodurch ein früheres Nachrücken des nachfolgenden Zuges ermöglicht wird. Erst durch diese Maßnahme erhöht sich die Kapazität auf diesem Streckenabschnitt gegenüber der heute eingesetzten PZB.

Das beste Ergebnis liefert der Einbau des ETCS Level 3. Dies liegt am „Moving Block“, wo ortsfeste Blockabstände nicht mehr benötigt werden. Allerdings gestaltet sich die europaweite Umsetzung sehr schwierig, wie in Kapitel 3.3.2 bereits erläutert wurde. Aus diesem Grund ist festzustellen, dass das ETCS Level 3, bezogen auf die Verbesserung der Streckenkapazität, zwar das beste Zugsicherungssystem wäre, im Hinblick auf die Machbarkeit nach den derzeitigen Möglichkeiten allerdings die Blockverdichtung unter ETCS Level 2 besser realisierbar ist. Für die praktische Umsetzung sollte noch untersucht werden, inwieweit sich zusätzliche Blockverdichtungen unter Level 2 im Sinne einer Kosten-Nutzen-Analyse noch rentieren.

Ein wesentlicher Parameter bei der Mindestzugfolgezeit ist die Haltezeit, die im Rahmen dieser Arbeit mit 30 bzw. 60 Sekunden angenommen wurde. Möglichst kurze Haltezeiten haben daher positive Auswirkungen auf die Mindestzugfolgezeit und damit auf die Streckenkapazität. In den vorhandenen Modellen dieser Diplomarbeit lassen sich die Haltezeiten an jeder Haltestelle in jeder Fahrtrichtung noch beliebig verändern und an die Realität anpassen, sofern dafür geeignete Untersuchungen aus dem realen Betrieb vorliegen. In der Mehrfachsimulation kann auch noch zusätzlich mit Haltezeitverteilungen gerechnet werden, um die Stabilität von Fahrplänen analysieren zu können. Längerfristig wird auch der Bau einer zweiten Stammstrecke, wie sie etwa in München bereits in Bau befindlich ist, angedacht werden müssen, sofern sich die Pendlermobilität nicht grundlegend verändert.

Literaturverzeichnis

Eichenberger, Peter: Kapazitätssteigerung durch ETCS, in: Signal + Draht, 3/2007, S. 6-14.

Elsner, Michael/Garstenauer, Klaus: Pünktlicher Betrieb auf der Wiener S-Bahn oder: Grenzen der Liberalisierung, in: Eisenbahn-Revue, 06/2019, S. 300-301.

Hornemann, Klaus: Neue LZB bei S-Bahn München, in: Signal + Draht, 9/2005, S. 14-20.

Hürlimann, Daniel: Objektorientierte Modellierung von Infrastrukturelementen und Betriebsvorgängen im Eisenbahnwesen, Zürich, 2001.

Hürlimann, Daniel: Handbuch OpenTrack / Betriebssimulation von Eisenbahnnetzen, Version 1.9, Zürich, 2019.

Maschek, Ulrich: Sicherung des Schienenverkehrs / Grundlagen und Planung der Leit- und Sicherungstechnik, 3. Auflage, Dresden, 2015.

Pachl, Jörn: Systemtechnik des Schienenverkehrs / Bahnbetrieb planen, steuern und sichern, 8. Auflage, Braunschweig, 2016.

Pachl, Jörn: Sicherungstechnik für Bahnen im Stadtverkehr, Braunschweig, 2017.

Theeg, Gregor/Vlasenko, Sergej: Railway Signalling & Interlocking, 2. Auflage, Bingen/Hamburg, 2018.

Ohne Verfasser

UIC Merkblatt 406, 1. Ausgabe, Paris, 2004.

Internetquellen

<https://www.citypopulation.de/de/austria/agglo/>, abgerufen am 25.07.2019.

https://www.oebb.at/dam/jcr:cc6cd585-cb39-4fdd-9039-9c88ff53ab2d/liniennetz_w-noe-bgld.pdf, abgerufen am 23.06.2019.

http://www.opentrack.ch/opentrack/opentrack_d/opentrack_d.html, abgerufen am 27.07.2019.

<https://www.openrailwaymap.org/>, abgerufen am 27.07.2019.

<http://www.eisenbahn.gerhard-obermayr.com/oebb/die-oebb-fahrzeuge/elektrotriebwagen/4020/>, abgerufen am 23.06.2019.

<http://blog.oebb.at/talente-fuer-die-oebb-die-reihen-4023-4024-und-4124/>, abgerufen am 23.06.2019

<https://www.siemens.com/press/pool/de/pressemitteilungen/2013/infrastructure-cities/IC20130130001d.pdf>, abgerufen am 24.06.2019.

<https://www.mobility.siemens.com/mobility/global/SiteCollectionDocuments/de/rail-solutions/commuter-and-regional-trains/desiro-platform/datasheet-desiro-oebb-de.pdf>, abgerufen am 24.06.2019.

<https://www.bahnbilder.de/1200/oebb-4746-068--4746-1153134.jpg>, abgerufen am 25.06.2019.

<http://www.eisenbahn.gerhard-obermayr.com/oebb/die-oebb-fahrzeuge/reisezugwagen/city-shuttle-zweistoeckig/>, abgerufen am 25.06.2019.

<https://westbahn.at/unternehmen/ueber-westbahn/>, abgerufen am 26.06.2019.

<http://fahrplan.oebb.at/bin/query.exe/dn?>, abgerufen am 26.06.2019.

<https://westbahn.at/fragen-antworten/faq/die-westbahn/>, abgerufen am 26.06.2019.

https://www.tuv-akademie.at/fileadmin/dateien/Downloads/08_EBT_120202_Zulassungskonzept_des_Stadler_Doppelstockzuges_KISS_Starlinger.pdf, abgerufen am 26.06.2019.

<https://web.archive.org/web/20130927052541/http://austrianaviation.net/news-regional/news-detail/datum/2009/01/14/5-jahre-city-airport-train.html>, abgerufen am 26.06.2018.

<http://www.blueprintrecruit.com/news/ETCS-coming-to-London-in-2017-289>, abgerufen am 02.07.2019.

<http://www.svenherzfeld.de/bahnen/ETCS/level.htm#Level3>, abgerufen am 28.07.2019.

<http://www.svenherzfeld.de/bahnen/ETCS/hardware.htm#Odometrie>, abgerufen am 28.07.2019.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersichtskarte Nahverkehr im Großraum Wien.....	10
Abbildung 2: Gleisplan Wien Matzleinsdorfer Platz.....	12
Abbildung 3: Gleisplan Wien Floridsdorf.....	12
Abbildung 4: Beispiel eines Zugkraftdiagrammes	13
Abbildung 5: Zugkraftdiagramm der Reihe 4020	14
Abbildung 6: Doppelgarnitur der Reihe 4020	15
Abbildung 7: Zugkraftdiagramm der Reihe 4024	16
Abbildung 8: Doppelgarnitur der Reihe 4024	16
Abbildung 9: Zugkraftdiagramm der Reihe 4746	17
Abbildung 10: Doppelgarnitur der Reihe 4746	18
Abbildung 11: Zugkraftdiagramm der Reihe 1144.....	19
Abbildung 12: Fünfteilige Doppelstockgarnitur mit Lokomotive der Baureihe 1144.....	20
Abbildung 13: Zugkraftdiagramm der Reihe Kiss.....	21
Abbildung 14: Sechsteilige Doppelstockgarnitur „Kiss“ der Westbahn.....	22
Abbildung 15: Schematischer Aufbau der PZB Magnete	26
Abbildung 16: Zwei- und Drei-Aspekte-Signalisierung	28
Abbildung 17: Möglichkeiten zur Kombination von Haupt- und Vorsignalen.....	29
Abbildung 18: Bremskurvenüberwachung an Vor- und Hauptsignalen bei PZB 90.....	31
Abbildung 19: PZB 90 Überwachungskurven ohne (Vü1) und mit Restriktion (Vü 2)	32
Abbildung 20: Aufbau des Headway Calculators	33
Abbildung 21: Eurobalisen für ETCS	38
Abbildung 22: Benötigte Komponenten für ETCS Level 1.....	41
Abbildung 23: Benötigte Komponenten für ETCS Level 2.....	43
Abbildung 24: Benötigte Komponenten für ETCS L3	44
Abbildung 25: Gleisplan Wien Meidling unter ETCS Level 2.....	45
Abbildung 26: Vergleich PZB-ETCS Level 2 im s-v Diagramm der BR 4020	49
Abbildung 27: ETCS-Überwachungskurven.....	50
Abbildung 28: Nachrücksequenzen ohne LZB-Ausrüstung.....	57
Abbildung 29: Nachrücksequenzen mit LZB-Ausrüstung.....	58

Abbildung 30: ETCS Level 2 mit Blockverdichtung am Beispiel von Wien Handelskai.....	59
Abbildung 31: Sperrzeiten bei unterschiedlichen Blockabständen	63
Abbildung 32: Mindestzugfolgezeiten im Mischverkehr.....	64
Abbildung 33: Mindestzugfolgezeiten im homogenen Verkehr.....	65
Abbildung 34: Zusammenhang zwischen der Art der Verkehre und der Parameter Anzahl von Zügen, Stabilität, Heterogenität und Durchschnittsgeschwindigkeit	67
Abbildung 35: Mindestzugfolgezeiten von Meidling – Floridsdorf je Zugsicherungssystem und Garnitur	68
Abbildung 36: Mindestzugfolgezeiten von Floridsdorf – Meidling je Zugsicherungssystem und Garnitur	68

Tabellenverzeichnis

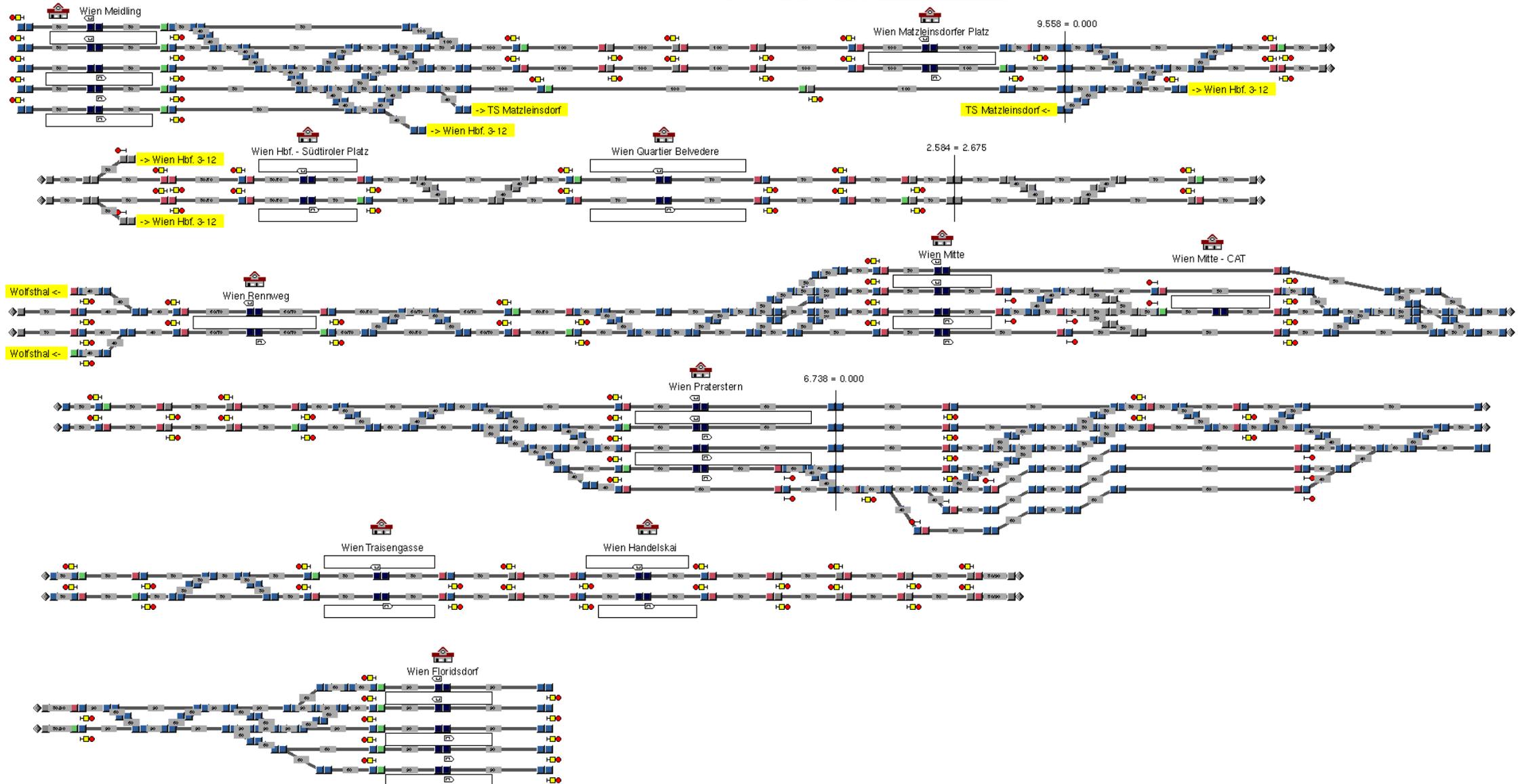
Tabelle 1: Auflistung der für die Simulation erstellten Züge	24
Tabelle 2: Zugarten der PZB	27
Tabelle 3: Mindestzugfolgezeiten PZB, Meidling - Floridsdorf, Haltezeit 30 s	34
Tabelle 4: Mindestzugfolgezeiten PZB, Floridsdorf - Meidling, Haltezeit 30 s	34
Tabelle 5: Mindestzugfolgezeiten PZB, Meidling - Floridsdorf, Haltezeit 60 s	35
Tabelle 6: Mindestzugfolgezeiten PZB, Floridsdorf - Meidling, Haltezeit 60 s	35
Tabelle 7: Mindestzugfolgezeiten ETCS Level 2, Wien Meidling – Wien Floridsdorf, Haltezeit 30 s	46
Tabelle 8: Mindestzugfolgezeiten ETCS Level 2, Wien Floridsdorf – Wien Meidling, Haltezeit 30 s	46
Tabelle 9: Mindestzugfolgezeiten ETCS Level 2, Wien Meidling – Wien Floridsdorf, Haltezeit 60 s	46
Tabelle 10: Mindestzugfolgezeiten ETCS Level 2, Wien Floridsdorf – Wien Meidling, Haltezeit 60 s	47
Tabelle 11: Differenz der Mindestzugfolgezeiten zwischen ETCS Level 2 und PZB von Meidling nach Floridsdorf	47
Tabelle 12: Differenz der Mindestzugfolgezeiten zwischen ETCS Level 2 und PZB von Floridsdorf nach Meidling	48
Tabelle 13: Mindestzugfolgezeiten ETCS Level 3, Wien Meidling – Wien Floridsdorf, Haltezeit 30 s	52
Tabelle 14: Mindestzugfolgezeiten ETCS Level 3, Wien Floridsdorf - Wien Meidling, Haltezeit 30 s	52
Tabelle 15: Mindestzugfolgezeiten ETCS Level 3, Wien Meidling – Wien Floridsdorf, Haltezeit 60 s	52
Tabelle 16: Mindestzugfolgezeiten ETCS Level 3, Wien Floridsdorf - Wien Meidling, Haltezeit 60 s	53
Tabelle 17: Differenz der Mindestzugfolgezeiten zwischen ETCS Level 3 und PZB von Meidling nach Floridsdorf	53
Tabelle 18: Differenz der Mindestzugfolgezeiten zwischen ETCS Level 3 und PZB von Floridsdorf nach Meidling	54
Tabelle 19: Mindestzugfolgezeiten ETCS Level 2 mit Blockverdichtung, Meidling – Floridsdorf, Haltezeit 30 s	60

Tabelle 20: Mindestzugfolgezeiten ETCS Level 2 mit Blockverdichtung, Floridsdorf – Meidling, Haltezeit 30 s	60
Tabelle 21: Mindestzugfolgezeiten ETCS Level 2 mit Blockverdichtung, Meidling – Floridsdorf, Haltezeit 60 s	61
Tabelle 22: Mindestzugfolgezeiten ETCS Level 2 mit Blockverdichtung, Floridsdorf – Meidling, Haltezeit 60 s	61
Tabelle 23: Differenz der Mindestzugfolgezeiten zwischen ETCS Level 2 mit Blockverdichtung und PZB von Meidling nach Floridsdorf	62
Tabelle 24: Differenz der Mindestzugfolgezeiten zwischen ETCS Level 2 mit Blockverdichtung und PZB von Floridsdorf nach Meidling	62

Abkürzungsverzeichnis

BR	Baureihe
BTM	Balise Transmission Module
bzw.	beziehungsweise
d.h.	das heißt
DMI	Driver Machine Interface
EK	Eisenbahnkreuzung
EoA	End of Authority
ETCS	European Train Control System
GSM-R	Global System for Mobile Communication-Railway
Hbf.	Hauptbahnhof
[Hz]	Hertz
[km/h]	Kilometer pro Stunde
LEU	Lineside Electronic Unit
LTM	Loop Transmission Module
LZB	Linienzugbeeinflussung
[m]	Meter
MA	Movement Authority
NTC	National Train Control
ÖBB	Österreichische Bundesbahnen
PZB	Punktförmige Zugbeeinflussung
RBC	Radio Bloc Centre
[s]	Sekunde
S-Bahn	Schnellbahn
sog.	sogenannte(r)
STM	Specific Transmission Module
SvL	Supervised Location
TIU	Train Interface Unit
TS	ÖBB Technische Services GmbH
UIC	internationaler Eisenbahnverband (Union internationale des chemins de fer)
V_{\max}	Maximalgeschwindigkeit

Anhang 1



Anhang 2



Anhang 3

