

DIPLOMARBEIT

Anpassung der Blockteilung zur Steigerung der Leistungsfähigkeit bei Eisenbahnstrecken

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
einer Diplom-Ingenieurin

unter der Leitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Norbert Ostermann
und

Univ.Ass. Dipl.-Ing. Martin Scheidt
am

E230

Institut für Verkehrswissenschaften
Forschungsbereich für Eisenbahnwesen, Verkehrswirtschaft und Seilbahnen

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Angèle Vial
Matrikelnummer 1428051

Wien, November 2016

Unterschrift

Vorwort

An dieser Stelle möchte ich mich zuerst bei Herrn Univ.Prof Dipl.-Ing. Dr.techn. Norbert Ostermann für die Ermöglichung dieser Diplomarbeit seitens des Instituts für Eisenbahnwesen, Verkehrswirtschaft und Seilbahnen bedanken.

Ein besonderer Dank geht an Herrn Dipl.-Ing Martin Scheidt, der mit seiner Geduld, seiner zutreffenden Bemerkungen und seiner hohen Fachkompetenz eine besonders wertvolle Unterstützung war und mich durch das Thema geleitet hat.

Vielen Dank gilt Dipl.-Ing. Isabel Brufeu und Dipl.-Ing Didier Boudon, die mir am Anfang der Arbeit viel geholfen haben und eine hilfreiche Impulse für die Bearbeitung gegeben haben.

Ich danke auch herzlich Frau Carine Morotti-Delorme, die meine Teilnahme an dem T.I.M.E.-Programm unterstützt hat. Dank geht ebenfalls an allen Verantwortlichen dieser Austauschkooperation zwischen der Ecole Centrale Paris und der Technischen Universität Wien.

Mein herzlicher Dank gilt allen Freunden, die mich während meines ganzen Studiums unterstützt und motiviert haben. Zuletzt will ich mich bei meiner Familie bedanken, besonders meinem Freund, der die mühsame Arbeit des Korrekturlesens übernommen hat und meiner Mutter, die mich viel über das Leben gelehrt hat.

Kurzfassung

Die Entwicklung der Eisenbahn verlangt gleichzeitig steigende Anforderungen an Qualität und Quantität. Auf dem bestehenden Netz müssen mehr Fahrgäste zuverlässig und zu niedrigeren Kosten transportiert werden. Die Empfindlichkeit des Eisenbahnsystems nimmt aber mit einer steigenden Auslastung zu. Die Verkehrsleistung und die Verkehrsqualität hängen daher eng zusammen und bestimmte Verkehrskenngrößen ermöglichen eine wissenschaftliche Beschreibung dieses Zusammenhanges.

Die Leistungsfähigkeit einer Strecke ist eine dieser Verkehrskenngrößen. Sie bezeichnet die Anzahl der Züge, die in einem betrachteten Zeitraum unter definierten Qualitätsbedingungen auf einer Strecke verkehren können.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Steigerung der Leistungsfähigkeit bei Eisenbahnstrecken. Auf den Eisenbahnstrecken der meisten europäischen Bahnen verkehren Züge im festen Raumabstand. Die Zugfolgeabstände ergeben sich durch die Blockteilung. Die Blockabschnitte werden bei Anwendung der ortsfesten Signalisierung durch Hauptsignale begrenzt. In Bahnhöfen und auf der Strecke sind die Zugfahrten damit durch Hauptsignale gesichert und geregelt. Es stellt sich die Frage, inwieweit die Blockteilung ein Einflussparameter auf die Leistungsfähigkeit ist.

Im ersten Schritt wird die Aufgabenstellung wissenschaftlich definiert. Dazu werden die Definition und die Methode zur Ermittlung der Kapazität einer Eisenbahninfrastruktur erläutert.

Im zweiten Abschnitt werden die Grundlagen zur Leistungsuntersuchung angegeben. Schwerpunkte sind die fahrdynamischen Grundlagen, die Regelung und Sicherung der Zugfolge sowie die wesentlichen Einflüsse auf die Kapazität.

In weiterer Folge wird eine experimentelle Bestimmung des Leistungsgewinns einer Verkürzung der Blockabschnittslänge durchgeführt. Das Näherungsverfahren wird beschrieben und eine Simulation zur Beurteilung der Effekte der Blockteilung beispielsweise umgesetzt.

Das Ergebnis der Arbeit ist ein Programm in welchem alle relevanten Parameter der Simulation, wie der technische Zustand der Züge (Beschleunigungs-, Bremsvermögen, Länge...), die Geschwindigkeit der Züge oder die Blockteilung frei verändert werden können. Das Ergebnis der Simulation ist eine Darstellung der Sperrzeitentreppe um die Zeit-Weg Linie. Anschließend werden die Effekte einer optimierten Blockteilung auf die Leistungsfähigkeit analysiert.

Abstract

The development of the transport sector is faced with increasing demand, simultaneously concerning quality and quantity. More passengers have to be carried on the existing network with a reliable quality of service at lower cost. However, the sensitivity of the railway system rises as the capacity utilisation increases. The traffic performance and the quality of transport service are therefore closely connected and some specific characteristic values provide a scientific description of this correlation.

The carrying capacity of a line is one of these characteristic values. It describes the number of trains that can travel a track section in a defined time period with precise qualitative conditions. This Master Thesis looks at increasing capacity on railway lines.

On most European routes, there is a classic operation with fixed intervals. The headway time of the trains is given by the division of the track into blocks. The length of the blocks is delimited by fixed block signalling. Fixed block signalling provides safety and regulation in stations and on the railway line. Therefore, there is a question regarding the extent to which the division of block sections is a parameter in influencing the carrying capacity.

As a first step, the research question will be clearly defined. Then the definition and the methodology to determine the capacity of a railway line will be explained.

In the second part, the basic principles of performance analysis will be specified. The focus is on running dynamic properties, regulation and safety of spacing trains, and relevant influencing factors on capacity.

In the next step, an experimental determination of the capacity gain caused by a diminution of the block length will be executed. Approximation methods will be described and a simulation to evaluate the influence of the division of block sections will be executed.

The result of the Master Thesis is a program in which all relevant parameters, for instance the technical condition of the train (acceleration and braking capacities, length...), the speed of the trains and the block division, can be modified. The simulation output is a representation of the blocking time stairway into a time-over-distance diagram.

The effects of an optimized block division on the carrying capacity will be subsequently analysed.

Résumé

Le développement du secteur ferroviaire entraîne une demande de mobilité accrue, accompagnée d'un certain niveau de qualité de service. Un nombre toujours croissant de passagers doit pouvoir être transporté sur le réseau actuel, et ce, avec une qualité de service fiable et à moindre coût. Or la sensibilité du système ferroviaire augmente lorsque l'utilisation de la capacité de l'infrastructure s'intensifie. Performance et qualité de l'offre de transport sont donc des notions intimement liées et il existe plusieurs grandeurs caractéristiques pour les définir. La capacité d'une ligne est l'une de ces grandeurs. Elle désigne le nombre de circulations pouvant techniquement parcourir un tronçon donné, en un temps défini et sous des conditions qualitatives bien précises.

Ce mémoire propose de s'intéresser à la problématique d'augmentation de la capacité des infrastructures ferroviaires. La majorité des voies ferroviaires européennes est divisée en cantons, également appelés blocks. Les circulations doivent ainsi respecter un espacement donné. Sur une pleine voie, les cantons sont délimités par des signaux principaux. La sécurité des convois dans les gares et sur les voies principales est ainsi assurée par ce système de cantonnement. Il s'agit de déterminer dans quelle mesure le découpage des blocks influence la capacité d'une voie donnée.

Le premier chapitre est consacré à la définition de la problématique, suivie de celle de la notion de capacité d'une infrastructure ferroviaire, ainsi qu'aux méthodes de calcul associées.

Dans un deuxième temps, il s'agit d'examiner les éléments déterminants dans une étude de capacité. Cette partie comprend les fondamentaux de dynamique essentiels à cette étude, la réglementation et application des cadences des circulations, ainsi que les principaux facteurs de la grandeur caractéristique de la capacité.

Enfin, le dernier chapitre met en place le développement d'une simulation, destinée à déterminer l'augmentation de capacité obtenue suite à une diminution de la longueur des blocks. Les approximations seront décrites soigneusement et une simulation de l'effet du découpage des blocks conduite à titre d'exemple.

Le résultat de ce travail consiste en un programme dont tous les paramètres décisifs, tels que le matériel roulant (forces d'accélération, de freinage, longueur,..), la vitesse des circulations, ou encore le cantonnement de la voie, peuvent être modifiés. A la fin de la simulation, un graphique espace-temps sur lequel on pourra lire les temps minimaux de succession sera obtenu. A la suite de cela, une analyse des effets d'une optimisation du découpage des blocks sur la capacité d'une ligne sera proposée.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangslage	1
1.2	Aufgabenstellung	2
1.2.1	Theoretische optimale Belastung der Strecke	2
1.2.2	Praktische optimale Belastung der Strecke und fachspezifischer Rahmen	5
1.3	Kapazität einer Strecke	7
1.3.1	Sperrzeit	7
1.3.1.1	Sperrzeitentreppe	9
1.3.1.2	Zugfolgezeit	10
1.3.1.3	Pufferzeit	10
1.3.1.4	Fahrzeitzuschläge	11
1.3.2	Theoretische Kapazität	13
1.3.3	Praktische Kapazität	15
1.3.4	Benutzte Kapazität	17
2	Grundlage zur Leistungsuntersuchung	19
2.1	Fahrdynamische Grundlagen	19
2.1.1	Beschreibung der Bewegung im Raum	19
2.1.2	Grundgleichung der Fahrdynamik	20
2.1.3	Fahrwiderstände	20
	Luftwiderstand	22
2.1.4	Bewegungsmodi einer Zugfahrt	23
2.1.4.1	Die Beschleunigung	23
2.1.4.2	Die Beharrung	24

2.1.4.3	Das Auslaufen	24
2.1.4.4	Das Bremsen	25
2.1.5	Zugkraft	26
2.1.6	Bremskraft	27
2.1.7	Fahrzeitermittlung	27
2.2	Regelung und Sicherung der Zugfolge	28
2.2.1	Fahren im festen Raumabstand	28
2.2.1.1	Zugfolgeabstand	28
2.2.1.2	Zugfolgezeit	28
2.2.2	Bedingungen des Fahrens im festen Raumabstand	29
2.2.3	Ortsfeste Signalisierung	29
2.3	Maßgebende Einflussfaktoren	30
2.3.1	Parameter der Kapazität	30
2.3.2	Einflussfaktoren aus der Betriebsplanung	31
2.3.3	Einflussfaktoren aus der Infrastrukturgestaltung	31
3	Experimentelle Bestimmung des Leistungsgewinns einer Verkürzung der Blockabschnittlänge	33
3.1	Methode zur Leistungsuntersuchung	33
3.1.1	Näherungsverfahren	33
3.1.1.1	Fahrdynamische Annäherungen	33
3.1.1.2	Betriebliche Annäherungen	35
3.1.2	Ablauf der Mindestzugfolgezeitberechnung	36
3.1.2.1	Berechnung der Fahr- und Sperrzeiten	36
3.1.2.2	Ermittlung der Mindestzugfolgezeit für jeden Zugfolgefall	36
3.1.2.3	Maßgebende Blockabschnitte	37
3.1.3	Zielsetzung	37
3.2	Umsetzung der Simulation	39
3.2.1	Randbedingungen und Parameter des Simulationsbeispiels . . .	39
3.2.2	Angabe der Parametern	42
3.2.3	Ablauf der Simulation	42
3.3	Ergebnisse des Simulationsbeispiels	43
3.3.0.1	Simulationsbeispiel	43

<i>INHALTSVERZEICHNIS</i>	xi
3.3.1 Aufteilung der Blockabschnitte als Einflussparameter	45
3.3.1.1 Blockabschnittszahl als Einflussparameter	45
3.3.1.2 Verkürzung der Blockabschnittslängen	46
3.3.1.2.1 Steigerung der Leistungsfähigkeit	47
3.3.1.2.2 Bewertung der Methode	48
3.3.2 Weitere Maßnahmen zur Steigerung der Leistungsfähigkeit . . .	49
4 Fazit	51
Anhänge	53
A Objekt: Train	55
B Objekt: Route	57
C Objekt: Track	59
D Python-Code: Simulation	61

Abbildungsverzeichnis

1.1	Kurvenverlauf der mittleren normierten Verkehrsleistung	3
1.2	Kurvenverlauf der relativen Empfindlichkeit der Wartezeit ($b = 1$)	4
1.3	Optimaler Leistungsbereich (schematische Darstellung)	5
1.4	Sperrzeit eines Blockabschnittes	7
1.5	Bildung der Sperrzeitentreppe	10
1.6	Sperrzeitentreppe	11
1.7	Sperrzeitentreppe mit Pufferzeit	12
1.8	Ermittlung des Kapazitätsverbrauchs (UIC-Kodex-406, 2004)	12
1.9	Entfernungsabhängiger Regelzuschlag und prozentualer Regelzuschlag (UIC-Kodex-451.1, 2000)	13
1.10	Ablauf der Ermittlung der praktischen Kapazität	16
2.1	Koordinaten	19
2.2	Fahrmodi (eigene schematische Darstellung nach Lehmann (2005, S. 172))	23
2.3	Ideales Zugkraftdiagramm $Z = f(v)$	27
2.4	Fahren im festen Raumabstand	28
2.5	Einflüsse auf die Kapazität (nach Jänsch (2016, S. 324))	30
3.1	Sperrzeitüberschneidung	38
3.2	Behinderung aufgrund einer größeren Blocklänge	40
3.3	Blockteilung und Geschwindigkeitsverlauf	41
3.4	Input - Output	42
3.5	Ablaufprozess zur Ermittlung des Maßgebenden Blockabschnittes	44
3.6	Darstellung aus der Simulation	44
3.7	Mindestzugfolgezeit als Funktion der Anzahl der Blockabschnitte	46
3.8	Kapazität = $f(\text{Blockabschnittszahl})$	48

Tabellenverzeichnis

2.1	Haftreibungsbeiwert μ	26
3.1	Vergleich der Modellannahmen (Radtke, 2006)	34
3.2	Belegungszeit und zurückgelegter Weg unter Ansatz konstanter Beschleunigungen und Verzögerungen	35
3.3	Parameter der Simulation	40

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Ausgangslage

Die Entwicklung der Eisenbahn berücksichtigt die wachsende Nachfrage nach dem Transport von Personen und Gütern und enthält damit verschiedene Optimierungsprobleme. Gemäß dem UIC-Kodex-406 (2004) werden in Europa gleichzeitig steigende Anforderungen an Qualität und Quantität verlangt. Die großen Investitionskosten und in geringerem Maße das Image der betroffenen Unternehmen stehen im Mittelpunkt aller Reformen.

Auf dem bestehenden Netz müssen mehr Fahrgäste zu niedrigeren Kosten transportiert werden. Während die in der EN DIN-EN (2000) definierten RAMS Kriterien der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltung und Sicherheit weiterhin wesentliche Bedingungen sind, ist stetig wachsende Produktivität gefordert.

Eine erhöhte Produktivität bedingt verschiedene Optimierungsprobleme, die mit Hilfe einer Methode zur Maximierung (bzw. Minimierung) einer Funktion, unter verschiedenen unterworfenen Beschränkungen, aufgelöst werden. Zur bestmöglichen Erreichung des Optimums sind wesentliche Unterprobleme zu berücksichtigen:

- die Identifizierung und Befriedigung der Verkehrsnachfrage
- die gewünschte Betriebsqualität
- erneuerte angepasste Bahnanlagen
- das Betriebsprogramm und die Angebotsplanung
- das Betriebsmanagement: Tätigkeiten und Prozesse nach dem Abschluss des Betriebsprogramms

Die Bahnanlagen bestehen aus der freien Strecke, den Bahnhöfen und sonstigen Bahnanlagen. Die freie Strecke bezeichnet die Gleise außerhalb der Einfahrsignale der Bahnhöfe. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der angepassten Infrastruktur, besonders mit allen ortsfesten Anlagen, die auf einer freien Strecke zum Betrieb der Bahnen erforderlich sind.

1.2 Aufgabenstellung

Die Kapazität eines Infrastrukturbereiches entspricht der maximalen Anzahl der Züge, die einen Streckenabschnitt pro Zeiteinheit passieren können (siehe Abschnitt 1.3). Um die angestrebte Produktivität zu erreichen, soll eine wachsende Kapazität erzielt werden.

Zwei wesentliche Parameter werden daher benutzt: die Leistungsfähigkeit und die Streckenutzungseffizienz. Die Leistungsfähigkeit bezeichnet die Anzahl der Züge, die in einem betrachteten Zeitraum unter definierten Qualitätsbedingungen auf einer Strecke verkehren können. Die Streckenutzungseffizienz zeigt den zeitlichen Belastungsgrad der Strecke durch Sperrzeiten. Der räumliche Belastungsgrad der Strecke wird mit Hilfe des Auslastungsgrads gemessen.

1.2.1 Theoretische optimale Belastung der Strecke

Um die Qualität und Leistung der Zugfahrprozesse auf einer Eisenbahnstrecke zu beurteilen, entwickelt Hertel (1992) ein Berechnungsbeispiel. Auf einer definierten Strecke verkehrt eine bestimmte Anzahl N von Zügen innerhalb eines definierten Untersuchungszeitraums. Die mittlere Beförderungszeit eines Zuges entspricht einem Erwartungswert, der aus zwei Teilen besteht: die mittlere Wartezeit ET_W und die mittlere Fahrzeit ET_F . Die Funktionen ET_W und ET_F sind als Funktionen des Auslastungsgrads η definiert. (siehe Gleichungen (1.1) und (1.2)).

Mittlere Wartezeit und Fahrzeit

Die Infrastruktur wurde von Hertel als Wartesystem $GI/GI/1/\infty$ ¹ definiert und die Züge als Anforderungen in diesem System betrachtet. Für die mittlere Wartezeit ET_W ergibt sich demzufolge diese Approximation, in Abhängigkeit vom Auslastungsgrad η :

$$ET_W(\eta) = \frac{a \cdot \eta}{(1 - \eta)^b} \quad (1.1)$$

Dabei sind a und b zwei Parameter, die als Funktionen der Infrastruktur und des Fahrplans definiert sind. Der Auslastungsgrad η einer Strecke ergibt sich als Quotient der

¹Bedienungssystem mit einer beliebigen Verteilung und einer einzigen Serviceeinheit. Jeder wartet, bis er an der Reihe ist. Die maximale Anzahl der Züge, die beim System anfahren dürfen, ist unendlich.

mittlere Anzahl gleichzeitig auf der Strecke fahrender Züge N und der Maximalanzahl dieser Züge N_{max} .

Die Fahrzeit ET_F wird als Mittelwert der Fahrzeiten t_F aller N fahrender Züge ermittelt:

$$ET_F(\eta) = \frac{\sum t_F}{N} = \frac{\sum t_F}{\eta \cdot N_{max}} \quad (1.2)$$

Normierte Verkehrsleistung

Dann bildet Hertel die normierte Verkehrsleistung EQN in Abhängigkeit vom Auslastungsgrad η :

$$EQN(\eta) = \frac{\eta}{1 + \frac{ET_W(\eta)}{ET_F(\eta)}} \quad (1.3)$$

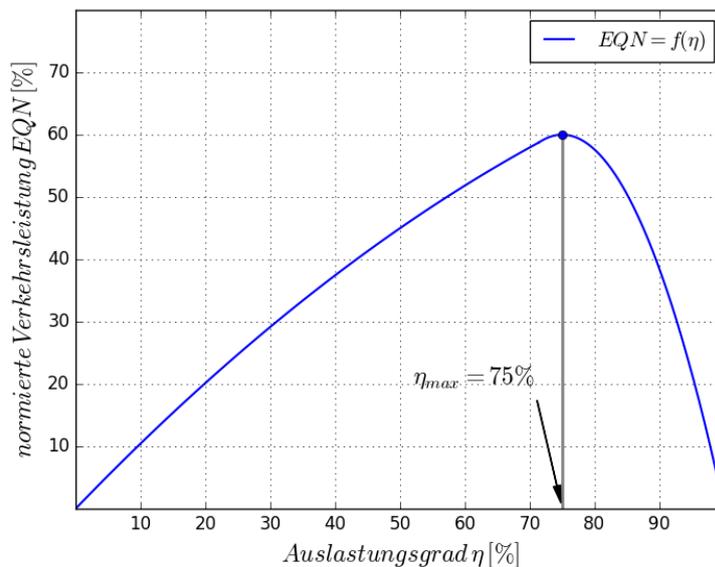


Abbildung 1.1: Kurvenverlauf der mittleren normierten Verkehrsleistung

Wie in Abbildung 1.1 dargestellt, liefert die Funktion EQN eine konkave Kurve. Die Verkehrsleistung wächst von null bis zu einem Maximum und hat dann einen Wendepunkt. Danach fällt sie schnell auf Null ab.

Empfindlichkeit der Wartezeiten

Hertel ermittelt die Empfindlichkeit der Wartezeiten als erste partielle Ableitung der mittleren Wartezeit ET_W nach η :

$$Empf(\eta) = \frac{\delta ET_W(\eta)}{\delta \eta} \quad (1.4)$$

Die Ableitung lässt sich berechnen:

$$Empf(\eta) = \frac{a \cdot b \cdot \eta}{(1 - \eta)^{b+1}} + \frac{a}{(1 - \eta)^b} \quad (1.5)$$

Die relative Empfindlichkeit der Wartezeiten $EMPF$ ergibt sich durch Normierung auf die mittlere Wartezeit ET_W :

$$EMPF(\eta) = \frac{1}{ET_W(\eta)} \cdot \frac{\delta ET_W(\eta)}{\delta \eta} \quad (1.6)$$

Die Gleichungen (1.1) und (1.5) liefern:

$$EMPF(\eta) = \frac{b}{1 - \eta} + \frac{1}{\eta} \quad (1.7)$$

Die relative Empfindlichkeit $EMPF$ ist eine konvexe Funktion in η . Bei geringster Belastung ist sie unendlich, und nach Erreichen ihres Tiefpunktes wächst sie bei voller Auslastung der Strecke wieder ins unendlich. Der Verlauf der Funktion ist in Abbildung 1.2 dargestellt.

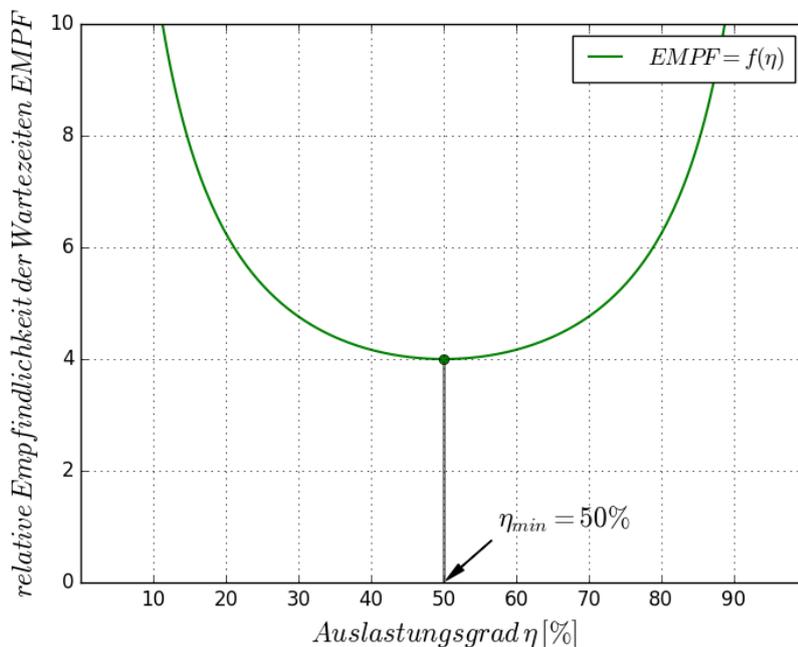


Abbildung 1.2: Kurvenverlauf der relativen Empfindlichkeit der Wartezeit ($b = 1$)

Optimaler Leistungsbereich

Die von Hertel (1992) definierten Funktionen (1.3) und (1.6) liefern zwei besondere Punkte und daher zwei Werte des Auslastungsgrads, die den optimalen Leistungsbereich der Betriebsführung begrenzen (Abbildung 1.3):

- untere Grenze: η_{inf} bei dem Minimum der relativen Empfindlichkeit der Wartezeit
- obere Grenze: η_{sup} bei dem Maximum der Verkehrsleistung

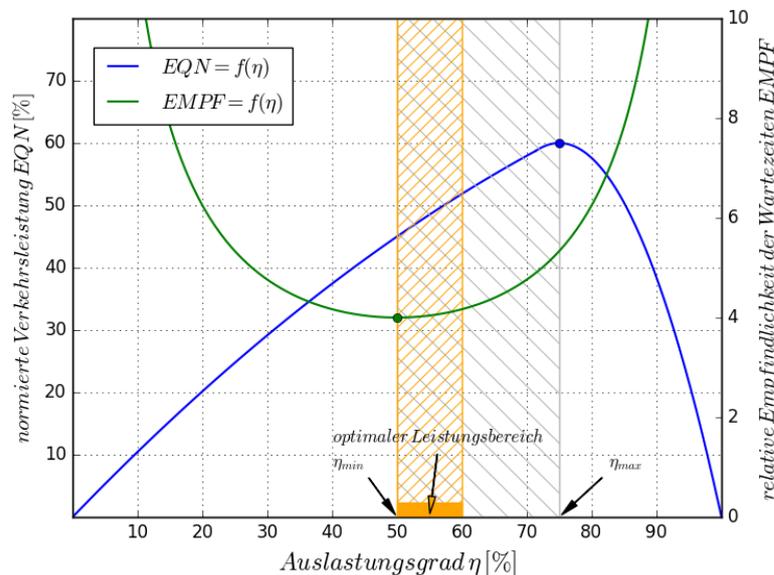


Abbildung 1.3: Optimaler Leistungsbereich (schematische Darstellung)

1.2.2 Praktische optimale Belastung der Strecke und fachspezifischer Rahmen

Die bisherigen betrieblichen Erfahrungen haben gezeigt, dass der Arbeitsbereich der Betriebsführung auf Strecken mit Personenverkehr näher an der unteren Grenze liegen soll. Das Minimum der relativen Empfindlichkeit hängt von der Homogenität des Betriebsprogramms ab und ergibt sich für verschiedene untersuchte Strecken bei Auslastungsgraden zwischen 50% und 60% (Siehe Hertel, 1992).

Die reale Auslastung der betreffenden Strecke und daher die optimale Zuganzahl muss in dem von Hertel definierten Bereich liegen. Die Zuganzahl und der technische Zustand der Züge (Beschleunigungs-, Bremsvermögen, Massefaktor...) werden festgelegt

und es geht einzig darum, die Position der Hauptsignalen zu ändern, und damit die Streckenabschnitte zu variieren.

Es stellt sich die Frage, inwieweit die Blockabschnittslänge ein Einflussparameter auf die Kapazität ist, daher soll die Forschungsfrage folgendermaßen lauten:

Wie kann die durch Variation der Blockabschnittslänge optimierte Struktur einer Strecke dazu beitragen, die Streckenutzungseffizienz zu erhöhen und damit die Leistungsfähigkeit zu vergrößern?

Dieses Optimum besteht darin, die verbleibenden nutzbaren Zeitlücken zu minimieren. Dadurch soll die verfügbare Streckenkapazität verteilt werden und die vorgegebene Verkehrsleistung steigen.

Unterschiedliche Blocklängen und Geschwindigkeiten führen zu unterschiedlichen Belegungszeiten. Daher ist anzunehmen, dass die Streckenleistungsfähigkeit als Funktion der Blockabschnittslänge charakterisiert werden kann.

Die Erarbeitung einer solchen Funktion würde ermöglichen, den effektiven Leistungsgewinn zu evaluieren. Daraus lassen sich drei Hypothesen ableiten:

- Eine Verkürzung der Blockabschnittslänge bedingt eine erhöhte Streckenutzungseffizienz
- Aus einer erhöhten Streckenutzungseffizienz ergibt sich eine erhöhte Leistungsfähigkeit
- Die Leistungsfähigkeit lässt sich als Funktion der Blockabschnittslänge darstellen

Es soll erstens gezeigt werden, dass die Struktur einer Strecke optimiert werden kann, um eine erhöhte Streckenutzungseffizienz erreichen zu können. Zu diesem Zweck sind zunächst die erforderlichen Kapazitätsfaktoren zu bestimmen:

- die Sperrzeiten der Blockabschnitte (siehe Abschnitt 1.3)
- die Beförderungszeit der Züge, die Zeit die ein Zug braucht, um diese Strecke zurückzulegen. Dazu gehören die Aufenthalte in den Haltestellen.

Das Ziel des zweiten Teils ist darzustellen, dass aus dieser potenziell erhöhten Streckenutzungseffizienz sich eine erhöhte Leistungsfähigkeit ergibt. Für die genaue Ermittlung der Kapazität der Strecke ist neben der Streckenutzungseffizienz weiterhin die Untersuchung der Leistungsfähigkeit erforderlich. Dabei ist die relative Fahrempfindlichkeit von besonderer Bedeutung. Das Minimum der relativen Empfindlichkeit ist abhängig von der Variation der Zugfolgezeiten und somit von der Struktur der Strecke. Damit wird der Zusammenhang zwischen dem erzielbaren Leistungsgewinn und der Variation der Blockabschnittslänge charakterisiert.

1.3 Kapazität einer Strecke

Die Kapazität (von lateinisch *capacitas*, *atis*, f. = Brauchbarkeit, Räumlichkeit, Tauglichkeit) kann in verschiedenen Kontexten gestellt werden und hat daher keine allgemeingültige Definition. Die Kapazität einer Eisenbahninfrastruktur entspricht der maximalen Anzahl der Züge, die einen Streckenabschnitt pro Zeiteinheit passieren können.

Die Kapazität einer Strecke hängt von den Infrastruktureigenschaften, von dem Betriebsprogramm, von dem Fahrplan und von dem akzeptierten Qualitätsniveau ab. Gemäß Rotoli et al. (2016, S. 11) werden hinter der Kapazität in dieser Arbeit drei verschiedene Definitionen verstanden: die theoretische Kapazität, die praktische Kapazität und die benutzte Kapazität.

Die Kapazität hängt von der zeitlichen Auslastung der Strecke ab, und somit von der Sperrzeiten der einzelnen Blöcke.

1.3.1 Sperrzeit

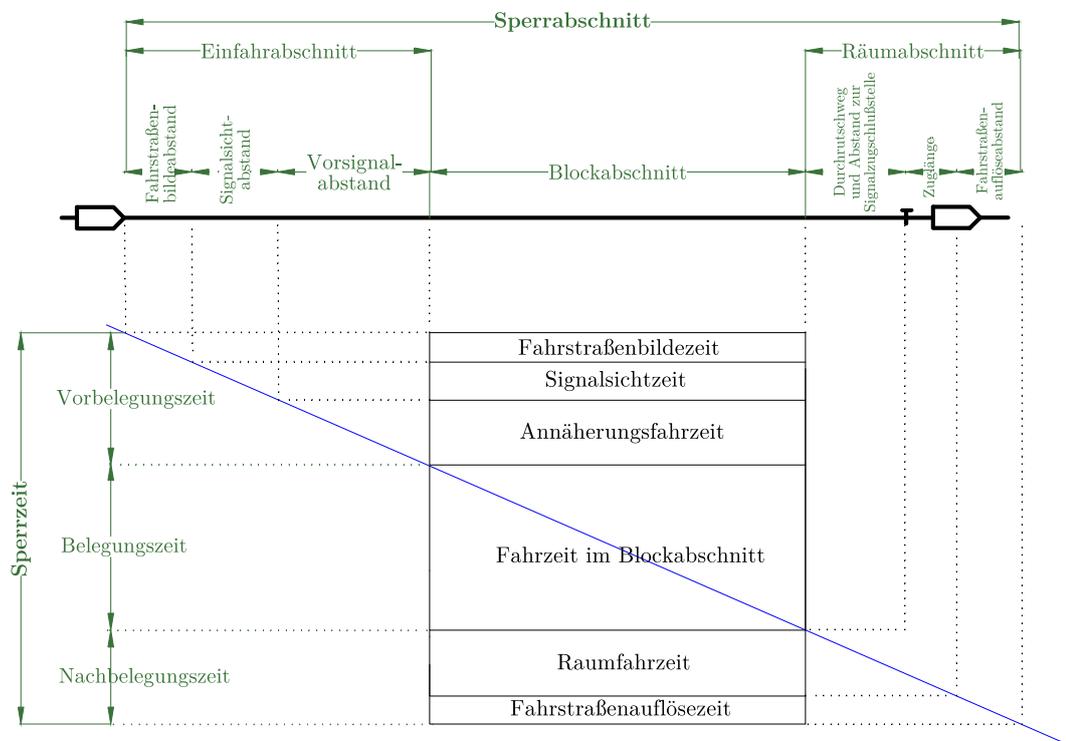


Abbildung 1.4: Sperrzeit eines Blockabschnittes

Der Sperrabschnitt zwischen zwei Züge muss freigehalten werden. Dieser besteht aus drei Abschnitten (Heister et al., 2006) (siehe Abbildung 1.4):

- dem Einfahrabschnitt
 - Fahrstraßenbildeabstand
 - Signalsichtabstand
 - Vorsignalabstand
- dem Blockabschnitt
- dem Räumabschnitt
 - Durchrutschweg
 - Abstand bis zur Signalzugschlussstelle (SZS)
 - Zuglänge
 - Fahrstrassenauflöseabstand

Der **Einfahrabschnitt** setzt sich aus dem Fahrstraßenbildeabstand, dem Signalsichtabstand und dem Vorsignalabstand zusammen. Der Fahrstraßenbildeabstand entspricht dem zurückgelegten Weg von der Freigabe des zu befahrenden Abschnitts bis zur Signalsichtstelle. Der Signalsichtabstand ist der Fahrwegabstand zwischen der Sichtstelle des maßgebenden Vorsignals und seinem Standort. Der Vorsignalabstand bezeichnet den Fahrwegabstand zwischen den Standorten des maßgebenden Vor- und Hauptsignals.

Der **Blockabschnitt** bezeichnet den Abstand zwischen zwei benachbarten Hauptsignalen.

Der **Raumabschnitt** gibt den Gleisabschnitt, der vor der Zulassung einer zweiten Zugfahrt frei sein muss, an. Zum Raumabschnitt gehören der Durchrutschweg, der Abstand bis zur Signalzugschlussstelle, die Zuglänge und der Fahrstrassenauflöseabstand. Der Durchrutschweg entspricht der Schutzstrecke zwischen dem Hauptsignal und dem Gefahrenpunkt im Falle, dass ein Zug über das Halt zeigende Hauptsignal hinausrutscht. Es konnte beispielsweise infolge unzureichender Bremswirkung geschehen.

In Kombination mit den Sperrabschnittselementen sind die fahrwegabhängigen Zeitverbräuche wie in Abbildung 1.4 aufgeteilt. Die Sperrzeit bezeichnet die Zeitdauer, in der der Blockabschnitt für einen fahrenden Zug gesperrt ist, und umfasst:

- die Vorbelegungszeit
 - Fahrstrassenbildezeit
 - Signalsichtzeit

- Annäherungsfahrzeit
- die Belegungszeit
- die Nachbelegungszeit
 - Räumfahrzeit
 - Fahrstrassenauflösezeit

Die **Vorbelegungszeit** setzt sich aus der Fahrstrassenbildezeit, der Signalsichtzeit und der Annäherungsfahrzeit zusammen.

Die **Belegungszeit** entspricht der reinen Fahrzeitdauer im Blockabschnitt, auch Fahrzeit im Blockabschnitt genannt.

Zur **Nachbelegungszeit** gehören die Räumfahrzeit, die der Fahrzeitdauer vom Hauptsignal des Blockabschnittes bis zum Passieren der Signalzugschlussstelle (SZS) mit dem Zugschluss entspricht, und der Fahrstrassenauflösezeit.

Die Sperrzeit t_{Sperr} ergibt sich somit aus:

$$t_{Sperr} = t_{FB} + t_{Sicht} + t_{An} + t_{Block} + t_{SZS} + t_{FA}$$

Dabei bedeuten:

t_{FB}	Fahrstrassenbildezeit (time for clearing the signal)
t_{Sicht}	Signalsichtzeit (signal watching time)
t_{An}	Annäherungsfahrzeit (approach time)
t_{Block}	Fahrzeit im Blockabschnitt (time between block signals)
t_{SZS}	Räumfahrzeit (clearing time)
t_{FA}	Auflösezeit (release time)

Der Sperrabschnitt und die Sperrzeit bilden ein Viereck (siehe Abbildung 1.4). Die graphische Darstellung der Sperrzeitsvierecken gestalten die Sperrzeitentreppe. (Abbildung 1.5)

1.3.1.1 Sperrzeitentreppe

Die Sperrzeitentreppe setzt sich aus Sperrzeitenkästchen zusammen, die jeweils die Belegung eines Zuges in einem Blockabschnitt beschreiben (siehe Abbildung 1.6). Die Sperrzeitentreppe stellt den Zeitraum, der für eine Zugfahrt mindestens frei gehalten muss, dar.

Die Sperrzeiten dienen dazu, den Kapazitätskonsum zu ermitteln, und die Auswirkung bei Infrastrukturänderungen zu bestimmen. Bei der Kapazitätsermittlung ist das Ziel nämlich, die Sperrzeitentreppe zusammenzuschieben, bis diese sich berühren, aber nicht überschneiden. Ein Blockabschnitt wird als maßgebende Blockabschnitt bezeichnet, wenn sich die Sperrzeitentreppe dabei berühren.

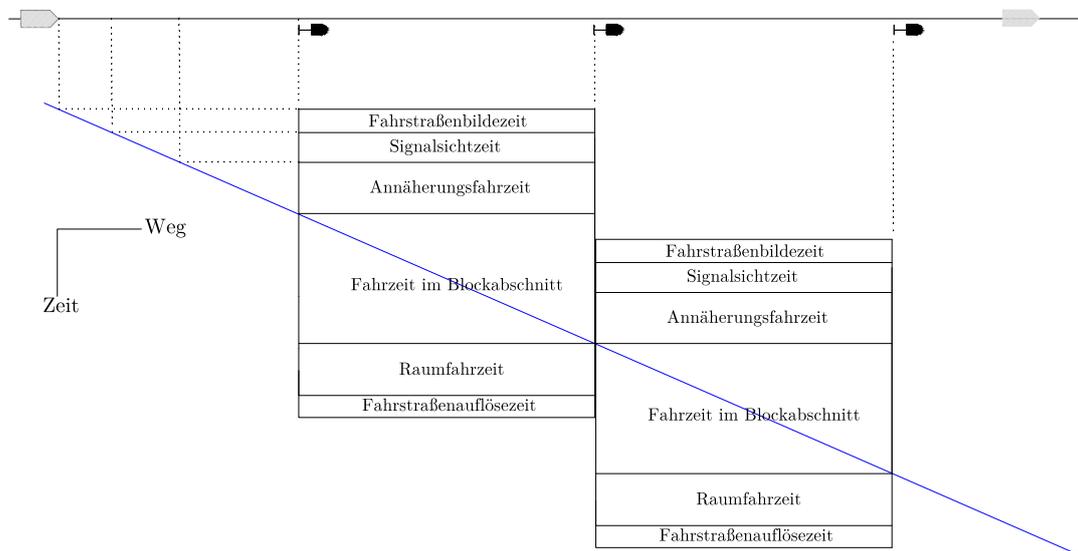


Abbildung 1.5: Bildung der Sperrzeitentreppe

1.3.1.2 Zugfolgezeit

Die Zugfolgezeit entspricht dem Zeitabstand zwischen Abfahrt zweier Züge an einem bestimmten Punkt. Sie kann mit Hilfe der Sperrzeiten ermittelt werden, und hängt von der Geschwindigkeit der Züge sowie von der Sicherheitsbedingungen auf der Strecke ab.

Die Mindestzugfolgezeit, die in diesem Abschnitt behandelt wird, ist ein wichtiger Parameter zur Kapazitätsermittlung. Sie bezeichnet den mindestens erforderlichen Zeitabstand zwischen Abfahrt zweier Züge an einem bestimmten Punkt auf der freien Strecke.

Die Betriebsqualität wird mit Hilfe der zwei nachfolgenden Parametern beeinflusst: die Pufferzeiten und die Fahrzeitzuschläge.

1.3.1.3 Pufferzeit

Zu der Mindestzugfolgezeit wird die Pufferzeit addiert. Eine Zugtrasse bezeichnet die Zeit und die Strecke die benötigt werden, um auf einer bestimmten Strecke von A nach B zu fahren. Eine Pufferzeit t_P wird zwischen den Zugtrassen eingefügt und

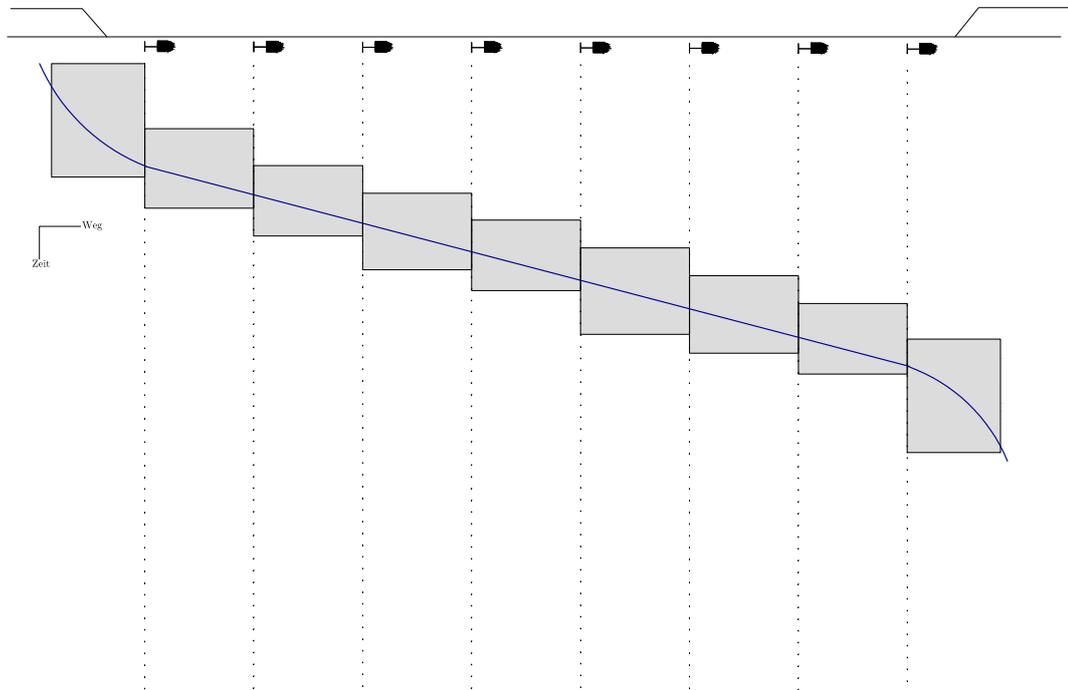


Abbildung 1.6: Sperrzeitentreppe

dient der Reduzierung oder der Vermeidung der Übertragung von Verspätungen von einem Zug auf den nächsten. Die Pufferzeit entspricht daher der maximalen Zeit, die ein vorausfahrender Zug verspätet sein darf, ohne den nachfolgenden Zug zu behindern. Gemäß Heister et al. (2006) beträgt die Pufferzeit je nach Geschwindigkeitsunterschied zwischen zwei aufeinander folgenden Zügen ein oder zwei Minuten.

In der Abbildung 1.7 sind zwei Sperrzeitentreppen untereinander dargestellt. Die zwei zeitlich aufeinander folgende Zugfahrten nutzen einen identischen Fahrweg. Zwischen den beiden Sperrzeitentrepfen ist eine Pufferzeit erkennbar.

1.3.1.4 Fahrzeitzuschläge

Neben der Pufferzeit gibt es die Fahrzeitreserven, die Fahrzeitzuschläge. Die Fahrzeitzuschläge dienen dazu, bereits entstandene Verspätungen des einzelnen Zuges während der Fahrt zu reduzieren oder wieder einzufahren. Im Gegenteil zur Pufferzeit, werden die Fahrzeitzuschläge erst im Verspätungsfall benutzt. Diese verschiedene Zeitkomponenten werden in Abbildung 1.8 verdeutlicht.

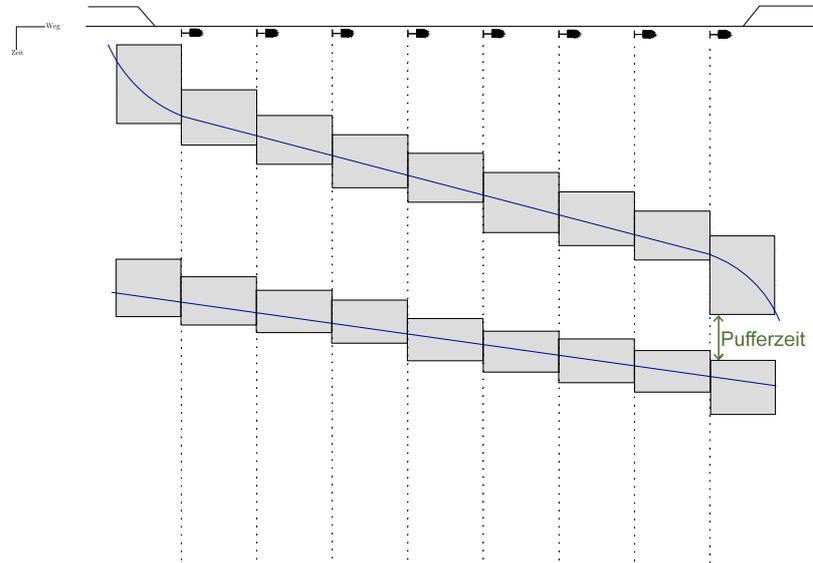


Abbildung 1.7: Sperrzeitentreppe mit Pufferzeit

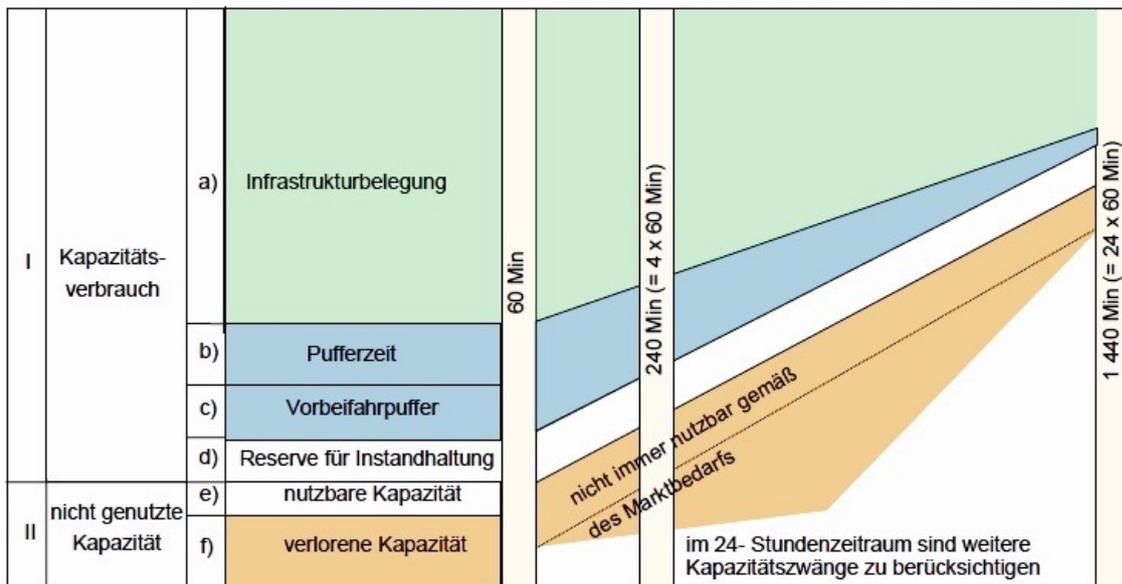


Abbildung 1.8: Ermittlung des Kapazitätsverbrauchs (UIC-Kodex-406, 2004)

Der Regelzuschlag ist ein gleichmäßig verteilter Prozentualer Zuschlag zur technisch minimalen Fahrzeit. Das heißt, der Zuschlag ergibt sich aus der Differenz der planmäßigen Fahrzeit und der minimalen Fahrzeit. Er liegt zwischen 3% und 7% (vgl. (Kaminsky, 2001)). Sonderzuschläge werden ausnahmsweise addiert. Die Fahrzeitzuschläge setzen sich zusammen aus einem entfernungsabhängigen Fahrzeitzuschlag und einem fahrzeitbezogenen Fahrzeitzuschlag.

Gemäß UIC-Kodex-451.1 (2000) ergeben die entfernungsabhängigen und die fahrzeitbezogenen Fahrzeitzuschläge gleiche Werte, wie in Abbildung 1.9 dargestellt.

Als Beispiel hierfür wären zwei Züge, die mit maximalen Geschwindigkeiten von 100km/h und 200km/h fahren. Der entfernungsabhängige Regelzuschlag beträgt $4\text{min}/100\text{km}$. Der erste Zug braucht 60min , um eine Wegstrecke von 100km mit 100km/h zurückzulegen. Der zweite Zug braucht 30min . Dazu werden die 4 Minuten addiert. Somit ergibt sich die Prozentangabe, die als Ordinate dargestellt ist (Abbildung 1.9, links). Der prozentuale Regelzuschlag ist dann in Abbildung 1.9 (rechts) dargestellt. Bei dem Wert von $4\text{min}/100\text{km}$ ergeben sich für eine bestimmte Prozentangabe ähnlichen Geschwindigkeiten.

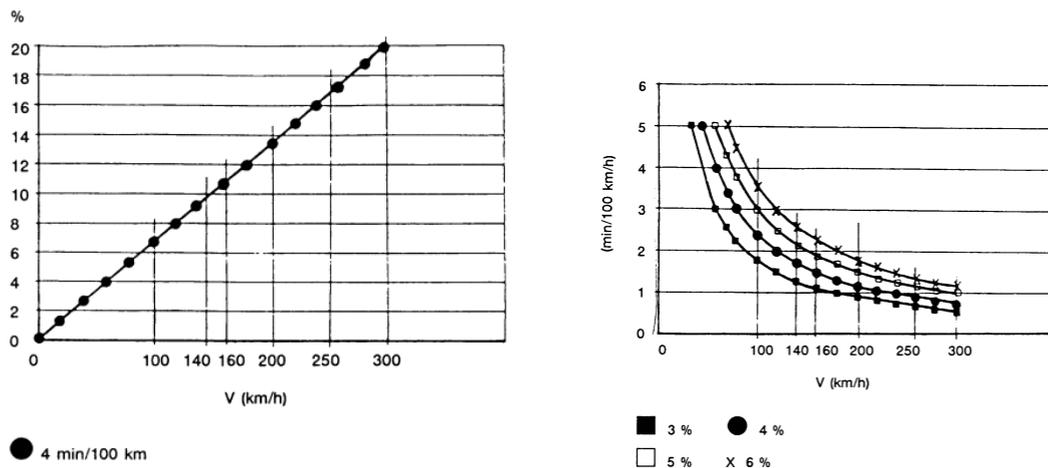


Abbildung 1.9: Entfernungsabhängiger Regelzuschlag und prozentualer Regelzuschlag (UIC-Kodex-451.1, 2000)

1.3.2 Theoretische Kapazität

Die theoretische Kapazität eines Infrastrukturbereiches ist die maximale Anzahl der Züge, die einen Streckenabschnitt pro Zeiteinheit passieren können (Abril et al., 2008, S. 776). Die Züge fahren innerhalb einer Zeitspanne unter perfekten Bedingungen: das Betriebsprogramm ist homogen (ausschließliche Nutzung der Strecke von Zügen gleicher Geschwindigkeit), die Streckentopographie ist optimal und es gibt keine Verkehrsbehinderungen im Zugverkehr.

Die Sperrzeitentrepfen zweier Züge berühren sich unterbrechungsfrei ohne Toleranz, das heißt, dass die Zugfolgezeit immer der Mindestzugfolgezeit entspricht., das heißt dem minimalen zeitlichen Abstand in dem einander zwei Züge konfliktfrei auf dem gemeinsam befahrenen Abschnitt folgen dürfen.

Die theoretische Kapazität lässt sich durch diese Formel beschreiben:

$$K_{th} = \frac{T_U}{t_{Sperr}} = \frac{T_U}{t_{FB} + t_{Sicht} + t_{An} + t_{Block} + t_{SZS} + t_{FA}} \quad (1.8)$$

Dabei bedeuten:

K_{th}	theoretische Kapazität
T_U	Untersuchungszeitraum
t_{Sperr}	Sperrzeit des Blockabschnittes
t_{FB}	Fahrstrassenbildezeit (time for clearing the signal)
t_{Sicht}	Signalsichtzeit (signal watching time)
t_{An}	Annäherungsfahrzeit (approach time)
t_{Block}	Fahrzeit im Blockabschnitt (time between block signals)
t_{SZS}	Räumfahrzeit (clearing time)
t_{FA}	Auflösezeit (release time)

Die Fahrstrassenbildezeit t_{FB} und die Auflösezeit t_{FA} sind unabhängig von der fahrenden Zügen und der Mittelwert beträgt 12 Sekunden (Pachl, 2013, S. 218). Die andere Teilzeiten lassen sich über die Geschwindigkeit $v(t)$ angeben (siehe Abbildung 1.4):

$$t_{Sicht} = \frac{L_{Sichtpunkt}}{v(t)}$$

$$t_{An} = \frac{L_{Vorsignal}}{v(t)}$$

$$t_{Block} = \frac{L_{Block}}{v(t)}$$

$$t_{SZS} = \frac{L_{SZS} + L_{Zug}}{v(t)}$$

Damit ergibt sich:

$$K_{th} = v(t) \cdot \frac{T_U}{2 \cdot t_{FB} \cdot v(t) + L_{Sichtpunkt} + L_{Vorsignal} + L_{Block} + L_{SZS} + L_{Zug}} \quad (1.9)$$

Diese Gleichung lässt sich zusammenfassen:

$$K_{th} = v(t) \cdot \frac{T_U}{2 \cdot t_{FB} \cdot v(t) + L_{Sperrstrecke}} \quad (1.10)$$

Dabei bedeutet:

$$L_{Sperrstrecke} = L_{Sichtpunkt} + L_{Vorsignal} + L_{Block} + L_{SZS} + L_{Zug}$$

1.3.3 Praktische Kapazität

Die praktische Kapazität eines Infrastrukturbereiches ist die Anzahl an Zugfahrten, welche auf diesem Bereich bei gegebenem Zugmix innerhalb einer Zeitspanne mit dem gewünschten Qualitätsniveau abgewickelt werden kann ((Abril et al., 2008, S. 776).). Nach UIC-Kodex-406 (2004) soll die realistische Kapazität einer Mischverkehrsstrecke zwischen 60% und 75% der theoretischen Kapazität betragen.

Die praktische Kapazität lässt sich durch diese Formel beschreiben:

$$K_{pr} = \frac{T_U}{\bar{t}_{Zf,min} + t_P} \quad (1.11)$$

mit

K_{pr}	praktische Kapazität
T_U	Untersuchungszeitraum
$\bar{t}_{Zf,min}$	mittlere Mindestzugfolgezeit
t_P	Pufferzeit

Die mittlere Mindestzugfolgezeit bezeichnet den Mittelwert über alle Züge und wird mit Hilfe der relativen Häufigkeit bestimmt:

$$\bar{t}_{Zf,min} = \sum(t_{Zf,min,ij} \cdot h_{ij}) \quad (1.12)$$

mit

$\bar{t}_{Zf,min}$	mittlere Mindestzugfolgezeit
$t_{Zf,min,ij}$	Mindestzugfolgezeit des Zugfolgefalls „Zug i vor Zug j“
h_{ij}	relative Häufigkeit des Zugfolgefalls „Zug i vor Zug j“

Es ist anzumerken, dass die mittlere Mindestzugfolgezeit $t_{Zf,min}$ nicht gleich dem Sperrzeit t_{Sperr} (siehe Gleichung (1.3.1)) ist. Aus den verschiedenen Zugfolgefällen ergeben sich die Mindestzugfolgezeiten. Die Sperrzeiten sind aber unabhängig von den Zugfolgefällen und werden anhand der fahrdynamischen Daten der Strecke und der verschiedenen Modellzüge ermittelt. Dann wird für jeden Zug eine Zeit-Weg-Linie mit Sperrzeiten der Blockabschnitten konstruiert (siehe Abbildung 1.4).

Gemäß Pachl (2013, S. 157) lässt sich die relative Häufigkeit des Zugfolgefalls „Zug i vor Zug j“ über die Anzahl der Züge bestimmen:

$$h_{ij} = \frac{z_i \cdot z_j}{z^2} \quad (1.13)$$

mit

z_i	Anzahl der Züge des Modellzuges i
z_j	Anzahl der Züge des Modellzuges j
z	Gesamtzahl der Züge

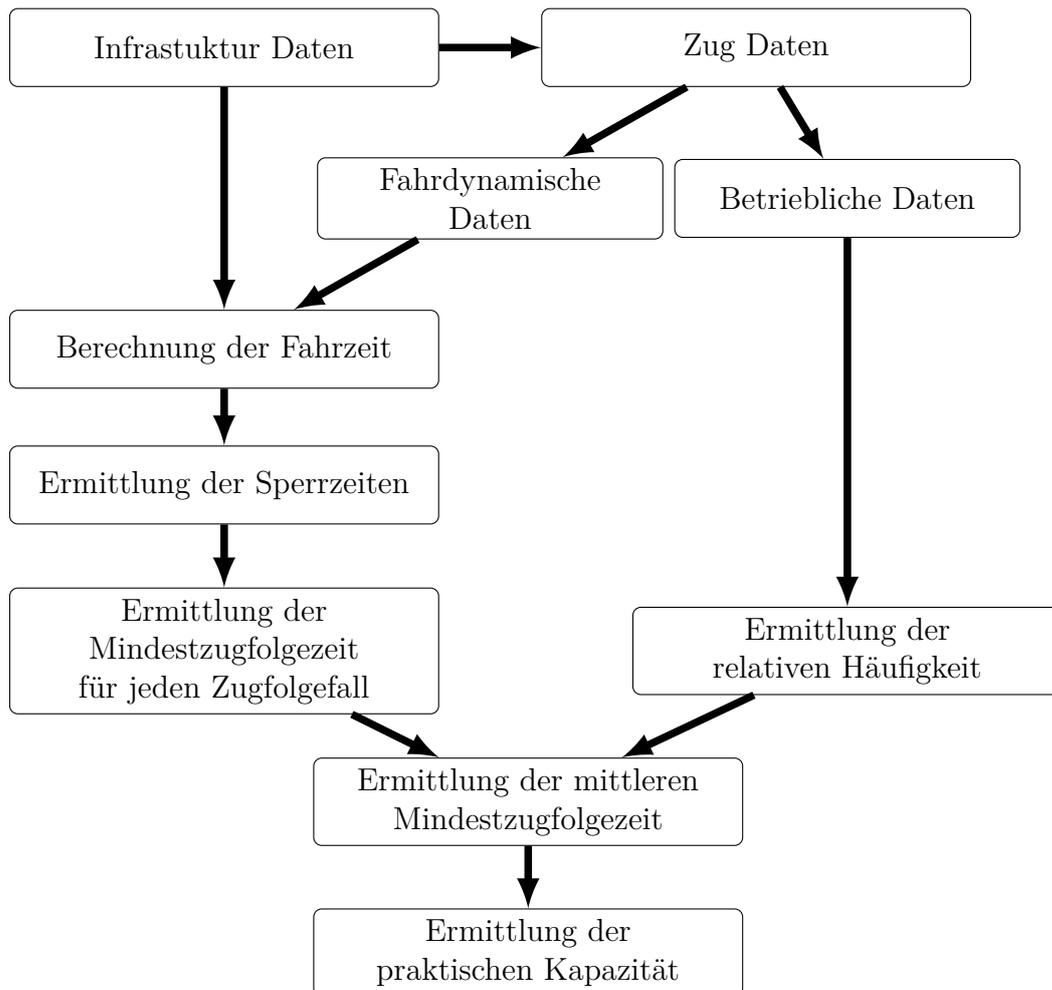


Abbildung 1.10: Ablauf der Ermittlung der praktischen Kapazität

1.3.4 Benutzte Kapazität

Die benutzte Kapazität eines Infrastrukturbereiches bezeichnet die tatsächliche Anzahl der gleichzeitig auf dieser Strecke fahrender Züge. (Abril et al., 2008, S. 777). Im Allgemeinen ist die benutzte Kapazität kleiner als die praktische Kapazität. Sie gibt nämlich die Anzahl von Zügen an, die bei einer tatsächlichen Reihenfolge unter Berücksichtigung von Reservezeiten und unter Einhaltung bestimmter Grenzen hinsichtlich Pünktlichkeit und Schnelligkeit auf der definierten Strecke fahren. Aus der Differenz zwischen der verfügbaren Kapazität und der benutzten Kapazität ergeben sich die nutzbare Kapazität und die verlorene Kapazität (siehe Abbildung 1.8).

Kapitel 2

Grundlage zur Leistungsuntersuchung

2.1 Fahrdynamische Grundlagen

Zur genauen Kenntnis der Position der Fahrzeuge auf dem Fahrweg und zur Fahrzeitermittlung sind die folgenden fahrdynamischen Grundlagen erforderlich.

2.1.1 Beschreibung der Bewegung im Raum

Die Zugbewegung findet auf einer dreidimensionalen Bahnkurve statt. Die ortsfesten Koordinaten X, Y, Z und die zugfesten Koordinaten x, y, z sind zu unterscheiden. (Abbildung 2.1)

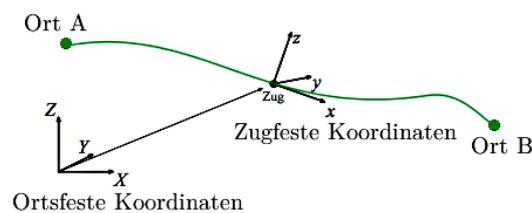


Abbildung 2.1: Koordinaten

Der Ortsvektor R gibt den Ort des Zuges im ortsfesten System an und gilt als Koordinatenursprung im zugfesten System:

$$R(t) = (X(t), Y(t), Z(t))$$

Die Geschwindigkeit V ist als Funktion der Zeit definiert:

$$V(t) = \dot{R}(t)$$

Im zugfesten System ergibt sich:

$$v(t) = \sqrt{V^2(t)}$$

Die Wegstrecke s gibt den zurückgelegten Weg an. Sie ist folgendermaßen definiert:

$$s(t) = \int_{t_0}^t |V(t')| dt' \quad (2.1)$$

In der Fahrdynamik wird der Zug in der longitudinalen Dimension als dynamisches System interpretiert. Die Grundgleichung der Fahrdynamik beschreibt die Bewegung des Zuges in seiner Gesamtheit.

2.1.2 Grundgleichung der Fahrdynamik

Die Grundgleichung der Fahrdynamik ist:

$$M \cdot \rho \cdot \frac{dv}{dt} = -W(s, v) + F_Z - F_B \quad (2.2)$$

Wobei:

M	Zugmasse
ρ	Massenfaktor
$v(t)$	Zuggeschwindigkeit
W	Summe der Widerstandskräfte
F_Z	Zugkraft
F_B	Bremskraft

Die Differentialgleichung 2. Ordnung (2.2) ist nichtlinear, zeitabhängig und kann in vielen Fällen auf 1. Ordnung reduziert werden. Diese Gleichung ergibt sich auch in wegabhängiger Form:

$$M \cdot \rho \cdot \frac{dv}{ds} = -\frac{1}{v} (W(s, v) + F_Z - F_B) \quad (2.3)$$

2.1.3 Fahrwiderstände

Die wirkende Kräfte sind dreidimensional und hängen unter anderem von der Zeit, dem Weg, der Geschwindigkeit und der Temperatur ab.

Als Widerstandskräfte sind die Streckenkräfte und die Fahrzeugwiderstandskräfte zu unterscheiden.

- Streckenkräfte
 - Neigungskraft
 - Bogenwiderstandskraft
 - Weichenwiderstandskraft
 - Tunnelwiderstandskraft
- Fahrzeugwiderstandskräfte
 - Rollwiderstandskraft
 - Lagerreibungswiderstandskraft
 - Getriebewiderstandskraft
 - Dynamische Widerstandskraft
 - Luftwiderstandskraft
 - Anfahrwiderstandskraft (im Moment des Bewegungsbeginn)
 - Bremswiderstandskraft (im Moment des Bremsens)

Neigungskraft Die Neigungskraft wird von den restlichen Widerstandskräfte unter-scheidet und F_N genannt. Je nach Steigung oder Gefälle, kann der Neigungswiderstand einen positiven oder negativen Wert betragen. Die effektive Neigung i beträgt $\frac{dh_s}{ds}$. Die Neigungskraft F_N ergibt sich nach folgender Beziehung:

$$F_N = -M \cdot g \cdot \frac{dh_s}{ds} \quad (2.4)$$

Wobei:

- M Zugmasse
- g Erdbeschleunigung
- h Höhe des Fahrzeugschwerpunktes

Die mittlere Neigung eines Streckenabschnittes A-B ergibt sich zu:

$$i_m = \frac{1}{s_B - s_A} \cdot \int_{s_A}^{s_B} h'(s) ds = \frac{h(s_B) - h(s_A)}{s_B - s_A} \quad (2.5)$$

Die Neigungen im Eisenbahnbereich sind im Allgemeinen klein, so dass die folgende Approximation gilt:

$$i = \frac{dh}{ds} = \tan \alpha \approx \alpha \quad (2.6)$$

Wobei α dem Neigungswinkel entspricht.

Die Längsneigung wird in Promille (‰) angegeben. Sie zeigt an, um wie viel Meter das Gleis auf 1000 m Länge bezogen steigt oder fällt. Als maximale Längsneigung wurde von der Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (§7 EBO) ein Grenzwert von 12,5 ‰ für Hauptbahnen, 40,0 ‰ für Nebenbahnen und 2,5 ‰ für Bahnhöfe angegeben.

Bogenwiderstandskraft Die Mittellinie des Zugs passt sich im Bogen der Krümmung an. Das Eisenbahnfahrzeug wird durch die Spurführung zur Bogenfahrt gezwungen. Damit ergibt sich bei Bogenfahrt ein erhöhter Widerstand. Gemäß Lehmann (2005), werden zur Berechnung dieser Bogenwiderstandskräfte die empirischen Formeln nach *v. Röckl* benötigt:

$$r_{Bo} = \frac{650}{R - 55}$$

gültig für $R > 300\text{m}$ (2.7)

$$r_{Bo} = \frac{500}{R - 30}$$

gültig für $R < 300\text{m}$ (2.8)

Wobei:

r_{Bo} spezifischer Bogenwiderstand in [‰]
 R Bogenradius [m]

Neigungskraft und Bogenwiderstandskraft Der Weichenwiderstand wird durch die Weichen verursacht. Er beträgt 1 ‰. Aus der Neigungskraft und der Bogenwiderstandskraft ergibt sich auf einer freien Strecke ohne Weichen der Streckenwiderstand. Mit den Gleichungen (2.6) und (2.7) gilt dann in guter Näherung:

$$r_{Strecken} = i + r_{Bo} \quad (2.9)$$

Rollwiderstandskraft Ein Vorteil der Eisenbahnen ist der geringe Rollwiderstand. Dieser liegt zwischen 1‰ und 1,5‰ und ist somit etwa zehn mal niedriger als im Straßenverkehr.

Luftwiderstand Aus der Rollwiderstandskraft und dem geringen Luftwiderstand ergibt sich ein niedriger Fahrwiderstand. Gemäß (Jänsch, 2016) (Seite 60), beträgt der Fahrwiderstand ca. 5‰ bei gemischten Güterzügen, das heißt 50% des Fahrwiderstandes bei einem Lastkraftwagen.

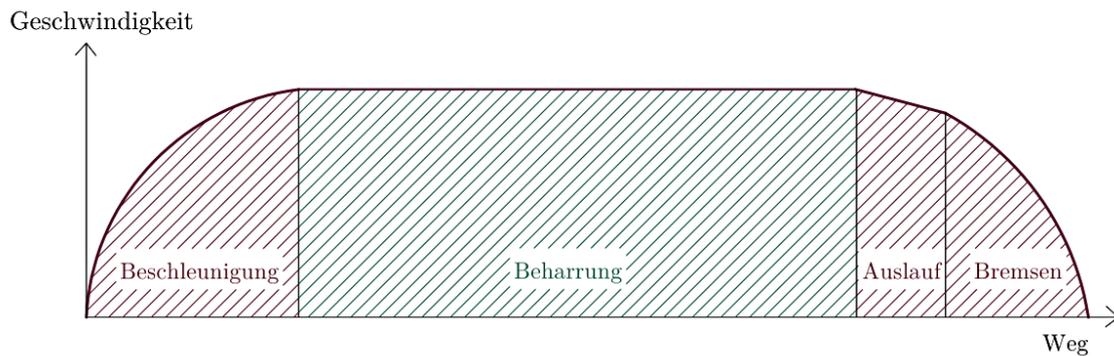


Abbildung 2.2: Fahrmodi (eigene schematische Darstellung nach Lehmann (2005, S. 172))

2.1.4 Bewegungsmodi einer Zugfahrt

Bei Eisenbahnstrecken gibt es drei verschiedene Translationsbewegungen:

- die gleichförmige Bewegung: die Geschwindigkeit ist konstant
- die gleichmäßig beschleunigte Bewegung: die Beschleunigung ist konstant und die Geschwindigkeit ergibt sich in Abhängigkeit von der Zeit als affine Funktion
- die ungleichmäßig beschleunigte Bewegung: tatsächlicher Fall

In den folgenden Abschnitten wird eine Übersicht der wesentlichen Beziehungen für eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung gegeben. (Freystein et al., 2015)

2.1.4.1 Die Beschleunigung

Während der Zug beschleunigt, ist die Reibungskraft die maßgebende Kraft.

Aus der Beschleunigung ergibt sich die Anfahrzeit:

$$t_{anf,bschl} = \frac{v_2 - v_1}{a_{anf,bschl}} \quad (2.10)$$

Wobei:

$t_{anf,bschl}$	Anfahrzeit
v_1, v_2	Geschwindigkeit
$a_{anf,bschl}$	Anfahrbeschleunigung

Die Anfahrstrecke ist auch abhängig von der Beschleunigung:

$$s_{anf,bschl} = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 \cdot a_{anf,bschl}} \quad (2.11)$$

Wobei:

$s_{anf,beschl}$	Anfahrstrecke
v_1, v_2	Geschwindigkeit
$a_{anf,beschl}$	Anfahrbeschleunigung

Die Geschwindigkeit beträgt:

$$v_{anf,beschl} = \sqrt{2 \cdot a_{anf,beschl} \cdot s_{anf,beschl}} \quad (2.12)$$

2.1.4.2 Die Beharrung

Der Zug fährt eine konstante Geschwindigkeit. Die maßgebende Kraft bei der Beharrungsphase ist vom Zugkraftdiagramm (siehe Abbildung 2.3) abhängig.

Die Fahrzeit lässt sich mit Hilfe der Geschwindigkeit ermitteln:

$$t_{const} = \frac{s_{const}}{v_{const}} \quad (2.13)$$

Wobei:

t_{const}	Fahrzeit
s_{const}	Länge der Strecke mit konstanter Geschwindigkeit
v_{const}	Fahrgeschwindigkeit

Die Gleichung (2.13) kann auch so formuliert werden:

$$s_{const} = v_{const} \cdot t_{const}$$

2.1.4.3 Das Auslaufen

Beim Auslaufen, wird der Zug nicht beschleunigt und nicht gebremst.

Die Verzögerung wird mit Hilfe der Widerstände ermittelt:

$$a_{ausl} = \frac{g \cdot (w_0 \pm w_s + w_b)}{\rho} \quad (2.14)$$

Die Auslauflänge ergibt sich daraus:

$$s_{aus} = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 \cdot a_{ausl}} \quad (2.15)$$

Mit:

a_{ausl}	Verzögerung
s_{ausl}	Fahrstrecke
v_1, v_2	Geschwindigkeit
ρ	Massefaktor
g	Erdbeschleunigung
w_0	Laufwiderstand
w_b	Bogenwiderstand
w_s	Steigungswiderstand

2.1.4.4 Das Bremsen

Beim Bremsen wird der Zug verlangsamt oder zum Stillstand gebracht. Die Bremsung besteht aus der Reaktionsphase, der Ansprechphase, der Schwellphase und der Vollwirkphase.

Die Bremsverzögerung wird mit Hilfe der Widerstände ermittelt:

$$a_{br} = \frac{g \cdot (w_0 \pm w_s + w_b + w_{br})}{\rho} \quad (2.16)$$

Die Bremswegberechnung beträgt somit:

$$s_{br} = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 \cdot a_{br}} \quad (2.17)$$

Mit:

a_{br}	Bremsverzögerung
s_{br}	Bremsweg
v_1, v_2	Geschwindigkeit
ρ	Massefaktor
g	Erdbeschleunigung
w_0	Laufwiderstand
w_b	Bogenwiderstand
w_s	Steigungswiderstand
w_{br}	Bremswiderstand

Gemäß Lehmann (2005, S. 152) beträgt die mittlere Bremsverzögerung:

$$a_{br,m} = \frac{v_0^2}{2 \cdot s_{br}} \quad (2.18)$$

Die Geschwindigkeit beträgt:

$$v_{br,m} = \sqrt{2 \cdot a_{br,m} \cdot s_{br,m}} \quad (2.19)$$

2.1.5 Zugkraft

Die Zugkraft dient der Überwindung der Fahrwiderstände, die bei einer Zugfahrt der Bewegung entgegenwirken. Diese Kraft ist notwendig, um den Bewegungszustand zu erzeugen und zu erhalten. Die Zugkraft nimmt bei konstanter Leistungsabgabe des Triebfahrzeugs mit steigender Geschwindigkeit der Fahrzeuge hyperbolisch ab. (Siehe Abbildung 2.3) Die durch Rad und Schiene übertragbare Kraft nimmt auch mit wachsender Geschwindigkeit ab.

Zwei Grenzkraften charakterisieren die Zugkraft. Die erste physikalische Grenze entspricht der durch Rad und Schiene übertragbaren Kraft:

$$F = Q \cdot \mu$$

Wobei:

- Q Fahrzeuggewicht
- μ Haftreibungsbeiwert

μ wird oft mit Hilfe der Curtius-Kniffler Gleichung bestimmt. Die Gleichung (2.20) gilt für trockenen Schienenzustand und die Gleichung (2.21) für nassen Schienenzustand.

$$\mu = 0,161 + \frac{7,5}{v + 44} \quad (2.20)$$

$$\mu = 0,130 + \frac{7,5}{v + 44} \quad (2.21)$$

Die verschiedenen Werte vom Haftreibungsbeiwert μ sind in der Tabelle 2.1.5 gegeben.

Witterung	$v < 200km/h$	$v > 200km/h$
trocken	$\mu < 0,28$	$\mu < 0,18$
nass	$\mu < 0,16$	$\mu < 0,10$
Staub, Ruß, Laub...	$\mu \simeq 0,03$	$\mu \simeq 0,02$

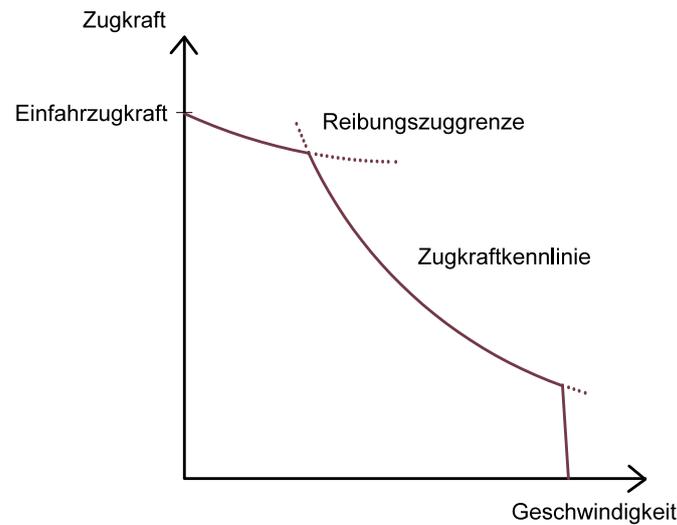
Tabelle 2.1: Haftreibungsbeiwert μ

Die Antriebsleistung liefert die maximale Zugkraft des Triebfahrzeugs und zweite Grenzkraft:

$$F = \frac{P}{v}$$

Wobei:

- P Leistung der Lokomotive
- v Geschwindigkeit

Abbildung 2.3: Ideales Zugkraftdiagramm $Z = f(v)$

Die Grenzleistung des Triebfahrzeugs P wird als konstant angenommen.

Daraus ergibt sich das ideale Zugkraftdiagramm (in Abbildung 2.3 dargestellt).

Die verfügbare Zugkraft muss in Steigungen ausreichend sein, um eine betrieblich gewünschte Geschwindigkeit konstant zu halten.

2.1.6 Bremskraft

Die Bremsung hat drei Funktionen: die Änderung und Erhaltung des Bewegungszustandes sowie das Sichern von Fahrzeugen gegen das Abrollen am Hang. Sie dient auch zur Bestimmung der maximalen fahrbaren Geschwindigkeit. Die Bremskraft F_B ist stark geschwindigkeitsabhängig. Sie hängt aber auch von der Zeit, dem Bremssystem der Fahrzeugs und der gewählten Bremsstufe ab.

Die Grundgleichung der Fahrdynamik beschreibt die Bremsung:

$$M \cdot \rho \cdot \frac{dv}{dt} = F_N - W_{Ges}(v) + -F_B(v, t) \quad (2.22)$$

Die Bremskraft ist zeitabhängig und diese Gleichung daher schwer lösbar.

2.1.7 Fahrzeitermittlung

Die reine Fahrzeit, auch kürzeste oder minimale Fahrzeit genannt, bezeichnet die Fahrzeit zum Durchfahren eines Abschnittes. Die Ermittlung der reinen Fahrzeit erfolgt

unter Ausnutzung der Leistungsfähigkeit des Triebfahrzeuges. Die zulässige Geschwindigkeit, die Zuggattung, das Bremsvermögen, die Streckenverhältnisse und die angenommenen fahrdynamischen Bedingungen müssen ebenfalls berücksichtigt werden.

2.2 Regelung und Sicherung der Zugfolge

Die Sicherheit von Personen und Gütern besitzt im öffentlichen Verkehr oberste Priorität.

2.2.1 Fahren im festen Raumabstand

2.2.1.1 Zugfolgeabstand

Lange Bremswege und fehlende Ausweichmöglichkeiten ermöglichen im Allgemeinen auf Eisenbahnstrecken kein Fahren auf Sicht. Auf den Eisenbahnstrecken der meisten europäischen Bahnen verkehren daher Züge im festen Raumabstand. Die Strecke wird in Blockabschnitte eingeteilt und somit ein konstanter Abstand zwischen aufeinanderfolgenden Zügen freigehalten (Pachl, 2013).

Im Bahnhof und auf der Strecke sind Zugfahrten durch ortsfeste Signale gesichert und geregelt. Die Zugfolgeabstände ergeben sich durch die Einteilung in Blockabschnitte, die bei Anwendung der ortsfesten Signalisierung durch Hauptsignale begrenzt werden. Die Zustimmung zur Zugfahrt wird nur an diskreten Punkten erteilt. Ist ein Streckenabschnitt nicht frei von Fahrzeugen, wird dem Zug durch das Hauptsignal am Beginn des Abschnittes mitgeteilt, dass die Einfahrt nicht gestattet ist.

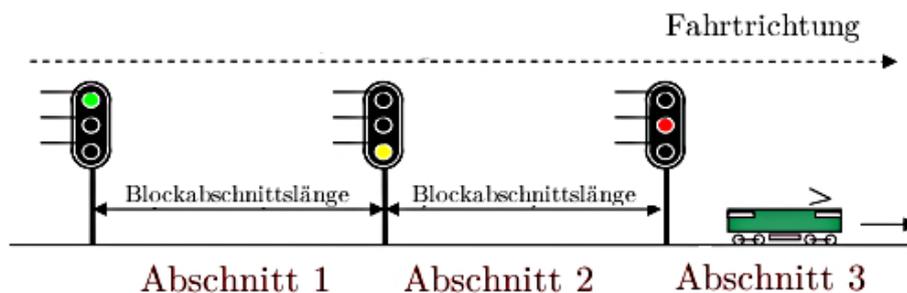


Abbildung 2.4: Fahren im festen Raumabstand

2.2.1.2 Zugfolgezeit

Die Sperrzeit eines Blockabschnitts wurde von Pachl (2013) definiert, als die Zeitspanne, in der ein Gleisabschnitt durch eine Fahrt betrieblich beansprucht und somit für

andere Fahrten gesperrt ist. Diese Sperrzeit besteht aus den verschiedenen Teilzeiten, die im Abschnitt 1.3.1 beschrieben wurden. Es ist anzumerken, dass ein Zug zeitweise zwei Zugfolgeabschnitte gleichzeitig sperren kann.

Der minimale zeitliche Abstand in dem einander zwei Züge konfliktfrei auf dem gemeinsam befahrenen Abschnitt folgen dürfen wird Mindestzugfolgezeit genannt und kann mit Hilfe der Sperrzeitentreppe ermittelt werden (die Methode wird im Abschnitt 3.1 beschrieben).

2.2.2 Bedingungen des Fahrens im festen Raumabstand

Ein Zug darf in einen Blockabschnitt einfahren, wenn die drei folgenden Bedingungen erfüllt sind (Pachl, 2013):

- kein anderer Zug befindet sich auf diesem Blockabschnitt
- kein anderer Zug befindet sich auf dem Durchrutschweg am Ende des Blockabschnitts
- wenn ein Zug vorausfährt, muss er durch ein Halt zeigendes Signal gedeckt sein.

2.2.3 Ortsfeste Signalisierung

Ein Signal ist ein sichtbares Zeichen, das eine Information mitteilt und somit zur Sicherung von Zugfahrten dient. Die Signalbedeutung entspricht der verbalen Darstellung der Information, beispielsweise „Langsamfahrt“ oder „Halt“ (Hegger et al., 2008).

Zwei verschiedene ortsfeste Blocksignale werden unterschieden:

- Hauptsignale
- Vorsignale

Das Hauptsignal dient dazu, das Fahren im anschließenden Blockabschnitt zu erlauben. In einem sogenannten Signallageplan werden die möglichen Signaltypen gekennzeichnet.

Da der Triebfahrzeugführer diese Information schon am Beginn des Bremswegs vor dem Hauptsignal braucht, ist ein Vorsignal notwendig. Das Vorsignal befindet sich im bestimmten Bremswegabstand vor dem Hauptsignal und zeigt, ob eine Haltestellung oder eine Fahrtstellung zu erwarten ist. Gemäß Jansch (2016) und Hegger et al. (2008) beträgt dieser Regelabstand 1000 m bei 160 km/h Streckenhöchstgeschwindigkeit. Bei höheren Geschwindigkeiten ist ein anderes Zugsicherungssystem mit kontinuierlicher Zugbeeinflussung erforderlich, da die sichere Erkennung der Vorsignalstellung nicht mehr garantiert ist und längere Bremswege erforderlich sind.

Diese Blocksignale stehen in der Regel rechts vom Gleis und werden mit arabischen Zahlen gekennzeichnet. Die Signale in Richtung der Kilometrierung sind mit ungeraden Zahlen, und die Signale entgegen der Kilometrierung mit geraden Zahlen zu bezeichnen. (Jochim and Lademann, 2009)

2.3 Maßgebende Einflussfaktoren

Die Fahrzeit wird durch die physikalischen Randbedingungen aus den Zugparametern, der Fahrplankonstruktion und den Gegebenheiten der Infrastruktur bestimmt. Die Kapazität hängt daher, wie in Abbildung 2.5 dargestellt, von verschiedenen Parameter ab. Die wesentlichen Einflüsse auf die Kapazität werden in diesem Abschnitt beschrieben und unterschieden.

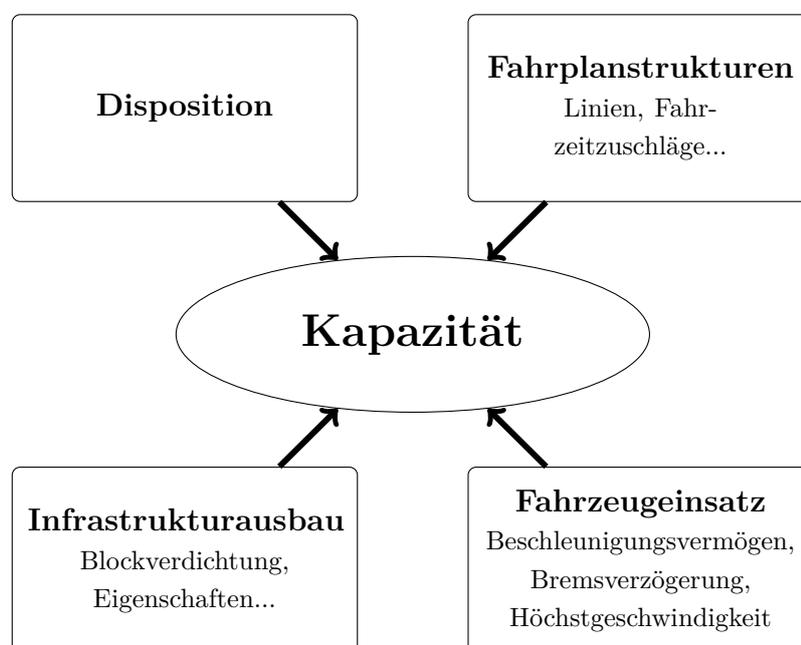


Abbildung 2.5: Einflüsse auf die Kapazität (nach Jänsch (2016, S. 324))

2.3.1 Parameter der Kapazität

Die folgenden wesentlichen Parameter sind von entscheidendem Einfluss auf die Mindestzugfolgezeit und somit auf die Kapazität. Wie im Abschnitt 1.3 beschrieben, folgt nämlich die Ermittlung der Kapazität aus:

- dem Mischungsverhältnis der Züge
- der Zuglänge

- der Anfahr- und Bremsseigenschaften der Züge
- der Länge der Blockabschnitte
- der Geschwindigkeit der Züge
- den Stabilitätsanforderungen (Zeitzuschläge/Pufferzeit...)
- den Haltezeiten in den Stationen

2.3.2 Einflussfaktoren aus der Betriebsplanung

Zur Betrachtung der Kapazität sind zuerst die Charakteristiken der Betriebsplanung zu berücksichtigen. Die Kapazität einer Eisenbahninfrastruktur hängt stark vom Betriebsprogramm ab. Je homogener das Betriebsprogramm im Eisenbahnverkehr gestaltet ist, desto eher sind eine Ausnutzung der theoretischen Streckenkapazität und ein ökonomischer Betrieb möglich. Die Anzahl der Zugfahrten und die Fahrplanstruktur sind zu berücksichtigen.

Die Fahrplanstruktur gibt das Mischungsverhältnis und die zeitliche Verteilung der Zugfahrten an und beeinflusst die Effektivität der Infrastruktur. Wenn der vorausfahrende Zug schneller als seine Nachfolger fährt, wird der zeitliche Abstand zwischen den Zügen entlang der gefahrenen Strecke immer größer. Die Streckenkapazität wird daher nicht ausgenutzt. Je größer die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen den Zügen ist, desto größer wird die unnutzbare Streckenkapazität.

Weitere Einflussfaktoren aus der Betriebsplanung sind die Zugparameter (Zugkraft, Länge, Gewicht, Bremsvermögen) sowie die Zuschläge (Regel-, Sonderzuschlag). Ohne zeitliche Reserven ist der Fahrplan in der Praxis undurchführbar.

2.3.3 Einflussfaktoren aus der Infrastrukturgestaltung

Die Infrastrukturelemente umfassen den Neigungswechsel, die zulässigen Höchstgeschwindigkeiten, die Weichen sowie Elemente der Sicherungstechnik wie Auflösekontakte, Stellwerkstechniken und Signale.

Die Länge der jeweiligen Sperrzeit hängt von der Länge der Blockabschnitte ab. Die Fahrzeit im Blockabschnitt wird von der zulässigen Höchstgeschwindigkeit beeinflusst.

Kapitel 3

Experimentelle Bestimmung des Leistungsgewinns einer Verkürzung der Blockabschnittslänge

3.1 Methode zur Leistungsuntersuchung

3.1.1 Näherungsverfahren

Hier wird das Näherungsverfahren zur Fahrzeitermittlung beschrieben. Die fahrdynamischen und betrieblichen Approximationen sollen nachvollziehbar sein und werden durchaus sinnvolle Ergebnisse liefern.

3.1.1.1 Fahrdynamische Annäherungen

Bewegungsmodi Lehmann (2005, S. 323) gibt den Vorschlag an, die Zugfahrt nur in drei Bewegungsmodi aufzuteilen:

- die Beschleunigung
- die Beharrung
- das Bremsen

Somit wird die Fahrzeitermittlung vereinfacht.

Punktmodell Die Züge, bestehend aus Triebfahrzeugen und einem Wagenzug, werden von einem Triebfahrzeug befördert, das sich an der Spitze befindet.

Drei verschiedene Modelle sind zu unterscheiden:

- Ein Zugverband kann als inhomogenes Massenband modelliert werden. Bei einer Modellierung des Zugverbandes als inhomogenes Massenband werden die Länge der einzelnen Zugelemente (Triebfahrzeuge, Wagen) sowie die Verteilung der Gewichte (Eigengewicht und Zuladung) berücksichtigt. Innerhalb des Zugverbandes wird die Änderung der Streckenneigung berücksichtigt. Somit ergibt sich ein Wechsel der Widerstände innerhalb des Zugverbandes.
- Ein Zugverband kann näherungsweise als homogenes Massenband betrachtet werden. Das Gewicht vom Zug wird gleichmäßig auf die Zuglänge verteilt.
- Eine weitere Näherung besteht darin, den Zug als Punktmodell zu betrachten. Die Masse wird auf einen Punkt konzentriert.

Gemäß Radtke (2006) können die drei verschiedenen Modelle auf einer 10-km langen Strecke mit wechselnden Neigungen, wie in der Tabelle 3.1 dargestellt, verglichen werden.

Fahrdynamisches Modell	Fahrzeitanteil [min]	Fahrzeitanteil [s]	Veränderung [%]
Punkt	10	48	100
homogenes Massenband	10	15	94,9
inhomogenes Massenband	10	7	93,6

Tabelle 3.1: Vergleich der Modellannahmen (Radtke, 2006)

Der Schwerpunkt der Simulation liegt in der Blockteilung und es muss keine Berechnung von Effekten einer inhomogenen Verteilung der Masse untersucht werden. Der Effekt der Zuladung in Steigungen und Gefälle ist für die Simulation nicht wesentlich und das Punktmodell wird als Ansatz für die Berechnung verwendet.

Der Zug wird daher als Punkt modelliert. Die Zuglänge wird trotzdem zur Berechnung der Sperrzeit jedes Blockabschnittes berücksichtigt.

Konstante Beschleunigung Die Fahrzeitermittlung erfolgt näherungsweise unter Ansatz konstanter Anfahrbeschleunigungen. Die folgenden Fahrmodi werden abgebildet:

- Beschleunigung auf eine Zielgeschwindigkeit, unter Ansatz konstanter Anfahrbeschleunigung
- Fahrt mit variabler Zugkraft, passend zur zu haltenden Geschwindigkeit. Die Geschwindigkeit bleibt konstant.
- Auslaufen, mit einer konstanten Verzögerung

- Bremsung auf eine Zielgeschwindigkeit, mit einer konstanten Bremsverzögerung

Es ergeben sich in einfachster Näherung die Formeln die in der Tabelle 3.2 zusammengefasst sind.

Phasen	Belegungszeit	zurückgelegter Weg
Beschleunigung	$t_{anf,bschl} = \frac{v_2 - v_1}{a_{anf,bschl}}$	$s_{anf,bschl} = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 \cdot a_{anf,bschl}}$
Beharrung	$t_{const} = \frac{s_{const}}{v_{const}}$	$s_{const} = v_{const} \cdot t_{const}$
Bremsen	$t_{br} = \frac{v_2 - v_1}{a_{br}}$	$s_{br} = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 \cdot a_{br}}$

Tabelle 3.2: Belegungszeit und zurückgelegter Weg unter Ansatz konstanter Beschleunigungen und Verzögerungen

Bremsverfahren Der Bremsseinsatzpunkt wird mit der Formel $\frac{v^2}{2 \cdot a_{br}}$ ermittelt. Dabei wird angenommen, dass die verfügbare Bremsverzögerung in jedem Fall, auch im Gefälle, ausreicht. Die Bremsverzögerung muss den Zug auf die gewünschte Geschwindigkeit verzögern können.

Unter Berücksichtigung der Streckentopographie würde sich eine verbesserte Bestimmung des Bremsseinsatzpunktes ergeben. Die Hangabtriebskraft in einer Steigung wirkt nämlich als zusätzlicher Widerstand und verkürzt somit den Bremsweg. Die Hangabtriebskraft im Gefälle verlängert hingegen den Bremsweg. Bei der Simulation wird die Streckentopographie als optimal betrachtet: eine horizontale Gerade. Der Bogenradius liegt näherungsweise über 1000 m, und der Bogenwiderstand ist daher zu vernachlässigen.

3.1.1.2 Betriebliche Annäherungen

Zuggeschwindigkeit Die zulässige Geschwindigkeit, mit der die Züge auf dem Streckenabschnitt der Simulation verkehren dürfen, ist von den baulichen Parametern der Infrastruktur (baulicher Zustand, Längsneigung, Kurvenradius, Überhöhung) sowie von den Gegebenheiten des eingesetzten Fahrzeugmaterials abhängig.

Eine zulässige Geschwindigkeit von 160km/h wird für die Simulationsstrecke angenommen. Diese Höchstgeschwindigkeit gilt nach der EBO auf Hauptbahnen ohne Linienzugbeeinflussung-Führung.

Pufferzeit Die Pufferzeit garantiert eine bestimmte Betriebsqualität. Eine Fahrplan-konstruktion erfolgt unter Berücksichtigung der Regelungen des jeweiligen Landes. So kann sich je nach Land die Vergabe von Pufferzeiten oder Zuschlägen signifikant unterscheiden. Gemäß (Jänsch, 2016), gelten in deutschsprachigen Ländern diese Pufferzeitenregelungen:

- 1 Minute, wenn der nachfolgende Zug mit derselben oder einer geringeren Geschwindigkeit als der vorausfahrende Zug an- oder durchfährt
- 2 Minuten, wenn der nachfolgende Zug mit einer 40 km/h höheren Geschwindigkeit als der Davorliegende durchfährt

Die Pufferzeiten werden erst nach der Simulation berücksichtigt.

3.1.2 Ablauf der Mindestzugfolgezeitberechnung

3.1.2.1 Berechnung der Fahr- und Sperrzeiten

Die Fahrzeitberechnung erfolgt nach der genauen Abbildung der Signale und der Angabe der fahrdynamischen und betrieblichen Daten der Züge. Die Fahrzeit wird für beide Züge ermittelt.

Daraus folgt die Berechnung der Sperrzeit und somit die Erstellung der Sperrzeit-treppen.

3.1.2.2 Ermittlung der Mindestzugfolgezeit für jeden Zugfolgefall

Zugfolgefall Die Simulation erfolgt mit zwei Modellzügen. Der langsame Zug ist der Zug Z_L und der schnelle Zug der Zug Z_S . Die Zugfolgefallmatrix ist die Matrix die charakterisiert, wie oft ein Modellzug einem anderen Modellzug folgt. Diese Matrix umfasst die vier möglichen Zugfolgefälle, die vorkommen können:

- Zugfolge Schnell-Langsam (S-L): Ein langsamer Zug L folgt einem schnelleren Zug S . Der Zeitliche Abstand zwischen beiden Zügen verlängert sich im Laufe der Fahrt.
- Zugfolge Langsam-Schnell (L-S): Ein schneller Zug S folgt einem langsamen Zug L . Der Abstand zwischen diesen Zügen ist am ersten befahrenen Zugfolgeabschnitt am größten. Der minimale Abstand ergibt sich daher spätestens am letzten gemeinsamen Abschnitt.
- Zugfolge Schnell-Schnell (S-S): Der Zeitliche Abstand zwischen beiden Zügen bleibt konstant.

- Zugfolge Langsam-Langsam (L-L): Der Zeitliche Abstand zwischen beiden Zügen bleibt konstant.

Die Zugfolgefällematrix ist $\begin{pmatrix} h_{LL} & h_{LS} \\ h_{SL} & h_{SS} \end{pmatrix}$. Dabei beträgt h_{ij} die relative Häufigkeit des Zugfolgefalls „Zug i vor Zug j“.

Mindestzugfolgezeitberechnung Pahl (2013) gibt eine Methode zur Berechnung der Mindestzugfolgezeit an.

Nach der Berechnung der Fahrzeit wird die Sperrzeitentreppe um die Zeit-Weg-Linie konstruiert. Die Sperrzeitentreppe zweier nacheinander folgenden Züge werden übereinander gelegt. Diese zwei Zugfahrten haben somit die selbe Anfahrzeit und die Zugfolgezeit beträgt 0 min.

Die Sperrzeitüberschneidung (*Blocking Time Overlap*) wird wie folgt ermittelt :

$$\text{Sperrzeitüberschneidung} = \text{Sperrzeitende}(\text{Zug 1}) - \text{Sperrzeitbeginn}(\text{Zug 2})$$

Die Abbildung 3.1 verdeutlicht diese Gleichung.

Die Sperrzeitüberschneidung gibt die Zugfolgezeit an, die eine behinderungsfreie Fahrt des zweiten Zuges bezogen auf den betrachteten Blockabschnitt ermöglicht. Die Sperrzeitüberschneidungen sind für jeden Blockabschnitt zu ermitteln.

3.1.2.3 Maßgebende Blockabschnitte

Der maßgebende Blockabschnitt einer Zugfahrt ist jener, wo die Sperrzeitüberschneidung am größten ist. An dem maßgebenden Blockabschnitt wird der Abstand vom Belegungsende des vorausfahrenden Zuges bis zum Belegungsanfang des nachfolgenden Zuges minimal. Er zeigt die genaue Stelle an, an der im Fall einer Verspätung von einer Zugfahrt diese Verspätung auf die nächste Zugfahrt übertragen wird. Die Pufferzeit soll daher an den maßgebenden Blockabschnitten addiert werden.

Der größte Wert der Sperrzeitüberschneidung liefert die Mindestzugfolgezeit, um die die gesamte Sperrzeitentreppe des zweiten Zuges verschoben sein soll. Der maßgebende Blockabschnitt wird für jeden Zugfolgefall ermittelt.

Für die verschiedene Zugfolgefälle gibt es bestimmten maßgebende Blockabschnitte.

3.1.3 Zielsetzung

Zeitlücke Die Zeitlücke entspricht dem Abstand vom Sperrzeitende eines Blockabschnittes für den vorausfahrenden Zug bis zum Sperrzeitanfang dieses Blockabschnittes für den nachfolgenden Zug. Das Ziel der Simulation besteht darin, die Zeitlücken zu minimieren oder zu vermeiden. Die kleinste Zeitlücke und die größte Zeitlücke dürfen sich nicht zu stark unterscheiden.

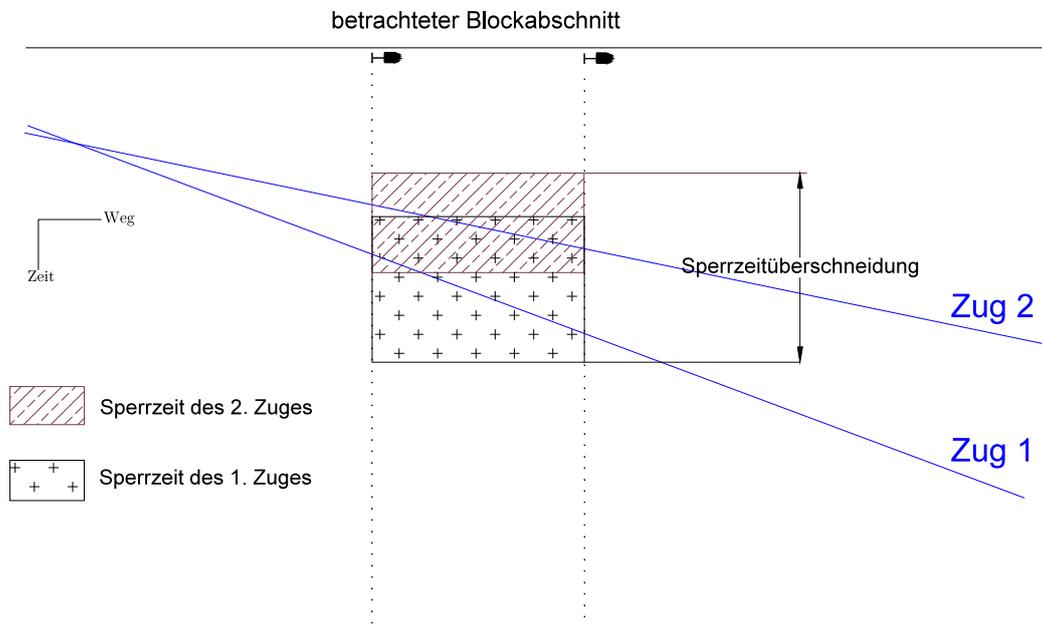


Abbildung 3.1: Sperrzeitüberschneidung

Optimale Blockteilung Für jeden Blockabschnitt wird die Belegungszeit jeder Zugfahrt ermittelt und daraus die Sperrzeitentreppe dargestellt. Wenn sich nach Berechnung der Mindestzugfolgezeit der maßgebende Blockabschnitt ergeben hat, erfolgt eine neue Blockteilung. Es wird damit versucht, die Zugfolgezeit der neuen Blöcke auf die Zugfolgezeit des zweiten maßgebenden Blockabschnittes zu verringern. Die Standorte der Hauptsignale müssen zu möglichst gleichen Belegungszeiten für jeden Blockabschnitt führen. Es ist anzunehmen, dass die Signale im Bereich des Anfahrens und des Bremsens deutlich näher zu einander sein müssen. Die optimale Blockteilung wäre jene, bei der keine Zeitlücke übrig bleibt. Das heißt, die Einteilung ist so zu wählen, dass sie der benötigten Kapazität der Strecke angepasst ist und möglichst gleiche Zeitanteile bei der Durchfahrt eines Zuges bedeutet.

Bei der Simulation müssen Effekte der Blockteilung klar erkennbar werden. Die Ergebnisse werden dargestellt und interpretiert. Am Ende der Simulation erfolgt die Berechnung der benutzten Kapazität.

3.2 Umsetzung der Simulation

3.2.1 Randbedingungen und Parameter des Simulationsbeispiels

Alle Parameter der Simulation sind am Ende dieses Teils in der Tabelle 3.3 zusammengefasst.

Geometrie der Strecke Die Strecke wird als horizontale Gerade betrachtet. Bei der Planung und dem Entwurf von Fahrwegen der Eisenbahn ist die horizontale Gerade das günstigste Trassierungselement (Schiemann, 2002). Aus einem Radius $r = \infty$ ergibt sich die Krümmung $k = 0$. Es gibt keine besondere Steigung oder Gefälle. Somit ist eine hohe Fahrgeschwindigkeit realistisch und die Geschwindigkeit bleibt konstant bei der Beharrungsphase. Die Höchstgeschwindigkeit auf der befahrenen Strecke beträgt 160 km/h .

Signalgestaltung Vor dem Beginn der Simulation wird die Infrastruktur manuell eingegeben. Besondere Aufmerksamkeit ist den Maßstäben und Einheiten zu widmen. Eine falsche Modellierung könnte sich später als Fehler mit fatalen Auswirkungen herausstellen. Es ist abzustimmen, welche speziellen Besonderheiten der Struktur in jeder Variante zu beachten sind.

Die Blockteilung erfolgt mit der Position der Blocksignale. Zwei Blockteilungen sind zu unterscheiden:

- Bei dem Bewegungsmodus der Beharrung ist die Geschwindigkeit konstant. Die Teilstrecke wird in gleiche Abschnitte von bestimmter Länge aufgeteilt. Die Zeit-Weg-Linie entspricht nämlich der Form einer affinen Funktion und eine gleichmäßige Blockteilung ist daher erforderlich. Unterschiedliche Blocklängen würden, wie in Abbildung 3.2 dargestellt, zur Behinderung führen.
- Die Blockabschnitte werden bei der Anfahr- und Bremsphase dichter aufgeteilt. Die Sperrung von Gleisabschnitten wird daher realistisch abgebildet. Die Abbildung 3.3 zeigt ein Blockteilungsbeispiel an.

Technischer Zustand der Modellzüge Zwei Modellzüge werden angenommen. Es ist insbesondere auf die Aufnahme von Fahrzeugdaten zu achten. Das Bremsvermögen, die Verzögerung des Auslaufens sowie die Anfahrbeschleunigung werden konstant und realistisch angenommen.

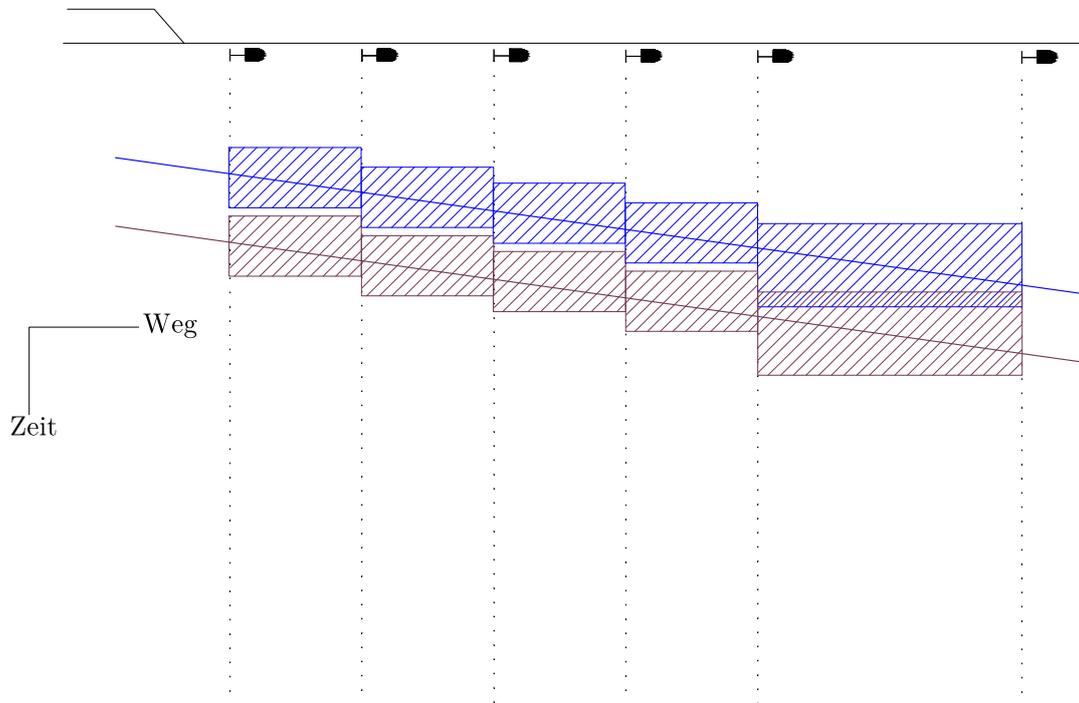


Abbildung 3.2: Behinderung aufgrund einer größeren Blocklänge

Infrastrukturdaten	Fahplandaten	Triebfahrzeug- und Zugdaten
<ul style="list-style-type: none"> • Trassierung • Kilometrierung (m) • zulässige Geschwindigkeit (km/h) • Maßgebende Neigung() • Krümmungsrichtung • Signale 	<ul style="list-style-type: none"> • Ankunftsort • Abfahrtsort • Abfahrtszeit des ersten Zuges • Regelzuschlag, Pufferzeit (%) (s) 	<ul style="list-style-type: none"> • Bremsverzögerung • Masse • Länge • zulässige Höchstgeschwindigkeit • Laufwiderstand • Haftreibungswert

Tabelle 3.3: Parameter der Simulation

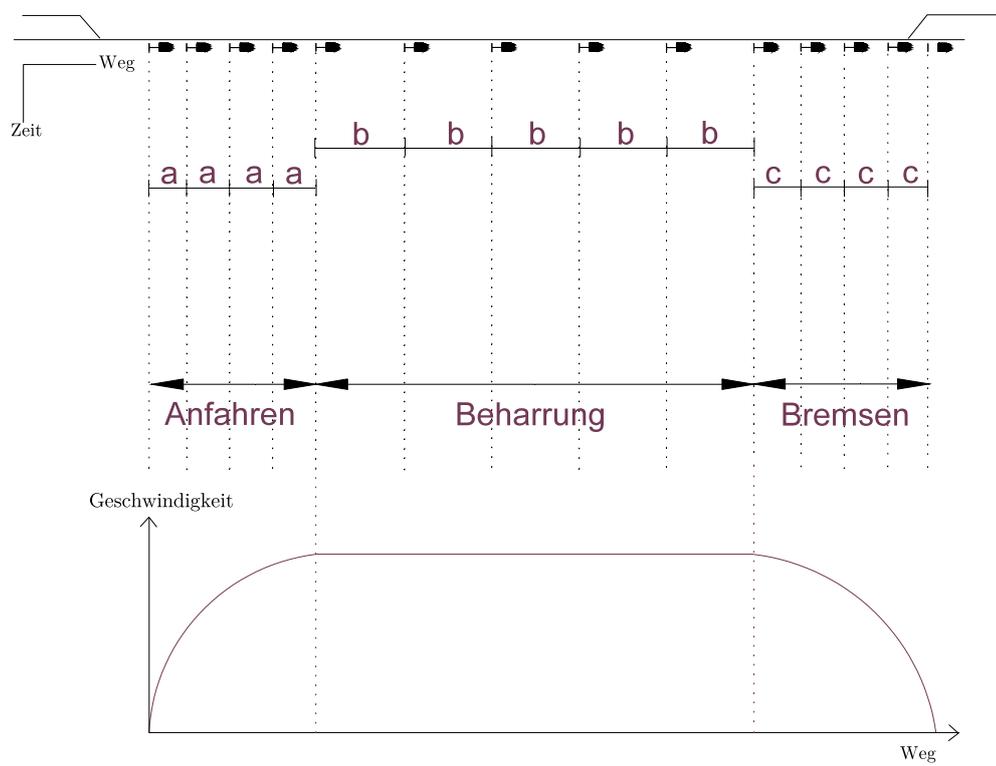


Abbildung 3.3: Blockteilung und Geschwindigkeitsverlauf

3.2.2 Angabe der Parametern

Die Züge Z_L und Z_S befahren den fiktiven eingleisigen Streckenabschnitt zwischen den Punkten A und B, die 16.7 km von einander entfernt liegen.

Der erste Zug (*train 1*) ist der langsame Zug Z_L , seine Höchstgeschwindigkeit beträgt 120 km/h. Der zweite Zug (*train 2*) ist der schnellere Zug Z_S , seine Höchstgeschwindigkeit beträgt 160 km/h.

Es wird zum Beispiel angegeben:

```
v_start_1 = 0      # v_start train 1
v_end_1 = 120/3.6  # v_end train 1 (m/s)
acc_1 = 0.3       # acceleration of train 1 (m/s^2)
t_off = 500       # when the train is starting to brake (s)
v_diff = 40/3.6   # speed difference between train 1 and train 2 (m/s)

block_a = 3       # number of accelereting/decelerating blocks
block_c = 10      # number of cruising blocks
block_l = 17      # total length of the track (km)
```

Die Anfahrbeschleunigung beträgt hierbei 0,3 m/s². Die Bremsphase des ersten Zuges fängt nach 500 s an. Den Bremsensatzpunkt wurde, wie im Abschnitt 3.1.1 beschrieben, ermittelt.

3.2.3 Ablauf der Simulation

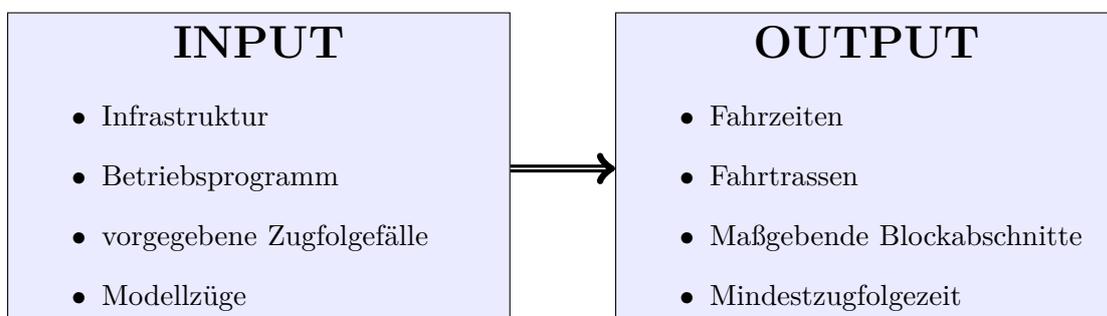


Abbildung 3.4: Input - Output

Die Anzahl der Iterationen sollten zu Beginn des Projektes klar definiert sein. Die Simulation läuft unter Beachtung der unterschiedlichen Zugfolgen wie folgt:

1. Alle Zugfolgen werden betrachtet.
2. Bestimmung der minimalen Fahrzeit für jeden Zug von Hauptsignal zu Hauptsignal. Die Berechnung der Belegungszeiten erfolgt an jedem Hauptsignal.
3. Die berechneten Belegungszeiten ermöglichen die Darstellung des zeitlichen Verlaufes jeder Zugfahrt in einem Weg-Zeit-Diagramm.
4. Jeder Blockabschnitt wird durch die Zugfahrten für einen bestimmten Zeitraum gesperrt. Die Sperrzeiten werden für jeden Blockabschnitt ermittelt.
5. Dieser Zeitraum wird graphisch als Sperrzeitkasten dargestellt. Die Sperrzeitstreppe ergibt sich aus der Reihung der Sperrzeitkästen.
6. Die Sperrzeitstreppe beider Züge werden aneinandergeschoben, so dass sich die minimale Zugfolgezeit am Punkt A am Anfang des Streckenabschnittes ablesen lässt. Die Pufferzeit wird hierbei nicht berücksichtigt.
7. Diese Aneinanderschiebung erfolgt mit Hilfe der Methode aus dem vorherigen Abschnitt 3.1.2.2 und liefert die Sperrzeitüberschneidungen.
8. Der größte Wert der Sperrzeitüberschneidung liefert den maßgebenden Blockabschnitt sowie die Mindestzugfolgezeit.
9. Der maßgebende Blockabschnitt und die Mindestzugfolgezeit werden somit für jeden Zugfolgefall ermittelt.

Die Abbildung 3.5 zeigt den Ablaufprozess zur Ermittlung des maßgebenden Blockabschnittes für jeden Zugfolgefall.

3.3 Ergebnisse des Simulationsbeispiels

3.3.0.1 Simulationsbeispiel

Ein Ergebnisbeispiel wird erläutert. Die vorher beschriebenen Parameter wurden angenommen. Die Teilstrecke wurde bei der Beharrungsphase in **neun** gleiche Abschnitte von bestimmter Länge aufgeteilt. Beim Anfahren und Bremsen wurden jeweils **drei** Abschnitte angegeben.

Die Zeit-Weg-Linien wurden für jeden Zugfolgefall dargestellt. Die Mindestzugfolgezeiten wurden ebenfalls ermittelt. Ein Durchlauf des Programms mit diesen Parametern ergibt die Darstellung 3.6 sowie die folgenden Daten.

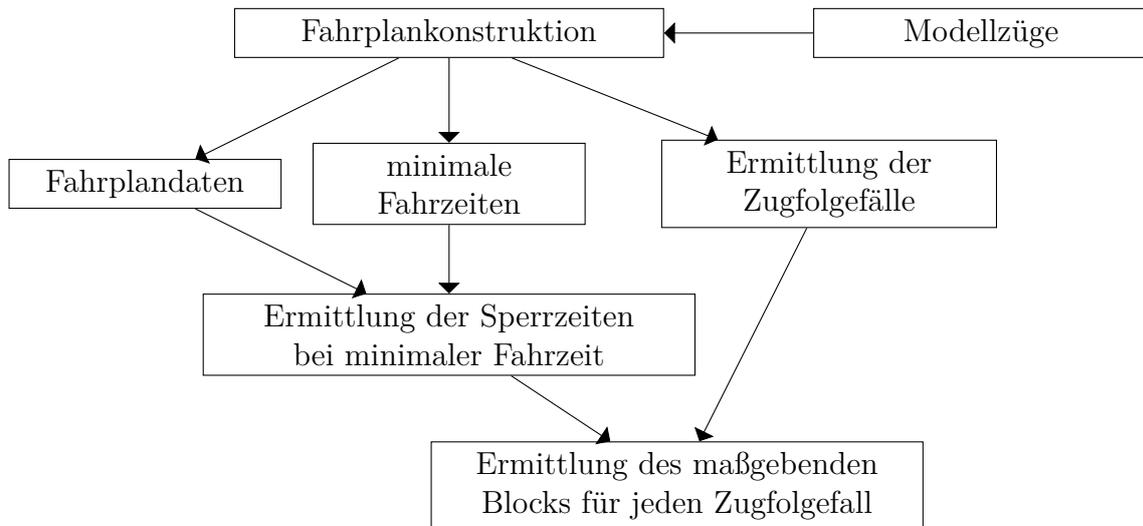


Abbildung 3.5: Ablaufprozess zur Ermittlung des Maßgebenden Blockabschnittes

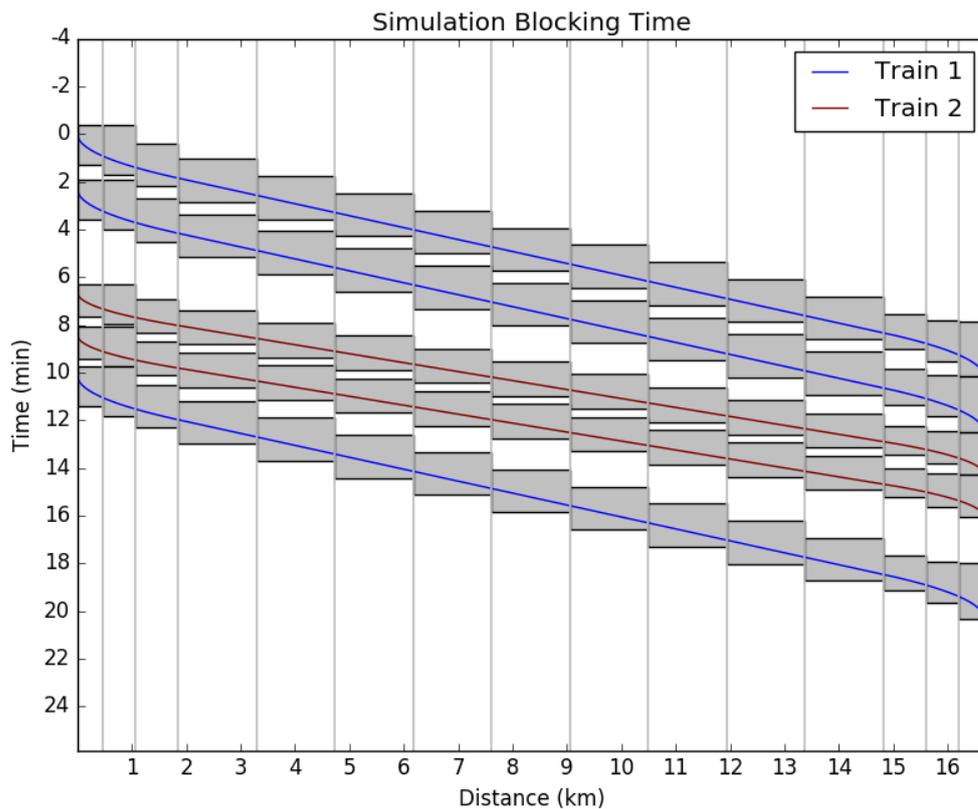


Abbildung 3.6: Darstellung aus der Simulation

```

=====
Length of the track : 16.7 kilometers
=====
Number of blocks : 15
=====
Average length of the blocks : 1.1 kilometer
=====
Determinant block for the second departure : 15 th block
=====
Determinant block for the third departure : 15 th block
=====
Determinant block for the fourth departure : 15 th block
=====
Determinant block for the fifth departure : 2 th block
=====
Last arrival after : 1213 seconds
=====
MLH11 : 139 seconds
=====
MLH21 : 102 seconds
=====
MLH12 : 260 seconds
=====
MLH22 : 107 seconds
=====

```

Ergebnis der Simulation

3.3.1 Aufteilung der Blockabschnitte als Einflussparameter

Mit Hilfe der Simulation lässt sich die Wirkung der Blockteilung überprüfen. Die maßgebenden Blockabschnitte wurden durch die exakte Betrachtung der Sperrzeiten und der Mindestzugfolgezeit bestimmt. Daraus ergibt sich die optimale Blockteilung.

3.3.1.1 Blockabschnittszahl als Einflussparameter

Es werden zehn verschiedene Blockteilungen simuliert. Die Strecke ist beim Anfahren und Bremsen in jeweils drei Abschnitte aufgeteilt. Bei der Beharrungsphase sind verschiedene Blockteilungen simuliert (1 bis 10 Blockabschnitte). Daraus ergibt sich die Abbildung 3.7.

Die ermittelte Mindestzugfolgezeit lässt sich durch eine Verkürzung der Blockabschnitte verringern. Das bedeutet zum Beispiel, dass mit einer gesamten Blockanzahl von 8 der zweite und schnelle Zug frühestens 326 Sekunden (5 min 26 s) nach Anfahrt des

ersten und langsamen Zuges folgen kann. Die Pufferzeit ist hierbei nicht berücksichtigt. Mit einer Blockanzahl von 11, kann dieser zweite Zug schon nach 260 Sekunden (4 min 20 s) anfahren.

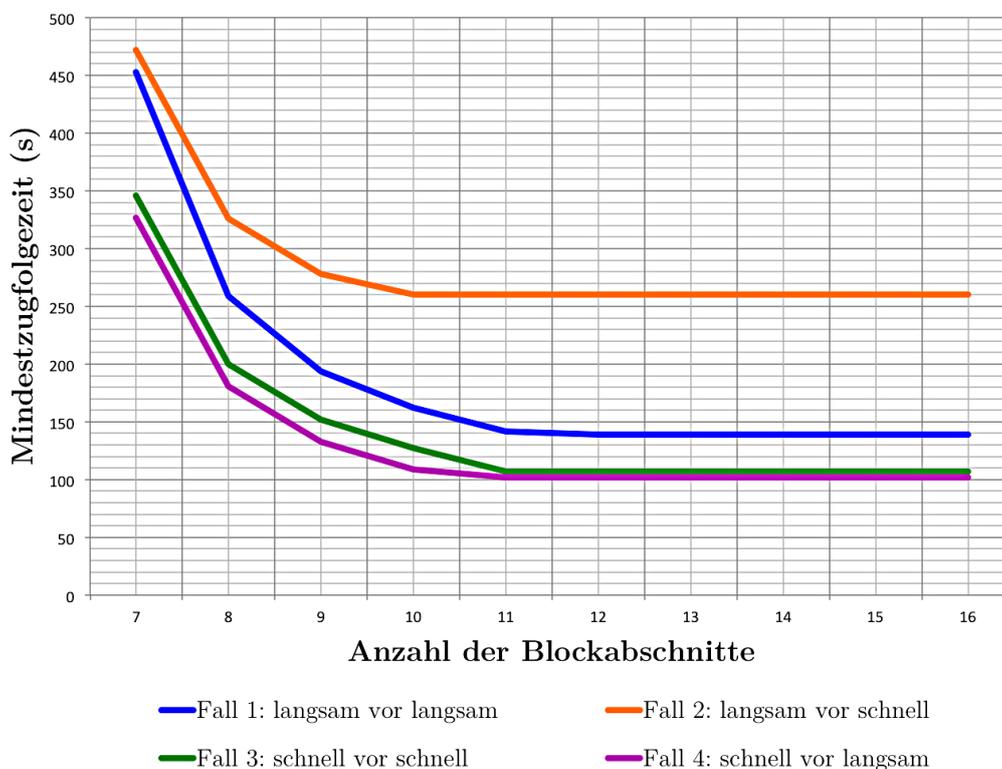


Abbildung 3.7: Mindestzugfolgezeit als Funktion der Anzahl der Blockabschnitte

3.3.1.2 Verkürzung der Blockabschnittslängen

Eine Verkürzung der Blockabschnittslängen führt zu einer Verringerung der Mindestzugfolgezeit. Nun entspricht die praktische Kapazität: (vgl. Abschnitt 1.3.3)

$$K_{pr} = \frac{T_U}{\bar{t}_{Zf,min} + t_P} \quad (3.1)$$

mit

K_{pr}	praktische Kapazität
T_U	Untersuchungszeitraum
$\bar{t}_{Zf,min}$	mittlere Mindestzugfolgezeit
t_P	Pufferzeit

Die Kapazität lässt sich nach zehn Simulationen folgendermaßen ermitteln.

- Der Untersuchungszeitraum T_U beträgt 25 min.
- Im Untersuchungszeitraum T_U fahren zwei schnelle Züge und drei langsame Züge auf der Strecke.
- Die Strecke wurde beim Anfahren und Bremsen in jeweils drei Abschnitte aufgeteilt. Diese Blockteilungen sind festgelegt.
- Zwischen dem Anfahren und dem Bremsen wurden verschiedene Blockteilungen simuliert (1 bis 10 Blockabschnitte)
- Die Pufferzeit beträgt 1 min.

Die mittlere Mindestzugfolgezeit lässt sich mit Hilfe der relativen Häufigkeit bestimmen. Die Gleichung (1.13) liefert die relative Häufigkeit der vier Zugfolgefälle:

$$h_{LL} = \frac{z_l \cdot z_l}{z^2} = \frac{3 \cdot 3}{(3 + 2)^2} = \frac{9}{25} \quad (3.2)$$

$$h_{LS} = \frac{z_l \cdot z_s}{z^2} = \frac{3 \cdot 2}{(3 + 2)^2} = \frac{6}{25} \quad (3.3)$$

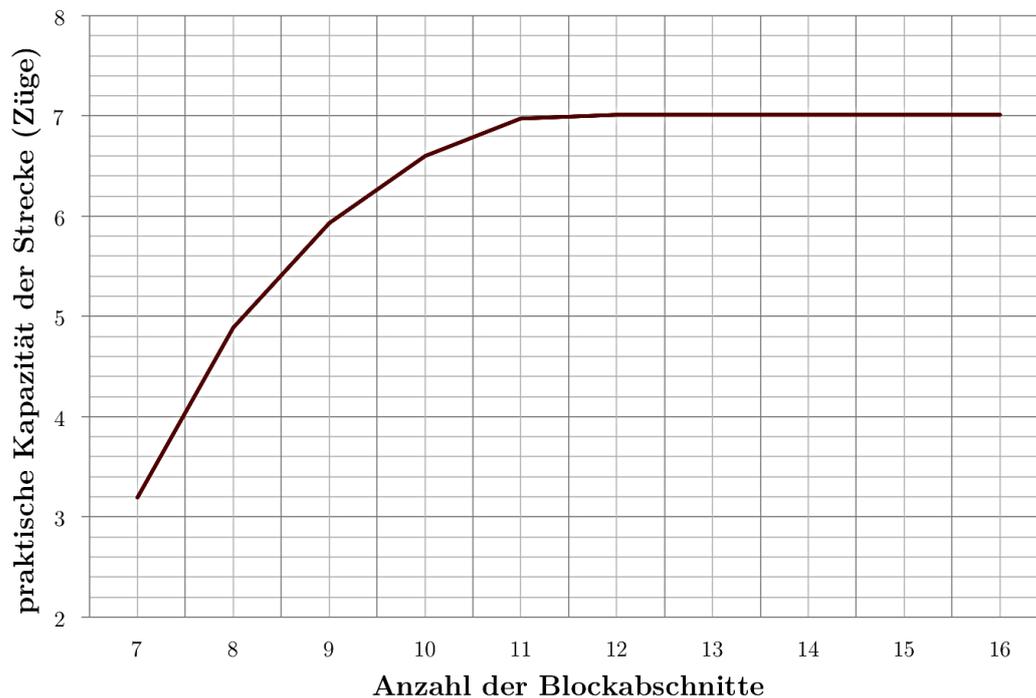
$$h_{SS} = \frac{z_s \cdot z_s}{z^2} = \frac{2 \cdot 2}{(3 + 2)^2} = \frac{4}{25} \quad (3.4)$$

$$h_{SL} = \frac{z_s \cdot z_l}{z^2} = \frac{2 \cdot 3}{(3 + 2)^2} = \frac{6}{25} \quad (3.5)$$

Dann ergibt sich die mittlere Mindestzugfolgezeit für jede untersuchte Blockteilung (Gleichung (1.12)). Daraus erfolgt die Ermittlung der Kapazität. Die zehn ermittelten Kapazitäten sind in Abbildung 3.8 dargestellt. Die Kapazität wird daher umso größer, je kürzer die Blockabschnitte sind. Der Kapazitätsgewinn ist jedoch umso geringer, je dichter die Blockteilung bereit ist.

Außerdem bleibt die Kapazität ab einem bestimmten Punkt (Blockabschnittszahl=12) konstant. Die maßgebenden Blockabschnitte befinden sich vor diesem Punkt in der Mitte der Strecke. Nach diesem Punkt befinden sie sich am Anfang oder am Ende der Strecke, wo die Blockabschnittszahl drei beträgt. Die optimale Blockteilung ist daher in diesem Fall: 3 Blöcke - 6 Blöcke - 3 Blöcke.

3.3.1.2.1 Steigerung der Leistungsfähigkeit Das Leistungsverhalten beschreibt den Zusammenhang zwischen Belastung und Qualität. Wie in Abschnitt 1.2.1 beschrieben, bezeichnet die Leistungsfähigkeit die Anzahl der Züge, die in einem betrachteten Zeitraum unter bestimmten Qualitätsbedingungen auf einer Strecke verkehren können. Sie wird in Beförderungselemente je Zeiteinheit (Züge/h) angegeben.

Abbildung 3.8: Kapazität = $f(\text{Blockabschnittszahl})$

Die maximale Leistungsfähigkeit gibt die absolute Obergrenze für die Belastung des Systems an.

Kürzere Blockabschnitte ermöglichen dichtere Zugfolgen und somit höhere Kapazitäten. Die Züge können somit schneller einander folgen. Eine steigende zeitliche Ausnutzung der einzelnen Blöcke bedingt aber eine höhere Empfindlichkeit, und der Leistungsgewinn wird daher nicht signifikant.

3.3.1.2.2 Bewertung der Methode Es stellt sich die Frage, ob die Verkürzung der Blockabschnittslänge eine effiziente Methode zur Leistungssteigerung ist. Aus der Darstellung 3.6 ergibt sich, dass die Mindestzugfolgezeit geringer wird, wenn:

- ein langsamer Zug einem schnelleren Zug folgt
- gleichschnelle Züge einander folgen

Die maßgebenden Blockabschnitte befinden sich oft am Anfang oder am Ende der Strecke, wo sich die Züge näher zueinander befinden. Die Simulation zeigt, dass die Mindestzugfolgezeit mehr von dem Geschwindigkeitsunterschied des schnelleren zu dem langsamer fahrenden Zug als von den Sperrzeiten der Blockabschnitte abhängt.

3.3.2 Weitere Maßnahmen zur Steigerung der Leistungsfähigkeit

Im Rahmen der Simulation haben sich andere Parameter als Faktoren zur Leistungsfähigkeit ergeben. Die Maßnahmen, die neben der optimierten Blockteilung zur Steigerung der Leistungsfähigkeit von Strecken durchgeführt werden können, sind:

- Erhöhung der Fahrgeschwindigkeiten: Die Leistungsfähigkeit wird mit einer ansteigenden Geschwindigkeit größer. Oberhalb einer kritischen Geschwindigkeit fällt aber die Leistungsfähigkeit ab, weil die Bremswege und damit die notwendigen Abstände zwischen dem Vorsignal und dem Hauptsignal mit dem Quadrat der Geschwindigkeit zunehmen. Wenn die Höchstgeschwindigkeit größer als 160km/h ist, wird aber ein anderes Signalsystem erforderlich. (Fiedler, 2005)
- Einsatz leistungsfähigerer Triebfahrzeuge
- Verkürzung der Zuglängen

Somit kann die Kapazität einer Eisenbahninfrastruktur intensiver genutzt werden.

Kapitel 4

Fazit

Die Aufgabenstellung war, wie die durch Variation der Blockabschnittslänge optimierte Struktur einer Strecke dazu beitragen kann, die Streckenutzungseffizienz zu erhöhen und damit die Leistungsfähigkeit zu vergrößern. Die in Kapitel 1 formulierten Hypothesen waren:

1. Eine Verkürzung der Blockabschnittslänge bedingt eine erhöhte Streckenutzungseffizienz
2. Aus einer erhöhten Streckenutzungseffizienz ergibt sich eine erhöhte Leistungsfähigkeit
3. Die Leistungsfähigkeit lässt sich als Funktion der Blockabschnittslänge darstellen

Eine Methode zur Ermittlung der Kapazität einer Eisenbahninfrastruktur wurde erläutert und darüber hinaus wurden die wesentlichen Kapazitätsfaktoren bestimmt. Eine experimentelle Bestimmung des Leistungsgewinns einer Verkürzung der Blockabschnittslänge wurde durchgeführt. Dadurch lassen sich die drei Hypothesen überprüfen.

Es wurde aufgezeigt, dass die Blockabschnittslänge einen Einfluss auf die zeitliche Belastung der Strecke durch Sperrzeiten hat. Es wurde dargestellt, dass eine neue Blockteilung, die aus mehr Blockabschnitten besteht, eine Verkürzung der Sperrzeit der einzelnen Blockabschnitten ermöglicht. Daraus folgt eine Minimierung der verbleibenden nutzbaren Zeitlücken. Eine Verkürzung der Blockabschnittslänge bedingt somit eine erhöhte zeitliche Belastung der Strecke und daher eine erhöhte Streckenutzungseffizienz. Die erste Forschungshypothese wurde überprüft.

Das Leistungsverhalten beschreibt den Zusammenhang zwischen Belastung und Qualität. Das Ergebnis der Simulation und der damit dargestellte Zusammenhang zwischen der Verkürzung der Blockabschnittslänge und der Mindestzugfolgezeit zeigen, dass aus einer Verkürzung der Blockabschnittslänge eine Verkürzung der Mindestzugfolgezeit

erfolgt. Die zweite Hypothese lässt sich dadurch und mit Hilfe der ersten Hypothese überprüfen.

Die Streckenleistungsfähigkeit kann somit als Funktion der Blockabschnittslänge charakterisiert werden. Die dritte Hypothese wurde verifiziert.

Dann wurde der effektive Leistungsgewinn evaluiert. Das Ergebnis zeigt, dass die Struktur einer Strecke optimiert werden kann, um ein verbessertes Leistungsverhalten erreichen zu können. Die Verkürzung der Blockabschnittslänge kann jedoch nicht als sehr effiziente Methode zur Leistungssteigerung beschrieben werden. Andere Parameter, wie die Geschwindigkeitsschere oder der technische Zustand der Züge, haben einen viel größeren Einfluss auf die Leistungsfähigkeit.

Anhänge

Anhang A

Objekt: Train

```
__author__ = "Angele Vial"  
__copyright__ = "Copyright 2016, Angele Vial"  
__credits__ = []  
__license__ = "ISC"
```

```
class TrainTyp:
```

```
    """  
        characteristics of the train  
    """
```

```
    def __init__(self, speed_start, speed_cruise,  
                 acceleration, braking_time):  
        self.speed_start = speed_start  
        self.speed_cruise = speed_cruise  
        self.acceleration = acceleration  
        self.braking_time = braking_time
```

```
    def second_train(self, speed_difference):  
        speed_sec_train = self.speed_cruise + speed_difference  
        acceleration_sec_train = self.acceleration  
            * (speed_sec_train/self.speed_cruise)**2  
        braking_second_train = speed_sec_train/acceleration_sec_train  
            + (self.speed_cruise/speed_sec_train)  
            *(self.braking_time -  
              self.speed_cruise/self.acceleration)  
        self.speed_cruise = speed_sec_train  
        self.acceleration = acceleration_sec_train
```

```
self.braking_time = braking_second_train
```

Anhang B

Objekt: Route

```
from __future__ import division
import numpy as np

__author__ = "Angele Vial"
__copyright__ = "Copyright 2016, Angele Vial"
__credits__ = [""]
__license__ = "ISC"

class RouteTyp:
    """
        calculate the route of the train according to
        the given speed and acceleration
    """

    def __init__(self, speed_start, speed_cruise, acceleration,
                 braking_time):
        self.v_start = speed_start
        self.v_end = speed_cruise
        self.a = acceleration
        self.t_off = braking_time

    def acc(self, A):
        t_1 = (self.v_end - self.v_start)/self.a
        self.t_acc = np.linspace(0, t_1, A)
        x_acc = self.a/2 * self.t_acc**2 + self.v_start*self.t_acc
        return np.array([x_acc, self.t_acc])

    def cr(self, B):
```

```
t_1 = (self.v_end - self.v_start)/self.a
self.t_cr = np.linspace(t_1, self.t_off, B)
self.x_cr = self.v_end * (self.t_cr-t_1) + self.a/2 * t_1**2
           + self.v_start*t_1
return np.array([self.x_cr, self.t_cr])

def brak(self, C):
    t_1 = (self.v_end - self.v_start)/self.a
    self.t_brak = np.linspace(self.t_off, self.t_off
                              + (self.v_start-self.v_end)/(-self.a), C)
    self.x_brak = self.a/2 * (t_1**2 - (self.t_brak-self.t_off)**2)
                  + self.v_end*(self.t_brak-t_1) + self.v_start*t_1
    return np.array([self.x_brak, self.t_brak])

def route(self, A, B, C):
    self.s = np.concatenate((self.acc(A), self.cr(B),
                             self.brak(C)), axis=1)
    return self.s
```

Anhang C

Objekt: Track

```
from __future__ import division
import numpy as np

__author__ = "Angele Vial"
__copyright__ = "Copyright 2016, Angele Vial"
__credits__ = [""]
__license__ = "ISC"

# PARAMETERS
# length : length of the track, kilometers
# block_acc : numbers of blocks for the acceleration phase
# block_dec : numbers of blocks for the deceleration phase
# block_cr : numbers of blocks for the cruising phase

# rajouter un doc string plus clair!

class TrackTyp:
    """
    distribution of the blocks according to the given parameters
    """

    def __init__(self, length, block_acc, block_cr):
        self.length = length
        self.block_number = block_acc * 2 + block_cr - 1
        self.block_length = self.length / self.block_number

    def distri(self, block_acc, block_cr):
        self.B1 = np.array([[0, 100, np rint(100/(block_acc+1))],
```

```
block_acc]])  
self.B2 = np.array([[100, 100+(block_cr-1), 1, block_cr]])  
self.B3 = np.array([[100+(block_cr-1), 100+block_cr+100,  
                    np rint(100/(block_acc+1)), block_acc]])  
return np.concatenate((self.B1, self.B2, self.B3), axis=0)
```

Anhang D

Python-Code: Simulation

```
from __future__ import division
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.patches import Rectangle
from classes_train import TrainTyp
from classes_route import RouteTyp
from classes_track import TrackTyp

__author__ = "Angele Vial"
__copyright__ = "Copyright 2016, Angele Vial"
__credits__ = [""]
__license__ = "ISC"

##### PARAMETERS #####

v_start_1 = 0           # v_start train 1
v_end_1 = 120/3.6      # v_end train 1 (m/s)
acc_1 = 0.3            # acceleration of train 1 (m/s2)
t_off = 500            # when the train is starting to brake (s)
v_diff = 40/3.6        # speed difference between train 1
                        # and train 2 (m/s)

block_a = 3            # number of accelerating/decelerating blocks
block_c = 6            # number of cruising blocks
block_l = 16.7         # total length of the track

#####
```

```

# definition of the trains
# slower train
train1 = TrainTyp(v_start_1, v_end_1, acc_1, t_off)
# faster train
train2 = TrainTyp(v_start_1, v_end_1, acc_1, t_off)
train2.second_train(v_diff)

# definition of the track structure
track1 = TrackTyp(block_1, block_a, block_c+1)
D = track1.distri(block_a, block_c+1)
# D = parameters matrix of the block division

# definition of the route
route1 = RouteTyp(train1.speed_start, train1.speed_cruise,
                  train1.acceleration, train1.braking_time)
route2 = RouteTyp(train2.speed_start, train2.speed_cruise,
                  train2.acceleration, train2.braking_time)

# Calculation of the route building a time distance diagram
slow_route = route1.route(D[0, 1]-D[0, 0],
                          D[1, 1]-D[1, 0]+1,
                          D[2, 1]-D[2, 0]-1)
fast_route = route2.route(D[0, 1]-D[0, 0],
                          D[1, 1]-D[1, 0]+1,
                          D[2, 1]-D[2, 0]-1)

# coordinates of each block section

# acceleration phase
def signal_acc(route):
    X1 = np.array([route[0, D[0, 0]:D[0, 1]:D[0, 2]]])
    X2 = np.array([route[0, D[0, 0]+1:D[0, 1]+1:D[0, 2]]])
    T1 = np.array([route[1, D[0, 0]:D[0, 1]:D[0, 2]]])
    T2 = np.array([route[1, D[0, 0]+1:D[0, 1]+1:D[0, 2]]])
    V = (X1-X2)/(T1-T2)
    return np.concatenate((X1, V, T1))

# cruising phase
def signal_cr(route):

```

```

X1 = np.array([route[0, D[1, 0]:D[1, 1]])
X2 = np.array([route[0, D[1, 0]+1:D[1, 1]+1]])
T1 = np.array([route[1, D[1, 0]:D[1, 1]])
T2 = np.array([route[1, D[1, 0]+1:D[1, 1]+1]])
V = (X1-X2)/(T1-T2)
return np.concatenate((X1, V, T1))

# deceleration phase
def signal_br(route):
    X1 = np.array([route[0, D[2, 0]:D[2, 1]:D[2, 2]])
    X2 = np.array([route[0, D[2, 0]-1:D[2, 1]-1:D[2, 2]])
    T1 = np.array([route[1, D[2, 0]:D[2, 1]:D[2, 2]])
    T2 = np.array([route[1, D[2, 0]-1:D[2, 1]-1:D[2, 2]])
    V = (X1-X2)/(T1-T2)
    return np.concatenate((X1, V, T1))

def signal(route):
    M = np.concatenate((signal_acc(route), signal_cr(route),
                        signal_br(route)), axis=1)
    M_opt = np.delete(M, (1, -1), axis=1)
# extreme values deleted
    return M_opt

# Calculation of the blocking time in the interlocking/station area
# for the accelerating train, first block
def blocking_time_acc(route):
# length of the 1st block
    L_block = signal(route)[0, 1] - signal(route)[0, 0]
# running time 1st block
    t_block = signal(route)[2, 1] - signal(route)[2, 0]
# average speed on the 1st block
    average_speed = L_block / t_block
    end_speed = signal(route)[1, 1]
# time for route formation
    t_route = 12
# signal watching time
    t_watch = 200/end_speed
# approach time (presignalling)
    t_pre = 0

```

```

# time between block signals
t_block = L_block/average_speed
# clearing time (50 m + 100 m train)
t_clear = 150/end_speed
# release time
t_release = 12
M_time_acc = np.array([[signal(route)[2, 0]
- (t_route + t_watch + t_pre)],
                      [signal(route)[2, 0] + t_block
+ t_clear + t_release]])

return M_time_acc

# for the accelerating train, second block
def blocking_time_acc2(route):
# length of the 2nd block
L_block = signal(route)[0, 2] - signal(route)[0, 1]
# running time 2nd block
t_block = signal(route)[2, 2] - signal(route)[2, 1]
# average speed on the 2nd block
average_speed = L_block / t_block
end_speed = signal(route)[1, 2]
# time for route formation
t_route = 12
# signal watching time
t_watch = 200/end_speed
# approach time (presignalling)
t_pre = 1000/signal(route)[1, 1]
# time between block signals
t_block = L_block/average_speed
# clearing time 50m + 100m train
t_clear = 150/end_speed
# release time
t_release = 12
M_time_acc2 = np.array([[signal(route)[2, 1]
- (t_route + t_watch + t_pre)],
                      [signal(route)[2, 1] + t_block
+ t_clear + t_release]])

return M_time_acc2

# for all the other blocks
def blocking_time(route):
M_time = np.concatenate((blocking_time_acc(route),

```

```

blocking_time_acc2(route)), axis=1)
for k in range(2, signal(route).shape[1]-2):
    L_block = signal(route)[0, k+1] - signal(route)[0, k]
    # time for route formation
    t_route = 12
    # signal watching time
    t_watch = 200/signal(route)[1, k]
    # approach time (presignalling)
    t_pre = 1000/signal(route)[1, k]
    # time between block signals
    t_block = L_block/signal(route)[1, k]
    # clearing time 50m + 100m train
    t_clear = 150/signal(route)[1, k+1]
    # release time
    t_release = 12
    Matr = np.array([[signal(route)[2, k]
- (t_route + t_watch + t_pre)],
                    [signal(route)[2, k] + t_block
+ t_clear + t_release]])
    M_time = np.concatenate((M_time, Matr), axis=1)
return M_time

```

Calculation of the Blocking Time Overlap for each block section

```

def blocking_time_overlap(route_1, route_2):
    BT1 = blocking_time(route_1)
    BT2 = blocking_time(route_2)
    SIGN1 = signal(route_1)
    SIGN2 = signal(route_2)
    M = blocking_time(route_1).shape[1]
    Mt_overlap = np.array([[0], [0], [0], [0], [0]])
    for m in range(0, M):
        Mt = np.array([
            [BT1[1, m] - BT1[0, m]],
# Combination 1 then 1
            [BT1[1, m] - BT2[0, m]],
# Combination 1 then 2
            [BT2[1, m] - BT1[0, m]],
# Combination 2 then 1
            [BT2[1, m] - BT2[0, m]],
# Combination 2 then 2
            [m+1]])
    # number of the corresponding block

```

```

    Mt_overlap = np.concatenate((Mt_overlap, Mt), axis=1)
    Mt_overlap2 = np.delete(Mt_overlap, -1, axis=1)
    Mt_overlap3 = np.array([
        [SIGN1[2, -1] - BT1[0, -1]],
# values for the last block
        [SIGN1[2, -1] - BT2[0, -1]],
        [SIGN2[2, -1] - BT1[0, -1]],
        [SIGN2[2, -1] - BT2[0, -1]], [BT1.shape[1]]])
    M_overlap = np.concatenate((Mt_overlap2, Mt_overlap3), axis=1)
    return M_overlap

# Searching the maximum value in the previous matrix, for each line
def blocking_time_overlap_max(route_1, route_2):
    return np.amax(blocking_time_overlap(route_1, route_2), axis=1)
# note: in case of multiple occurrences of the maximum values,
# the indices corresponding to the first occurrence are returned

# Searching the blocks corresponding to the previous values
def determinant_block(route_1, route_2):
    return np.argmax(blocking_time_overlap(route_1, route_2), axis=1)

fig = plt.figure()

# to add the speed of the trains to the diagramm:
# ax1 = fig.add_subplot(111)
# p_speed1 = ax1.plot(signal(slow_route)[0],
#                     signal(slow_route)[1], '--b')
# p_speed2 = ax1.plot(signal(fast_route)[0],
#                     signal(fast_route)[1], '--c')
# plt.ylim((0,150))
# plt.xlabel('Distance (m)')
# plt.ylabel('Speed (m/s)')
# plt.legend(loc='upper right')
#ax2 = ax1.twinx()

ax2 = fig.add_subplot(111)

# Minimim Line Headway (MLH) for all combinations

```

```

# Train 1 then Train 1
MLH11 = blocking_time_overlap_max(slow_route, fast_route)[0]
# Train 1 then Train 2
MLH12 = blocking_time_overlap_max(slow_route, fast_route)[1]
# Train 2 then Train 1
MLH21 = blocking_time_overlap_max(slow_route, fast_route)[2]
# Train 2 then Train 2
MLH22 = blocking_time_overlap_max(slow_route, fast_route)[3]

# Plotting the route of the trains
p_train1 = ax2.plot(slow_route[0], slow_route[1], 'b',
label='Train 1')
p_train11 = ax2.plot(slow_route[0], MLH11 + slow_route[1], 'b')
p_train12 = ax2.plot(fast_route[0], MLH11 + MLH12 + fast_route[1],
                    'maroon', label='Train 2')
p_train22 = ax2.plot(fast_route[0], MLH11 + MLH12 + MLH22
+ fast_route[1], 'maroon')
p_train21 = ax2.plot(slow_route[0], MLH11 + MLH12 + MLH22
+ MLH21 + slow_route[1], 'b')

# Calculation for plotting the blocking time strairway
# for each block section
def min_line_headway_rectangle(route_1, route_2):
    BTT1 = blocking_time(route_1)
    SIGN1 = signal(route_1)
    BTT2 = blocking_time(route_2)
    SIGN2 = signal(route_2)
    M1 = np.array([[0], [0]])
    L1 = np.array([[0], [0]])
    M2 = np.array([[0], [0]])
    L2 = np.array([[0], [0]])
    M3 = np.array([[0], [0]])
    L3 = np.array([[0], [0]])
    M4 = np.array([[0], [0]])
    L4 = np.array([[0], [0]])
    M5 = np.array([[0], [0]])
    L5 = np.array([[0], [0]])

    # first train
    for n in range(0, signal(route_1).shape[1]-2):
        X = SIGN1[0, n]

```

```

Y = BTT1[0, n]
if n < signal(route_1).shape[1]-3:
    Width = SIGN1[0, n+1] - SIGN1[0, n]
    Height = BTT1[1, n] - BTT1[0, n]
else:
    Width = SIGN1[0, -1] - SIGN1[0, -3]
    Height = SIGN1[2, -1] - BTT1[0, -1]
currentAxis = plt.gca()
currentAxis.add_patch(Rectangle((X, Y), Width, Height,
                                alpha=1, facecolor='silver'))
M1 = np.concatenate((M1, np.array([[X], [Y]])), axis=1)
L1 = np.concatenate((L1, np.array([[X + Width],
[Y + Height]])), axis=1)

# second train
for n in range(0, signal(route_1).shape[1]-2):
X = SIGN1[0, n]
Y = BTT1[0, n] + MLH11
if n < signal(route_1).shape[1]-3:
    Width = SIGN1[0, n+1] - SIGN1[0, n]
    Height = BTT1[1, n] - BTT1[0, n]
else:
    Width = SIGN1[0, -1] - SIGN1[0, -3]
    Height = SIGN1[2, -1] - BTT1[0, -1]
currentAxis = plt.gca()
currentAxis.add_patch(Rectangle((X, Y), Width, Height,
                                alpha=1, facecolor='silver'))
M2 = np.concatenate((M2, np.array([[X], [Y]])), axis=1)
L2 = np.concatenate((L2, np.array([[X + Width],
[Y + Height]])), axis=1)

# third train
for n in range(0, SIGN2.shape[1]-2):
X2 = SIGN2[0, n]
Y2 = BTT2[0, n] + MLH11 + MLH12
if n < SIGN2.shape[1]-3:
    Width2 = SIGN2[0, n+1] - SIGN2[0, n]
    Height2 = BTT2[1, n] - BTT2[0, n]
else:
    Width2 = SIGN2[0, -1] - SIGN2[0, -3]
    Height2 = SIGN2[2, -1] - BTT2[0, -1]
currentAxis = plt.gca()
currentAxis.add_patch(Rectangle((X2, Y2), Width2, Height2,

```

```

                                alpha=1, facecolor='silver'))
M3 = np.concatenate((M3, np.array([[X2], [Y2]])), axis=1)
L3 = np.concatenate((L3, np.array([[X2 + Width2],
[Y2 + Height2]])), axis=1)

# fourth train
for n in range(0, SIGN2.shape[1]-2):
    X2 = SIGN2[0, n]
    Y2 = BTT2[0, n] + MLH11 + MLH12 + MLH22
    if n < SIGN2.shape[1]-3:
        Width2 = SIGN2[0, n+1] - SIGN2[0, n]
        Height2 = BTT2[1, n] - BTT2[0, n]
    else:
        Width2 = SIGN2[0, -1] - SIGN2[0, -3]
        Height2 = SIGN2[2, -1] - BTT2[0, -1]
    currentAxis = plt.gca()
    currentAxis.add_patch(Rectangle((X2, Y2), Width2, Height2,
                                alpha=1, facecolor='silver'))
    M4 = np.concatenate((M4, np.array([[X2], [Y2]])), axis=1)
    L4 = np.concatenate((L4, np.array([[X2 + Width2],
[Y2 + Height2]])), axis=1)

# fifth train
for n in range(0, signal(route_1).shape[1]-2):
    X = SIGN1[0, n]
    Y = BTT1[0, n] + MLH11 + MLH12 + MLH22 + MLH21
    if n < signal(route_1).shape[1]-3:
        Width = SIGN1[0, n+1] - SIGN1[0, n]
        Height = BTT1[1, n] - BTT1[0, n]
    else:
        Width = SIGN1[0, -1] - SIGN1[0, -3]
        Height = SIGN1[2, -1] - BTT1[0, -1]
    currentAxis = plt.gca()
    currentAxis.add_patch(Rectangle((X, Y), Width, Height,
                                alpha=1, facecolor='silver'))
    M5 = np.concatenate((M5, np.array([[X], [Y]])), axis=1)
    L5 = np.concatenate((L5, np.array([[X + Width],
[Y + Height]])), axis=1)

# extrem values deleted
MM1 = np.delete(M1, (0), axis=1)
LL1 = np.delete(L1, (0), axis=1)
MM2 = np.delete(M2, (0), axis=1)

```

```

LL2 = np.delete(L2, (0), axis=1)
MM3 = np.delete(M3, (0), axis=1)
LL3 = np.delete(L3, (0), axis=1)
MM4 = np.delete(M4, (0), axis=1)
LL4 = np.delete(L4, (0), axis=1)
MM5 = np.delete(M5, (0), axis=1)
LL5 = np.delete(L5, (0), axis=1)

Mf = np.concatenate((MM1, LL1, MM2, LL2, MM3, LL3, MM4,
LL4, MM5, LL5), axis=0)
return Mf

# to plot only the blocking time stairway:
min_line_headway_rectangle(slow_route, fast_route)

# to plot the blocking time stairway and the train paths:
# TRR = min_line_headway_rectangle(slow_route, fast_route)
# for k in range (0, 19, 2):
#     ax2.plot(TRR[k], TRR[k+1], color='0.4', linewidth=1)

# calculating the last arrival time
def last_arrival(route_1):
    BTT1 = blocking_time(route_1)
    n = signal(route_1).shape[1]-3
    Y = BTT1[0, n] + MLH11 + MLH12 + MLH22 + MLH21
    Height = BTT1[1, n] - BTT1[0, n]
    return Y + Height

plt.ylim((-200, 1550))
plt.xlim((0, 16700))
# changing scale, km
plt.xticks([1000*i for i in range(1, 17)],
           [i for i in range(1, 17)])
# changing scale, min
plt.yticks([60*i for i in range(-4, 26, 2)],
           [i for i in range(-4, 26, 2)])
plt.xlabel('Distance (km)')
plt.ylabel('Time (min)')
plt.legend(loc='upper right')
plt.title('Simulation Blocking Time')
ax = plt.gca()

```

```

ax.invert_yaxis()

# vertical drawing of blocks
for i in range(signal(fast_route).shape[1]-2):
    plt.axvline(x=signal(fast_route)[0, i], linewidth=1.2,
                color='0.75')
plt.show()

DB = determinant_block(slow_route, fast_route)

NB = track1.block_number # Number of blocks
DB2 = DB[0] # Determinant block for combination train 1 then train 1
DB3 = DB[1] # Determinant block for combination train 1 then train 2
DB4 = DB[3] # Determinant block for combination train 2 then train 2
DB5 = DB[2] # Determinant block for combination train 2 then train 1
EB = last_arrival(slow_route)
LT = track1.length
AL = round(LT / NB, 2) # Average length of the blocks

print("=====")
print("Length of the track : ", "%.1f" % (LT), "kilometers")
print("=====")
print("Number of blocks : ", "%.0f" % (NB))
print("=====")
print("Average length of the blocks : ", "%.1f" % (AL), "kilometers")
print("=====")
print("Determinant block for the second departure : ",
      "%.0f" % (DB2), "th block")
print("=====")
print("Determinant block for the third departure : ",
      "%.0f" % (DB3), "th block")
print("=====")
print("Determinant block for the fourth departure : ",
      "%.0f" % (DB4), "th block")
print("=====")
print("Determinant block for the fifth departure : ",
      "%.0f" % (DB5), "th block")
print("=====")
print("Last arrival after : ", "%.0f" % (EB), "seconds")

```

```
print("=====")
print("MLH11 : ", "%.0f" % (MLH11), "seconds")
print("=====")
print("MLH21 : ", "%.0f" % (MLH21), "seconds")
print("=====")
print("MLH12 : ", "%.0f" % (MLH12), "seconds")
print("=====")
print("MLH22 : ", "%.0f" % (MLH22), "seconds")
print("=====")
```

```
# Save the figure to a file .eps
```

```
plt.savefig('simulation_3_6_3.eps', format='eps', dpi=1000)
```

Literaturverzeichnis

- Abril, M., Barber, F., Ingolotti, L., Salido, M., Tormos, P., and Lova, A. (2008). An assessment of railway capacity. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 44(5):774–806.
- Buri, J.-D. (2008). Augmentation de la capacité de lignes ferroviaires par optimisation conjointe de l’infrastructure et du matériel roulant.
- DIN-EN (2000). 50126: Bahnanwendungen - spezifikation und nachweis der zuverlässigkeit, verfügbarkeit, instandhaltbarkeit, sicherheit (rams) – teil 1: Grundlegende anforderungen und genereller prozess. *Berlin: DIN*.
- Fiedler, J. (2005). *Bahnwesen - Planung, Bau und Betrieb von Eisenbahnen, S-, U-, Stadt- und Straßenbahnen*. Wolters Kluwer Deutschland GmbH, München, 5. edition.
- Freystein, H., Muncke, M., and Schollmeier, P. (2015). *Handbuch - Entwerfen von Bahnanlagen*. DVV Media Group GmbH - Eurailpress, 5. edition.
- Hegger, A., Marks-Fährmann, U., and Restetzki, K. (2008). *Grundwissen Bahn*. Europa-Lehrmittel, Haan-Gruiten, 4. edition.
- Heister, G., Kuhnke, J., Lindstedt, C., and Pomp, R. (2006). *Eisenbahnbetriebstechnologie*. Bahn-Fachverlag, Heidelberg - Mainz, 1. edition.
- Hertel, G. (1992). Die maximale verkehrsleistung und die minimale fahrplanempfindlichkeit auf eisenbahnstrecken. *ETR 41*, Heft 10.
- Janicki, J. (2011). *Systemwissen Eisenbahn*. Bahn Fachverlag GmbH, Berlin, 1. edition.
- Janicki, J. (2016). *Systemwissen Eisenbahn*. Bahn Fachverlag GmbH, Berlin, 2. edition.
- Janicki, J., Reinhard, H., and Rüffer, M. (2013). *Schienenfahrzeugtechnik*. Bahn Fachverlag, Berlin, 3. edition.
- Jänsch, E. (2016). *Handbuch - Das System Bahn*. DVV Media Group, Eurailpress, 2. edition.

- Jochim, H. and Lademann, F. (2009). Planung von bahnanlagen. *Grundlagen-Planung-Berechnung Carl Hanser Verlag, München.*
- Kaminsky, R. (2001). *Pufferzeiten in Netzen des spurgeführten Verkehrs in Abhängigkeit von Zugfolge und Infrastruktur.* Hestra-Verlag, Darmstadt.
- Lehmann, H. (2005). *Fahrdynamik der Zugfahrt : Theorie und Anwendung.* Shaker Verlag.
- Liess, O. and Gueye, S. (2008). Problématiques d'ordonnancement ferroviaire.
- Pachl, J. (2013). *Systemtechnik des Schienenverkehrs.* Springer Vieweg, 7. edition.
- Pachl, J. (2015). *Railway Operation and Control.* VTD Rail Publishing, 3. edition.
- Radtke, A. (2006). *EDV-Verfahren zur Modellierung des Eisenbahnbetriebs.* Eurailpress Tetzlaff-Hestra.
- Roberts, D.-W. A. L., Mosená, D. R., and Winter, D. E. (2010). *Gabler Wirtschaftslexikon - I-K - 17. Auflage.* Welt Edition.
- Rotoli, F., Navajas-Cawood, E., and Soria, A. (2016). Capacity assessment of railway infrastructure: Tools, methodologies and policy relevance in the eu context.
- Schiemann, W. (2002). *Schienenverkehrstechnik: Grundlagen der Gleistrassierung.* Springer-Verlag, 1. edition.
- Slatkin, B. (2015). *Effektiv Python programmieren.* MITP-Verlags GmbH Co. KG.
- UIC (2000). *UIC Railway dictionary - English-German-French.* Union Internationale des Chemins de Fer, Paris, 3. edition.
- UIC-Kodex-406 (2004). Kapazität. *Internationaler Eisenbahnverband.*
- UIC-Kodex-406 (2013). Kapazität. *Internationaler Eisenbahnverband.*
- UIC-Kodex-451.1 (2000). In den fahrplänen vorzusehende fahrzeitzuschläge, um die pünktliche betriebsabwicklung zu gewährleisten - fahrzeitzuschläge. *Internationaler Eisenbahnverband.*