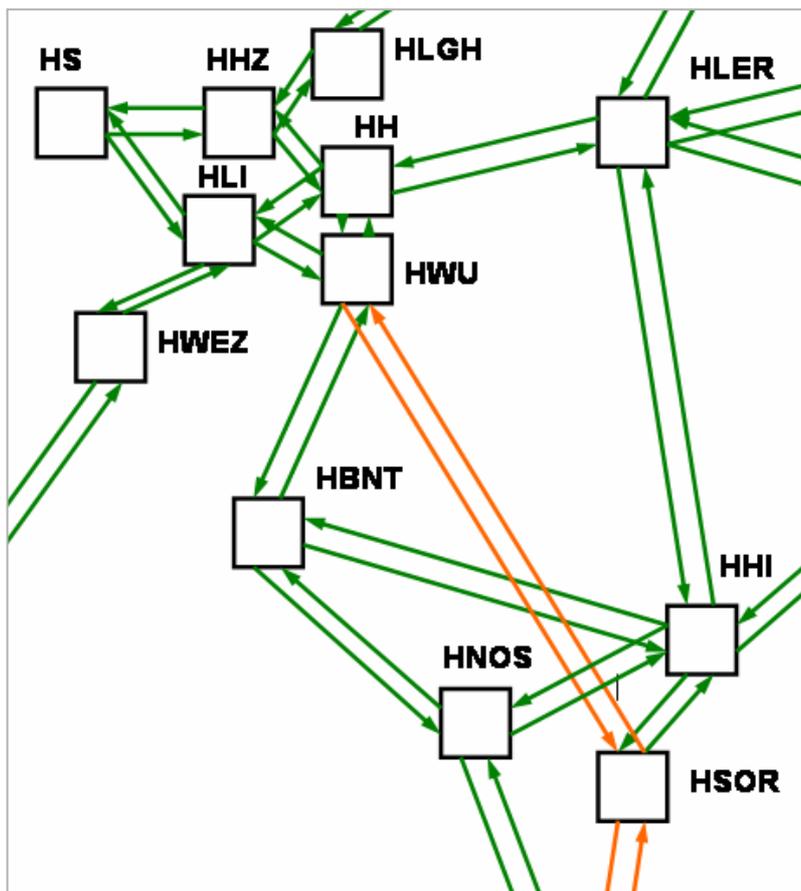


# Möglichkeiten und Grenzen der Modellierung des Bahnbetriebes mit planerischen Zugfolgezeiten



Dipl.-Ing. Sören Wustrow

Technische Universität Berlin

# **Möglichkeiten und Grenzen der Modellierung des Bahnbetriebes mit planerischen Zugfolgezeiten**

Dipl.-Ing. Sören Wustrow

von der Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme der  
Technischen Universität Berlin  
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzende: Prof. Dr.-Ing. Chr. Ahrend

Berichter: Prof. Dr.-Ing. habil. J. Siegmann

Berichter: Prof. Dr.-Ing. Th. Siefer

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 16. Februar 2009

Berlin 2009

D83

## **Danksagung**

Für die Anregung zum Thema und die hilfreichen Diskussionen während der Bearbeitung möchte ich meinem Doktorvater Herrn Professor Dr.-Ing. habil. J. Siegmann danken.

Weiterer Dank gilt Frau Professor Dr.-Ing. Chr. Ahrend sowie Herrn Professor Dr.-Ing. Th. Siefert für ihren Einsatz bei der wissenschaftlichen Aussprache, dem Trassenbörse-Team für die zahlreichen Diskussionen und den Kollegen vom Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb für ihre Hilfe.

Für die Unterstützung und Aufmunterung während der Bearbeitungszeit möchte ich mich auch bei meiner Familie und insbesondere meiner Frau sowie meiner Tochter für die zusätzliche Motivation ganz herzlich bedanken.

## **Kurzfassung**

Sören Wustrow

### **Thema: Möglichkeiten und Grenzen der Modellierung des Bahnbetriebes mit planerischen Zugfolgezeiten**

In Theorie und Praxis der Fahrplannerstellung werden bislang überwiegend simulationsbasierte Planungsmethoden mit gegebenenfalls heuristischen Optimierungsalgorithmen verwendet. Diese Methoden bilden zwar die Infrastruktur und das rollende Material äußerst detailliert ab, können aber aus systematischen Gründen keinen mathematisch optimalen Fahrplan generieren. Der Kerngedanke des Projektes „Trassenbörse“ beruht dagegen auf der simultanen mathematischen Optimierung der Nutzung verfügbarer Fahrplantrassen mit dem Ziel höherer Gesamtnetzauslastung und Fahrplanstabilität.

Da die Komplexität einer mikroskopisch gleisgenauen Datengrundlage die Rechenzeiten unverhältnismäßig hoch ansteigen lassen würde, ist für die mathematische Optimierung eine vergrößerte Abbildung und Darstellung der Netzinfrastruktur und des Betriebes erforderlich. Dafür wurde im Rahmen dieser Arbeit die Modellierung mit planerischen Zugfolgezeiten entwickelt und untersucht.

Die Modellierung des Bahnbetriebes mit planerischen Zugfolgezeiten verwendet gegenüber den gebräuchlichen Verfahren der mikroskopischen Simulation des Bahnbetriebes eine gröbere Darstellung von Infrastruktur, Fahrzeugen und Fahrplan. Diese Vergrößerung ist insbesondere bei unzureichenden Datengrundlagen für eine mikroskopische Simulation (z.B. bei Prognoseuntersuchungen) und bei mangelnder Handhabbarkeit, sowie zu hohem Beschaffungs- und Pflegeaufwand der Datenmengen bei größeren Netzen vorteilhaft.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Anwendungsmöglichkeiten der Modellierung des Bahnbetriebes mit planerischen Zugfolgezeiten, deren Grenzen und die dabei zu beachtenden Randbedingungen aufzuzeigen. Die Arbeit untersucht die erforderlichen Daten sowie deren Einfluss auf die Genauigkeit der Ergebnisse, zeigt die Anwendungsmöglichkeiten dieser Modellierungsmethodik auf und beschreibt deren Grenzen. Außerdem werden eine Bewertung der erzielbaren Untersuchungsergebnisse sowie ein Vergleich mit bestehenden Verfahren durchgeführt.

## **Abstract**

Sören Wustrow

### **Subject: Use and limits of a railway operation model with planned headway times**

In theory and practice of scheduling for railways have been used mostly simulation based methods of planning optionally with heuristic optimisation algorithms so far. These methods model infrastructure and rolling stock very detailed but are not able – for systematic reasons – to generate a mathematically optimal timetable. The basic thought of the project “Trassenbörse” is based on the simultaneous mathematical optimisation of the usage of available timetable routes aiming at higher utilisation of the railway network and timetable stability.

Since the complexity of a microscopic track specific data base would let increase the computing times disproportionate, for mathematical optimisation a coarsened model of railway operation and infrastructure is necessary. Therefore the railway operation model with planned headway times has been developed and examined in this thesis.

The railway operation model with planned headway times uses in comparison to the usual microscopic railway simulation models a simplified model for railway infrastructure, rolling stock and time table. This simplification is advantageous especially with an insufficient data basis for a microscopic simulation (e.g. for a prognosis analysis) and in case of very high data handling efforts for larger networks.

The aims of this thesis are to show the possible uses of the railway operation model with planned headway times as well as its limits and necessary conditions. This thesis analyses the required data as well as their influence on the accuracy of the computed results. Furthermore an evaluation of the achievable results and a comparison with established methods are accomplished.

<b>1</b>	<b>Einführung und Ziele der Arbeit.....</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>Methode der planerischen Zugfolgezeiten.....</b>	<b>12</b>
2.1	<b>Grundlagen .....</b>	<b>12</b>
2.2	<b>Modellierung .....</b>	<b>14</b>
2.2.1	Diskretisierung und Skalierbarkeit .....	14
2.2.2	Strecken .....	16
2.2.3	Bahnhöfe .....	33
2.2.4	Züge und Zugtypen .....	38
2.3	<b>Eingangsdaten und Rahmenbedingungen.....</b>	<b>44</b>
2.3.1	Eingangsdaten .....	44
2.3.2	Rahmenbedingungen .....	47
2.4	<b>Umsetzung der Modellierung in eine Software.....</b>	<b>48</b>
2.4.1	Rechenkern.....	48
2.4.2	Eingabe und Ausgabe (I/O).....	57
2.4.3	Graphische Benutzerschnittstelle (GUI) .....	58
<b>3</b>	<b>Anwendungsmöglichkeiten.....</b>	<b>62</b>
3.1	<b>Trassenmanagement und Fahrplanerstellung.....</b>	<b>62</b>
3.2	<b>Strategische Betriebsuntersuchungen.....</b>	<b>65</b>
3.3	<b>Analytische Kapazitätsbestimmung .....</b>	<b>66</b>
<b>4</b>	<b>Untersuchung der Grenzen .....</b>	<b>67</b>
4.1	<b>Überblick.....</b>	<b>67</b>
4.1.1	Test-Setup.....	68
4.1.2	Test-Übersicht.....	74
4.2	<b>Durchführung und Auswertung der Untersuchungen.....</b>	<b>77</b>
4.2.1	Fahrzeuge .....	77

4.2.2 Strecken .....	83
4.2.3 Bahnhöfe .....	95
4.2.4 Zeitdiskretisierung .....	101
<b>4.3 Bewertung der Untersuchungsergebnisse .....</b>	<b>103</b>
4.3.1 Erforderliche Genauigkeit der Eingangsdaten .....	103
4.3.2 Erzielbare Genauigkeit .....	106
4.3.3 Bewertung und Vergleich .....	110
<b>5 Fazit .....</b>	<b>114</b>
<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>118</b>
<b>Begriffserläuterungen .....</b>	<b>127</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>128</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>129</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>132</b>
<b>Anhang .....</b>	<b>133</b>

# 1 Einführung und Ziele der Arbeit

Der europäische Schienenverkehrsmarkt durchläuft einen grundlegenden Liberalisierungsprozess, der 1991 maßgeblich durch die Veröffentlichung der Richtlinie 91/440/EWG eingeleitet wurde. Seither hat sich in den europäischen Staaten die Situation im Bahnverkehr zwar deutlich unterschiedlich entwickelt, dennoch ist der Weg zu mehr Wettbewerb auf der Schiene unumkehrbar.

Grundlegendes Merkmal der Liberalisierung ist die vertikale Desintegration der ehemaligen Staatsbahnen durch die zumindest rechnerische und organisatorische Trennung der Vorhaltung und des Betriebs der Eisenbahninfrastruktur sowie der Organisation und Durchführung von Zugfahrten durch Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) für den Transport von Personen und Gütern.

Nach Maßgabe der europäischen Gesetzgebung ist jedoch allen nationalen Strukturen gemein, dass zukünftig europäische EVU auf allen öffentlichen Schienennetzen Europas zu festgelegten Bedingungen Zugfahrten durchführen dürfen. Allen EVU ist daher der Zugang zur Schieneninfrastruktur durch ein neutrales Unternehmen, den Infrastrukturbetreiber, zu gewährleisten. Dieser hat üblicherweise die Aufgabe, Fahrpläne zu entwickeln und den EVU u.a. Fahrwegkapazitäten zuzuweisen. Durch die aktuelle Entwicklung zu mehr Zentralisierung der Leit- und Sicherungstechnik mit Disposition und Zuglenkung in den Betriebszentralen ist zusätzlich ein erhöhter Aufwand für die Datenhaltung der Infrastruktur- und Fahrplandaten erforderlich.

Um den sich daraus ergebenden Aufgaben gewachsen zu sein, bedeutet dies im ersten Schritt, dass die europäischen Infrastrukturanbieter das Betriebsgeschehen auf ihren Netzen elektronisch nachbilden können, um auf diese Weise ihre Netze vermarkten zu können. Mit den herkömmlichen Methoden entspricht dies einem Quantensprung im Umfang der Datenmenge, die es zu verarbeiten gilt.

Daher sind neue Methoden der Betriebsabbildung im Schienenverkehr zu entwickeln, die den Fahrplanungsprozess rationalisieren und den Aufwand der Datenhaltung reduzieren. Dies ist das Ziel des vom Bundesforschungs- und Bundeswirtschaftsministeriums geförderten interdisziplinären Forschungsprojektes „Trassenbörse“ ([Mitusch 2007], [Henkel 2007], [Mitusch 2005]). Im Ergebnis des Projektes soll erstmals ein Instrumentarium für die marktorientierte Beurteilung von Zugangsbedingungen im Schienenverkehr zur Verfügung stehen.

Bislang dominieren in Theorie und Praxis der Fahrplanerstellung noch

---

Möglichkeiten und Grenzen der Modellierung des Bahnbetriebes mit planerischen Zugfolgezeiten

simulationsbasierte Planungsmethoden mit gegebenenfalls heuristischen Optimierungsalgorithmen. Diese Methoden bilden zwar die Infrastruktur und das rollende Material äußerst detailliert ab, können aber aus systematischen Gründen „nur“ einen fahrbaren und keinen optimalen Fahrplan – nach welchen Kriterien auch immer – generieren. Nur in Einzelfällen wird dabei die Zahlungsbereitschaft der Nachfrager berücksichtigt.

Der Kerngedanke des Projektes „Trassenbörse“ beruht auf der mathematischen Optimierung der Nutzung verfügbarer Schienenverkehrstrassen in einem auktionbasierten Zugtrassenvermarktungsverfahren. Dazu wird ein Auktionsmechanismus verwendet, der sicherstellt, dass sich die Allokation der Fahrplantrassen an den ökonomischen Wertschätzungen der unterschiedlichen Nutzer orientieren kann. Zu diesem Zweck wurde eine Marktordnung entwickelt, in deren Zentrum Auktionen von Trassen stehen.

Eine zentrale Aufgabe bei der Realisierung einer Trassenbörse zur Auktionierung von Trassen im Eisenbahnverkehr besteht darin, aus einer Menge von Trassenwünschen einen konfliktfreien Fahrplan zu konstruieren, der die Summe der Zahlungen für zugeteilte Fahrplantrassen maximiert. Dieses Trassenallokationsproblem stellt ein kombinatorisches Optimierungsproblem dar, das in jeder Auktionsrunde mit neuen Geboten für die verschiedenen Trassenwünsche erneut gelöst werden muss, bis ein nach den Auktionsregeln endgültiger Fahrplan erreicht wird.

Die mathematische Optimierung im Projekt „Trassenbörse“ erfordert dabei eine vergrößerte Abbildung und Darstellung der Netzinfrastruktur, da die Komplexität einer mikroskopisch gleisgenauen Datengrundlage die Rechenzeiten unverhältnismäßig hoch ansteigen lassen würde. Aus Gründen der Praktikabilität und Recheneffizienz bedient sich die Trassenbörse daher einer makroskopischen Infrastrukturmodellierung. Dafür wurde im Rahmen dieser Arbeit die Modellierung mit planerischen Zugfolgezeiten entwickelt und untersucht.

Den Zusammenhang der Kernmodule der Trassenbörse Auktio, TS-Opt und InfraGen verdeutlicht Abbildung 1. Die Grunddaten zu Infrastruktur und Zugtypen werden vom Modul InfraGen so aggregiert und aufgearbeitet, dass sie als Input für das mathematische Optimierungsmodul TS-Opt und das Auktionsmodul Auktio dienen. Dazu sind die geeigneten Grunddaten zu beschaffen, auf das Beispielnetz zu projizieren, ggf. zu ergänzen und in eine geeignete Form umzuwandeln. Die notwendigen Importfilter zum Datenaustausch mit anderen Fahrplanungs- und Simulationsprogrammen sind

im Modul InfraGen vorzusehen. Zudem werden Algorithmen benötigt, die nicht zu beschaffende, aber benötigte Daten abschätzen bzw. plausibel herleiten können. Informationen, die über das aktuelle Beispielnetz hinausgehen, sind auf die jeweilige Netzgrenze zu projizieren.

Bei der Aufarbeitung der Daten sind die einzelnen Parameter so einzustellen, dass die Erstellung eines konfliktfreien Feinfahrplanes aus dem durch TS-Opt erzeugten, möglichst auch schon konfliktfreien, Grobfahrplan schnell gewährleistet ist.

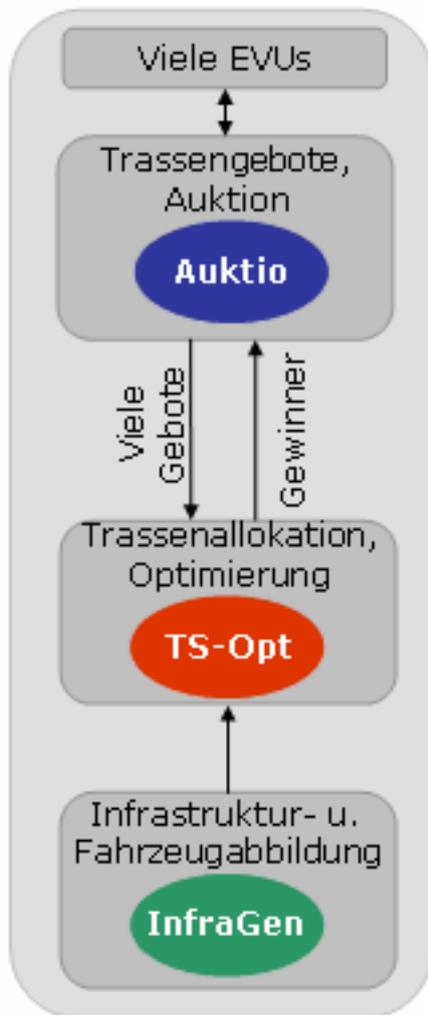


Abbildung 1: Kernmodule der Trassenbörse (nach [Mitusch 2007])

Das Modul Auktio beinhaltet die konkreten Auktionsregeln. Außerdem setzt es die Trassenwünsche der EVU nach den Auktionsregeln in Gebote für verschiedene Trassen um und führt mit allen so erzeugten Trassengeboten die Auktion rundenweise durch. In jeder Runde werden die in der jeweils vorangegangenen Auktionsrunde optimalen Trassen zusammen mit den nicht

---

Möglichkeiten und Grenzen der Modellierung des Bahnbetriebes mit planerischen Zugfolgezeiten

berücksichtigten Trassenwünschen, die gegebenenfalls von den EVU angepasst wurden, durch Auktio zu neuen Trassengebieten zusammengestellt und an TS-Opt zur Optimierung übergeben.

Auf Grundlage der Infrastrukturdaten aus InfraGen sowie der Gebote der EVU, die mit Hilfe des Auktionsmoduls Auktio formuliert werden, berechnet TS-Opt einen Gesamtfahrplan, der hinsichtlich der verwendeten Zielfunktion, z. B. maximaler Netzerlös, optimiert wird. Dieses Trassenallokationsproblem lässt sich als ein kombinatorisches Optimierungsproblem auffassen. Es muss in jeder Auktionsrunde mit neuen Geboten neu gelöst werden.

Bei der Formulierung der Gebote muss auch die Möglichkeit berücksichtigt werden, dass ein EVU Kombinationsgebote für unterschiedliche, aber zusammengehörige Trassen abgeben kann (z. B. für Zugumläufe, Taktverkehre oder Züge mit Anschlusssicherung). Dadurch wird einerseits jedoch der Komplexitätsgrad von Optimierungs- und Auktionsprozessen erhöht. Außerdem kann ein sehr weit reichendes Kombinationsgebot allein aufgrund seines finanziellen Umfangs viele konkurrierende Gebote anderer EVU verdrängen. Damit birgt die Möglichkeit von Kombinationsgebieten die Gefahr, eine Monopolisierungstendenz im Eisenbahnverkehr zu fördern und den angestrebten Wettbewerb auf der Schiene zu konterkarieren. Dies muss bei der Gestaltung der Auktionsregeln und der zugehörigen Marktordnung berücksichtigt werden.

Je nach Abstraktionsgrad der verwendeten Modellierung ist der so erzeugte optimale Fahrplan am Ende der Auktion in einen Feinfahrplan umzuwandeln, um die durch die vergrößerte Abbildung auftretenden Ungenauigkeiten zu berücksichtigen. Die dazu vorgenommene Rückkopplung mit einem Trassenmanagementserver wird in [Klemenz 2007] näher erläutert (siehe auch Kapitel 3.1).

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es nun, die Anwendungsmöglichkeiten der Modellierung des Bahnbetriebes mit planerischen Zugfolgezeiten, deren Grenzen und die dabei zu beachtenden Randbedingungen aufzuzeigen.

Die Modellierung des Bahnbetriebes mit planerischen Zugfolgezeiten verwendet gegenüber den gebräuchlichen Verfahren der mikroskopischen Simulation des Bahnbetriebes eine gröbere Darstellung von Infrastruktur, Fahrzeugen und Fahrplan. Diese Vergrößerung ist vorteilhaft

- bei unzureichenden Datengrundlagen für eine mikroskopische Simulation (z.B. bei Prognoseuntersuchungen) und
- bei mangelnder Handhabbarkeit, sowie zu hohem Beschaffungs- und Pflegeaufwand der Datenmengen bei größeren Netzen.

Die Arbeit zeigt die Anwendungsmöglichkeiten dieser Modellierungsmethodik auf, beschreibt die Grenzen und geht auf die erforderlichen Daten sowie deren Einfluss auf die Genauigkeit der Ergebnisse ein. Außerdem werden eine Bewertung der mit dieser Modellierungsmethodik erzielbaren Untersuchungsergebnisse sowie ein Vergleich mit bestehenden Verfahren durchgeführt.

## **2 Methode der planerischen Zugfolgezeiten**

### **2.1 Grundlagen**

Dieser Abschnitt dient als Überblick der hier untersuchten Modellierung zum besseren Verständnis der Zusammenhänge. Die Einzelheiten werden in den folgenden Abschnitten näher erläutert.

Aufgrund der Anforderungen aus der mathematischen Optimierung (siehe Kapitel 1) geht der gewählte Ansatz der Methode der planerischen Zugfolgezeiten (pZZ) von den bei Betriebssimulationen gewonnenen Erkenntnissen aus und überträgt diese auf eine makroskopische Modellierung der Infrastruktur.

In der Realität des Betriebsablaufes ergibt sich durch die Vielzahl an unterschiedlichen Zügen und individuellen Fahrweisen der Triebfahrzeugführer eine mit den gewählten Methoden mathematisch kaum beherrschbare Zahl an Fahrtverläufen und Zugfolgen in den einzelnen Streckenabschnitten. Diese Vielzahl von Variationen der Fahrtverläufe muss daher durch Standardisierung reduziert werden (siehe Kapitel 2.2.1).

Da nur die Ebene der Fahrplanerstellung modelliert wird, ist die Vorgabe von standardisierten Fahrweisen hier zulässig, so dass nicht alle möglichen Fahrweisen berücksichtigt werden müssen. Damit wird die in der Praxis anzutreffende Variationsvielfalt der Fahrtverläufe auf ein beherrschbares Maß reduziert. Aus diesem Grund werden die einzelnen Züge zu Zugtypen zusammengefasst.

Für die Bestimmung der für diese Modellierung verwendeten Parameter wird für jeden Zugtyp ein Modellzug bestimmt, dessen Kennwerte (z.B. Höchstgeschwindigkeit, Länge, sicherungstechnische Ausstattung, Zugkraft-Geschwindigkeits-Kennlinie, etc.) in die Berechnung der entsprechenden Parameter des Modells einfließen. Diese Werte stellen dann den Mindeststandard dar, den alle Züge, die diesem Zugtyp zugeordnet sind, mindestens erreichen. Zur strukturierten Darstellung einer Auswahl der Zugtypen wird eine Hierarchie der Zugtypen, die als Baumstruktur – angefangen von abstrahierten allgemeinen Zugtypen in der Wurzel hin zu den spezifischen Zugtypen in den untergeordneten Elementen – dargestellt werden kann, verwendet (siehe Kapitel 2.2.4.1).

Für die Modellierung der Infrastruktur erfolgt die Einteilung der Strecken in Abschnitte zwischen den Netzpunkten, an denen sich die Zugreihenfolge ändern kann, d.h. Bahnhöfen. Diese werden als Knoten im Netzgraphen modelliert. Abschnitte (Kanten) und Bahnhöfe werden durch Attribute zur Beschreibung ihrer wesentlichen Eigenschaften ergänzt. Damit wird das komplexe betriebliche Wissen auf wenige Kenngrößen verdichtet (siehe Kapitel 2.2.2 und Kapitel 2.2.3).

Für die Streckenabschnitte sind dies insbesondere die Fahr- ( $t_{Fahr}$ ) und Zugfolgezeiten ( $t_Z$ ) für die verschiedenen Züge. Hierbei werden so genannte planerische Fahr- und Zugfolgezeiten ( $t_{pFZ}$ ,  $t_{pZZ}$ ) verwendet. Diese werden durch Addition von zusätzlichen Zeitzuschlägen ( $t_{Res}$ ,  $t_{Puffer}$ ), welche zum Ausgleich von auftretenden Ungenauigkeiten durch die gewählte Abbildungsgenauigkeit dienen, auf die theoretisch erforderlichen Mindestzeiten erzeugt (siehe Kapitel 2.2.2.2 und Kapitel 2.2.2.3).

planerische Fahrzeit: 
$$t_{pFZ} = t_{Fahr} + t_{Res}$$

planerische Zugfolgezeit: 
$$t_{pZZ} = t_Z + t_{Puffer}$$

## 2.2 Modellierung

### 2.2.1 Diskretisierung und Skalierbarkeit

Zur Abbildung der kontinuierlichen Zugfahrten für den Planungsprozess werden diese auch von herkömmlichen Fahrplanungssystemen in diskrete Abschnitte zerlegt. Bei mikroskopischer Abbildung sind das meistens Abschnitte zwischen zwei Orten, an denen sich streckenseitige, signaltechnische oder fahrzeugseitige Parameter ändern. Falls die sich dadurch ergebenden Abschnitte bestimmte Grenzwerte in Abhängigkeit von der gewünschten Genauigkeit übersteigen (je nach Verfahren eine Zeit-, Weg- oder Geschwindigkeitsdifferenz bzw. eine Kombination daraus) werden dann weitere Zwischenpunkte bestimmt, um die gewünschte Genauigkeit zu gewährleisten [Radtke 2005].

In makroskopischen Modellen erfolgt die Einteilung üblicherweise in Abschnitte zwischen Halten bzw. Fahrzeitmesspunkten. Auch bei der hier beschriebenen Modellierung mit planerischen Zugfolgezeiten wird ein zu makroskopischen Modellen vergleichbarer Ansatz gewählt, um den Erfordernissen der mathematischen Optimierung gerecht zu werden. Alle Parameter zur Beschreibung des Fahrtverlaufes beziehen sich jeweils auf Abschnitte – hier im Weiteren als Streckenabschnitte bezeichnet – zwischen zwei Knoten im Infrastrukturgraphen. Die Knoten des Infrastrukturgraphen stellen dabei Bahnhöfe oder Bahnhofsteile, Abzweigstellen auf der freien Strecke bzw. ggf. einzelne Weichen dar.

Neben der räumlichen Diskretisierung erfolgt für diese Modellierung auch eine Standardisierung der berücksichtigten Züge. Züge mit nur geringfügigen Unterschieden in ihrer fahrdynamischen Charakteristik werden demselben Zugtyp zugeordnet, dessen fahrdynamische Parameter so gewählt werden, dass die damit bestimmten Parameter – hier insbesondere die Fahr- und Zugfolgezeiten – von allen zugeordneten Zügen erreicht werden können. Neben den fahrdynamischen Eigenschaften spielen aber auch noch weitere Einflussgrößen, wie z.B. die verwendete Traktionsart des Zuges, das erforderliche Lichtraumprofil oder die notwendigen Bahnsteighöhen, eine Rolle bei der Zuordnung der Züge zu Zugtypen.

Diese Zugtypen können dann je nach den Erfordernissen der durchzuführenden Untersuchung auch zu abstrakteren Zugtypen, die stärker voneinander abweichende Züge umfassen, zusammengefasst werden. Diese Zusammenhänge zwischen den verwendeten Zugtypen werden in einer Hierarchie dargestellt. Dadurch kann erreicht werden, dass die Anzahl der

---

Möglichkeiten und Grenzen der Modellierung des Bahnbetriebes mit planerischen Zugfolgezeiten

tatsächlich verwendeten Parameter nicht die Grenze des Verarbeitbaren übersteigt. Damit ist es ggf. für verschiedene Streckenabschnitte möglich, eine jeweils angepasste Auswahl von mehr oder weniger abstrakten Zugtypen aus der Hierarchie aller Zugtypen zu verwenden und trotzdem die signifikanten Unterschiede zwischen verschiedenen Zügen auf dem jeweiligen Streckenabschnitt abzubilden, ohne die Zahl der für diesen Streckenabschnitt zu verwendenden Parameter unnötig zu erhöhen.

Beispielsweise muss für einen Streckenabschnitt der Hochgeschwindigkeitsstrecke Köln-Frankfurt der ICE-3 gesondert berücksichtigt werden. Dagegen wird es auf einem Streckenabschnitt mit niedriger zulässiger Geschwindigkeit, wie z.B. der Berliner Stadtbahn, ausreichend sein, abstraktere Zugtypen mit einer Unterscheidung allenfalls in Personennahverkehr und Personenfernverkehr zu verwenden.

Als dritter Aspekt der Diskretisierung ist hier auch die verwendete zeitliche Auflösung aufzuführen, die bei der Modellierung mit planerischen Zugfolgezeiten aufgrund der Erfordernisse der mathematischen Optimierung durch eine abstrakte ganzzahlige Zeiteinheit abgebildet wird. Ihre Größe kann an die Erfordernisse der jeweiligen Untersuchung angepasst werden. Diese ist dabei auch im engen Zusammenhang mit den beiden anderen Aspekten der Diskretisierung zu betrachten.

Durch die gezielte Auswahl der passenden Genauigkeit der räumlichen, zeitlichen und Zugtypdiskretisierung kann die hier beschriebene Modellierung mit planerischen Zugfolgezeiten an eine große Bandbreite unterschiedlich genauer Eingangsdaten sowie verschiedener Größen betrachteter Untersuchungsräume und –szenarien angepasst werden. Durch diese große Anpassungsfähigkeit ist die Modellierung mit planerischen Zugfolgezeiten auch in der Lage eine feinere Abbildung bis hin zur Größenordnung einer mikroskopischen Infrastrukturabbildung zu erreichen.

Allerdings ist der für die Bestimmung der dafür notwendigen Parameter und für die Lösung des daraus entstehenden mathematischen Optimierungsproblems zu treibende Aufwand nur für kleine Untersuchungsräume vertretbar. Zudem können durch die Verwendung von standardisierten Fahrprofilen auch nicht alle mit mikroskopischen Modellen durchführbaren Aufgaben und Problemstellungen gelöst werden.

## 2.2.2 Strecken

### 2.2.2.1 Grundlagen

Das gesamte zu untersuchende Streckennetz wird in Abschnitte zwischen jeweils zwei Bahnhöfen eingeteilt. Aber auch Trennungs- bzw. Zusammenführungspunkte von Strecken außerhalb der Bahnhöfe stellen gesondert zu behandelnde Punkte im Netz dar, an denen Streckenabschnitte beginnen oder enden. Bei Bedarf können zudem auch Bahnhofsteile, Weichengruppen bis hin zu einzelnen Weichen als Knoten im Netzgraphen verwendet werden.

Die so erzeugten Streckenabschnitte stellen dabei gerichtete Kanten im Netzgraphen dar. Üblicherweise wird ein Paar von entgegengerichteten Streckenabschnitten benötigt, um – unabhängig von der vorhandenen Gleisanzahl des Infrastrukturabschnittes – die beiden fahrbaren Richtungen abzubilden (siehe Abbildung 2). Nur Infrastrukturabschnitte, in denen im Regelbetrieb nur in einer Richtung gefahren wird, wie z.B. Überleitstellen vor einem Abzweig, werden durch einen einzelnen Streckenabschnitt modelliert (siehe Abbildung 5).

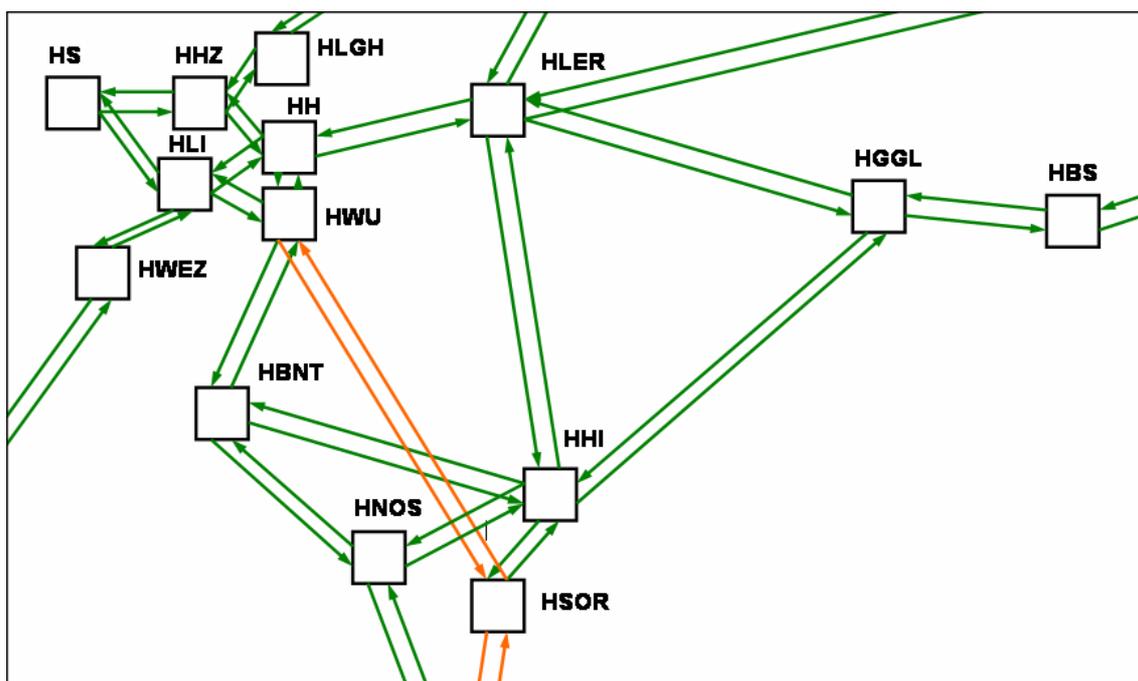


Abbildung 2: Beispiel für die Netzabbildung in InfraGen (Raum Hannover)

Für die Einteilung des Netzes in Streckenabschnitte sind zwei grundsätzliche Modellierungsphilosophien für die Berücksichtigung und Abbildung von Abzweigen auf der freien Strecke (siehe Abbildung 3) denkbar.

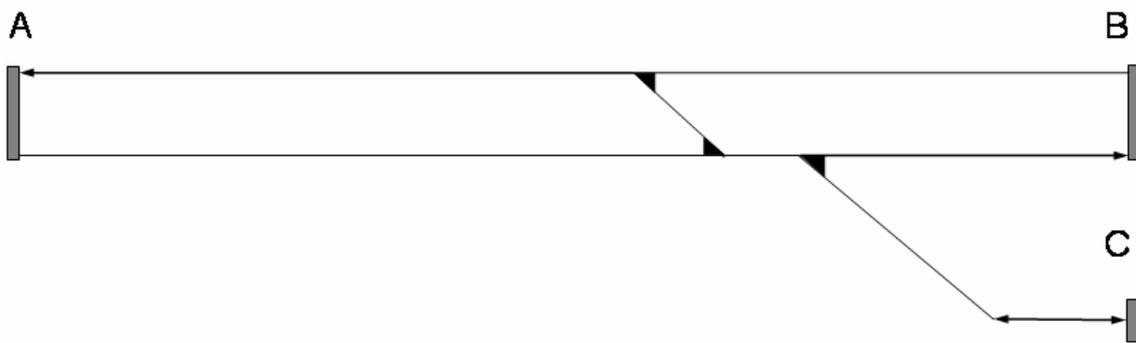


Abbildung 3: Beispiel-Gleisplan für eine Abzweigung auf der freien Strecke

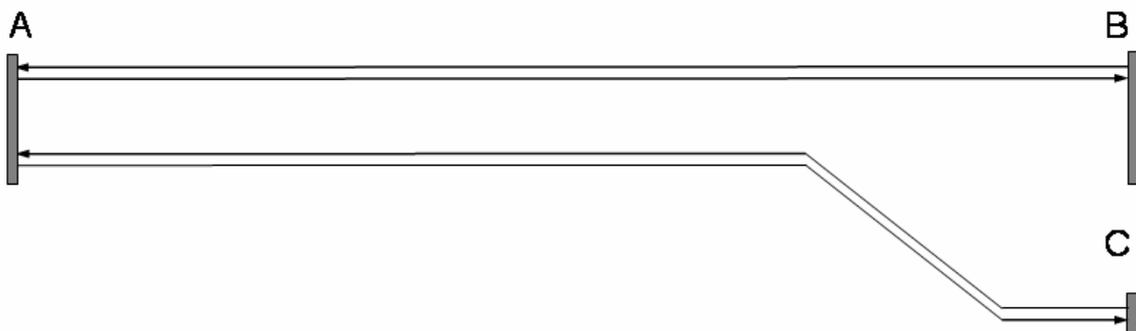


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Modellierung mit langen Abschnitten für eine Abzweigung auf der freien Strecke

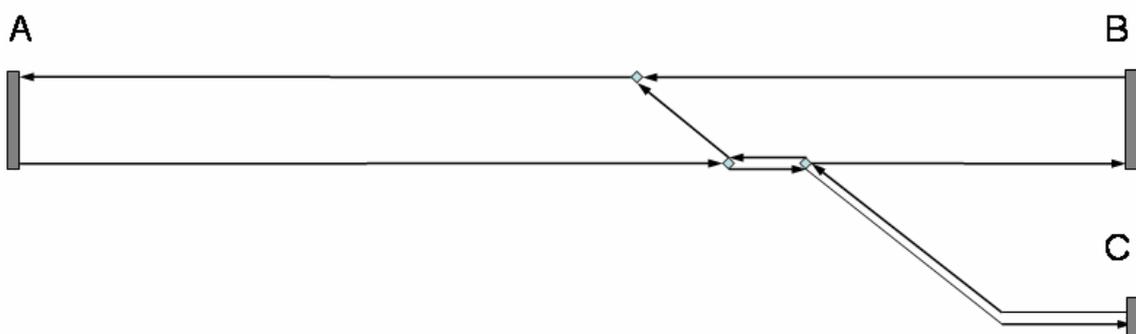


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Modellierung mit teilweise gleisgenauer Abbildung für eine Streckenabzweigung

Zum einen ist es sinnvoll, möglichst lange Abschnitte zwischen Bahnhöfen zu bilden, um die Fehler, die durch das Runden auf ganze Zeiteinheiten entstehen, möglichst gering zu halten. Dafür werden die Abzweigstellen nicht durch Knoten

dargestellt, sondern mehrere parallel Streckenabschnitte verwendet (siehe Abbildung 4). Diese Streckenabschnitte haben dann z.B. denselben Ausgangsbahnhof, aber unterschiedliche Endbahnhöfe bzw. umgekehrt. Zur Berücksichtigung der durch die Abbildung derselben Infrastruktur in verschiedenen Streckenabschnitten auftretenden Konflikte werden zusätzliche Zugfolgezeiten zu Konfliktfällen zwischen Zügen auf diesen unterschiedlichen Streckenabschnitten angegeben.

Zum anderen kann man die Infrastruktur an Abzweigstellen auch möglichst genau abbilden (siehe Abbildung 5), so dass jede relevante Weiche der jeweiligen Abzweigstelle durch einen Knoten abgebildet wird. Dadurch wird vermieden, dass Zugfolgezeiten zwischen Zügen auf unterschiedlichen Streckenabschnitten angegeben werden müssen, was sich vorteilhaft auf die Lösung des mathematischen Optimierungsproblems auswirken kann.

Allerdings müssen bei der Bestimmung der nötigen Zugfolgezeiten die Effekte und gegenseitigen Behinderungen von Zügen auf unterschiedlichen Streckenabschnitten in die Berechnung einfließen. Nachteilig bei dieser Modellierungsphilosophie ist außerdem, dass sich durch die Abfolge mehrerer kürzerer Streckenabschnitte im Verlauf der Abzweigstellen die Rundungsfehler für die Rundung der Fahrzeiten auf ganze Zeiteinheiten aufsummieren.

Zur Beschreibung der fahrplantechnisch relevanten Bedingungen der Streckenabschnitte werden nur zwei Arten von Parametern benötigt:

- die Fahrzeiten für jede Standardfahrweise aller für diesen Streckenabschnitt verwendeten Zugtypen, sowie
- die planerischen Zugfolgezeiten für jeden Zugfolgefall auf diesem Streckenabschnitt.

Diese Kenngrößen werden individuell für jeden Streckenabschnitt berechnet. Die sich ergebende Anzahl der zu bestimmenden Parameter hängt dabei für die Fahrzeit direkt und für die planerischen Zugfolgezeiten quadratisch von der Zahl der für diesen Streckenabschnitt verwendeten Zugtypen und ihrer vorgegebenen Standardfahrweisen (siehe 2.2.4) ab.

Für jeden Streckenabschnitt werden dabei ein Vektor der Fahrzeiten (siehe Abbildung 6) aller jeweils betrachteten Zugtypen und eine Zugfolgezeiten-Matrix (siehe Abbildung 11) angegeben. In dem dort dargestellten Beispiel sind für jeden Zugtyp vier unterschiedliche Fahrweisen (durchfahrende, haltende, anfahrende bzw. anhaltende Züge aus diesem Zugtyp; siehe 2.2.4) berücksichtigt und in die Kennzeichnung der Zugtypen (Spalte „traintypID“ als

Identifikationsmerkmal in Kombination aus Zugtypkennzeichnung und Kürzel der Fahrweise) eingearbeitet. Die Fahrzeiten bzw. Zugfolgezeiten sind in der Spalte „value“ in Sekunden angegeben. In Abbildung 11 sind außerdem zur Identifizierung des jeweiligen Zugfolgefalles die Kennzeichnungen für Zugtyp („traintypeID\_prec“ für den Zugtyp des vorausfahrenden Zuges und „traintypeID\_suc“ für den Zugtyp des nachfolgenden Zuges) und Streckenabschnitt („trackID\_prec“ zur Kennzeichnung des Streckenabschnittes des vorausfahrenden Zuges und „trackID\_suc“ zur Kennzeichnung des Streckenabschnittes des nachfolgenden Zuges) für beide beteiligten Züge aufgeführt.

### 2.2.2.2 Fahrzeiten

Die Fahrzeiten geben an, wie lange ein bestimmter Zug mit einer vorgegebenen Fahrweise (siehe 2.2.4) für die Fahrt auf dem jeweiligen Streckenabschnitt benötigt. Dafür wird die vom Eintritt der Zugspitze des Zuges in den Streckenabschnitt bis zum Austritt der Zugspitze aus dem Streckenabschnitt notwendige Fahrzeit berechnet. Gegebenenfalls vorgesehene Zwischenhalte des Zuges innerhalb des Streckenabschnittes werden dabei berücksichtigt.

	= traintypeID	= value
1	RB111_P	883
2	RB111_D	913
3	RB111_S	899
4	RB111_H	930
5	RB143_P	1002
6	RB143_D	1025
7	RB143_S	1017
8	RB143_H	1039
9	RB628_P	1006
10	RB628_D	1058
11	RB628_S	1022
12	RB628_H	1074
13	RB643_P	1005
14	RB643_D	1043
15	RB643_S	1020
16	RB643_H	1057
17	RB646_P	1004
18	RB646_D	1038
19	RB646_S	1019
20	RB646_H	1052

Abbildung 6: Beispiel für die Fahrzeiten für einen Streckenabschnitt

Auf den Zug wirken während der Zugfahrt folgende Kräfte ein:

- $F_T$  – Zugkraft
- $F_B$  – Bremskraft
- $F_{WZ}$  – Zugwiderstandskraft
- $F_{M_{Beschleunigung}}$  – Massenträgheitskraft bei Beschleunigung
- $F_{M_{Bremsung}}$  – Massenträgheitskraft bei Bremsung
- $F_{N_{Gefälle}}$  – Neigungskraft im Gefälle
- $F_{N_{Steigung}}$  – Neigungskraft in der Steigung

Diese werden in beschleunigende und bremsende Kräfte unterteilt. In Abbildung 7 ist das Kräftegleichgewicht der während einer Zugfahrt am Zug angreifenden Kräfte dargestellt. Beschleunigende Kräfte sind dort rechts und bremsende Kräfte links vom Massenschwerpunkt des Zuges eingetragen.

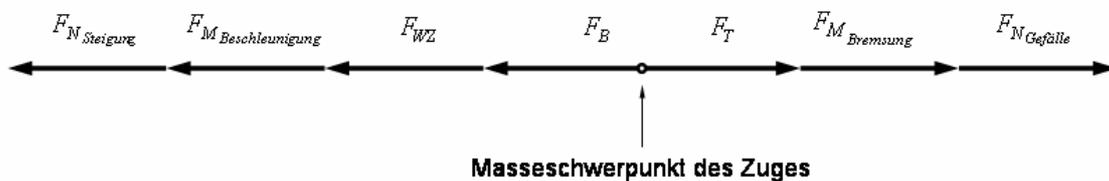


Abbildung 7: Kräftegleichgewicht der Zugfahrt (nach [Wende 2003])

Das sich ergebende Gleichgewicht der während der Fahrt am Zug angreifenden Kräfte (siehe Abbildung 7) bildet die Grundlage für die Berechnung der Fahrzeiten. Die Höhe der einzelnen Kräfte hängt dabei von den an der aktuellen Position vorhandenen Einflüssen, der gefahrenen Geschwindigkeit und der Phase der Zugfahrt (Anfahren, Beharrungsfahrt, Ausrollen, Bremsen) ab.

Zur Berechnung der Fahrzeit wird aus der resultierenden Kraft ( $F_a$ ) unter Berücksichtigung der Massewirkungen des Zuges die Beschleunigung ( $a(t)$ ) ermittelt. Neben der Zugmasse werden für die Bestimmung der Massewirkung des Zuges die Drehmomente der rotierenden Elemente im Zug (Räder, Achsen, Motor, Getriebe, etc.) umgerechnet zur rotatorischen Zugmasse [Wende 2003]

verwendet.

$m_Z$  – Masse des Zuges

$m_{DZ}$  – rotatorische Zugmasse

Unter Berücksichtigung der weg- ( $s(t)$ ) und geschwindigkeitsabhängigen ( $v(t)$ ) Einflüsse auf die verschiedenen Kräfte können mit Hilfe der folgenden Formeln die Fahrzeiten für die einzelnen Phasen einer Zugfahrt bestimmt werden.

Zugfahrt mit Zugkraft:

$$F_a = F_T(v(t)) - F_{WZ}(v(t), s(t)) + F_N(s(t))$$

$$a(t) = \frac{F_T(v(t)) - F_{WZ}(v(t), s(t)) + F_N(s(t))}{m_z + m_{DZ}}$$

Zugfahrt mit Bremskraft:

$$F_a = -F_B(v(t)) - F_{WZ}(v(t), s(t)) + F_N(s(t))$$

$$a(t) = \frac{-F_B(v(t)) - F_{WZ}(v(t), s(t)) + F_N(s(t))}{m_z + m_{DZ}}$$

Aufgrund der Vielzahl von Einflussgrößen und ihrer häufigen Änderungen ist eine analytische Lösung des Kräftegleichgewichts über die Abschnitte einer Zugfahrt nur für sehr einfache Anwendungsfälle möglich. Daher werden die sich ergebenden Bewegungsgleichungen üblicherweise auf numerischem Wege gelöst (siehe Kapitel 2.4).

Zusätzlich zur ermittelten Mindestfahrzeit werden noch Reservezeiten addiert.

$$t_{pFZ} = t_{Fahr} + t_{Res}$$

Diese dienen einerseits der Erhöhung der Fahrplanstabilität und gleichen andererseits Ungenauigkeiten aus, die durch die Einteilung der Züge zu Zugtypen und durch die Berücksichtigung unterschiedlicher Fahrwege in den Bahnhöfen entstehen (siehe 4.2.1).

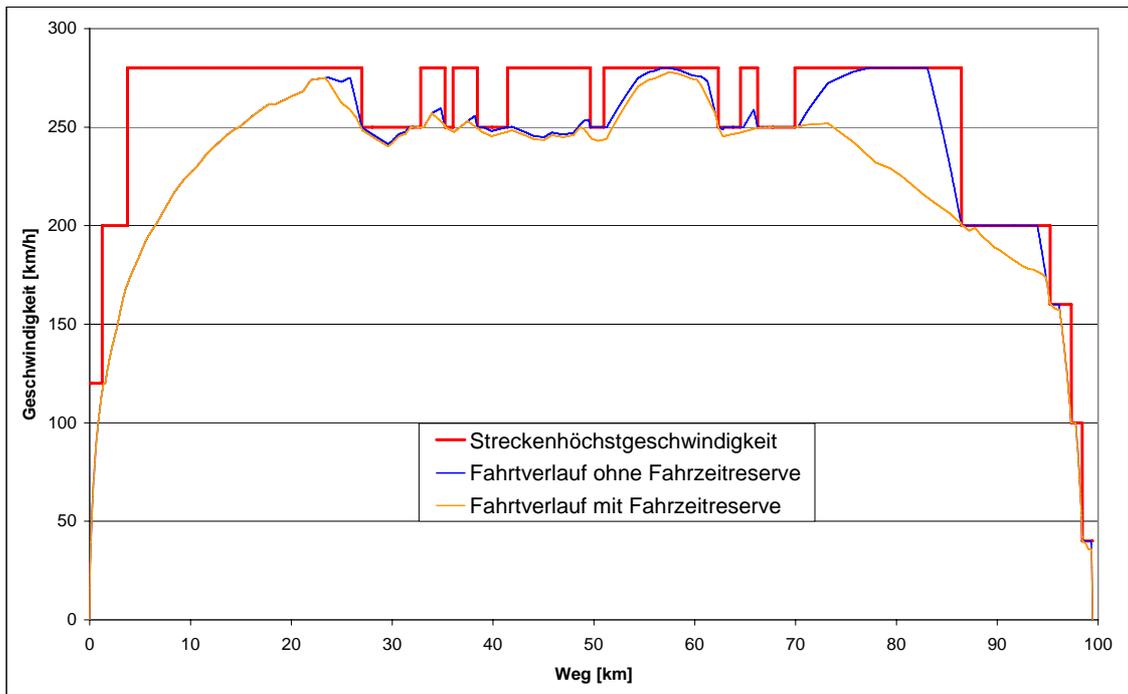


Abbildung 8: Fahrtverlauf eines ICE als Geschwindigkeits-Weg-Diagramm [Linder 2001]

Abbildung 8 zeigt beispielhaft einen Fahrtverlauf eines ICE auf einem Abschnitt der Hochgeschwindigkeitsstrecke zwischen Hannover und Fulda in einem Geschwindigkeits-Weg-Diagramm. Zum Vergleich ist der Fahrtverlauf ohne Berücksichtigung einer Reservezeit dem Fahrtverlauf unter Ausnutzung einer Reservezeit – in diesem Beispiel wird die Reservezeit für die Einsparung von Traktionsenergie verwendet – gegenübergestellt. Zur Verdeutlichung der verwendeten Fahrzeitreserve ist in Abbildung 9 derselbe Fahrtverlauf in einem Zeit-Weg-Diagramm dargestellt.

In die Berechnung der Fahrzeiten fließen alle relevanten fahrzeug- und streckenseitigen Parameter, wie z.B. die zulässige Höchstgeschwindigkeit des Zuges und die abschnittsweise zulässigen Streckenhöchstgeschwindigkeiten, ein. Für Züge dieses Zugtyps, die nicht dem Modellzug entsprechen, ergeben sich dadurch gegebenenfalls abweichende Fahrtverläufe, die aber alle mit kürzeren Fahrzeiten verbunden sind, als die Fahrzeit des Modellzuges unter Einbeziehung der Reservezeit.

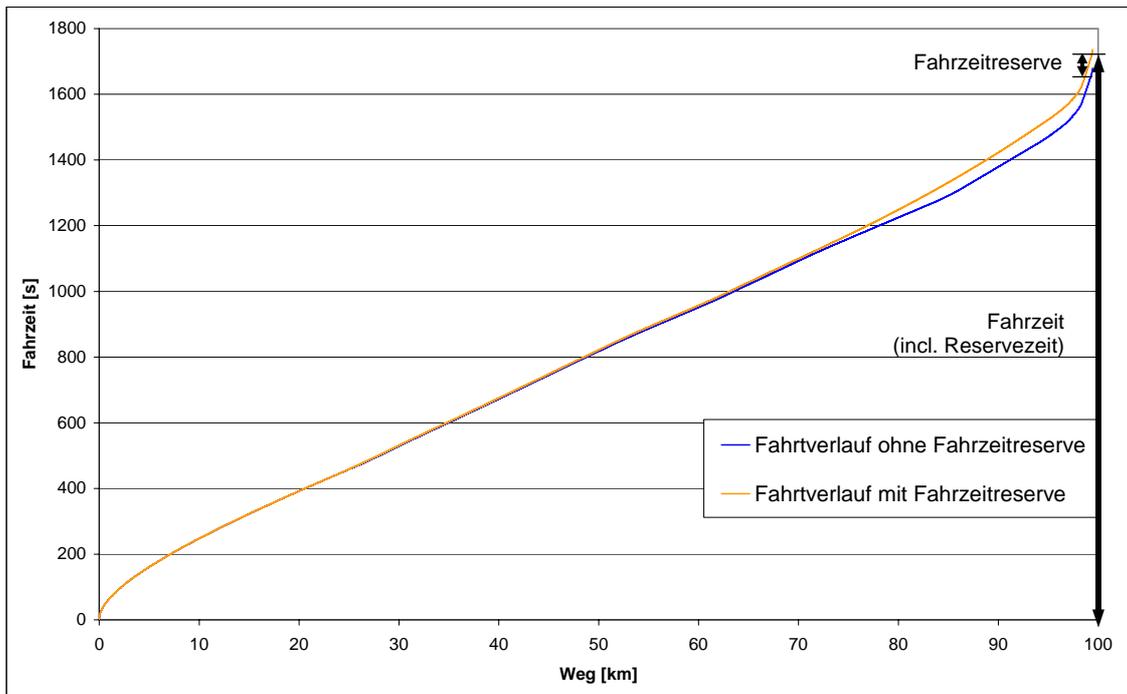


Abbildung 9: Fahrtverlauf eines ICE als Zeit-Weg-Diagramm

### 2.2.2.3 Zugfolgezeiten

Die Zugfolgezeit gibt die mindestens einzuhaltende Abfahrts- bzw. Durchfahrtszeitdifferenz zweier Züge am Ausgangsbahnhof ihres jeweiligen Streckenabschnittes an. In Abbildung 10 sind zur Verdeutlichung die einzelnen Blocksperrzeiten zweier aufeinander folgender Züge in einem schematischen Zeit-Weg-Diagramm sowie die daraus resultierende Zugfolgezeit dargestellt. Werden die den Fahrtverlauf der beiden Züge repräsentierenden Zeit-Weg-Linien so dicht aneinander geschoben, dass sich die Blocksperrzeiten gerade berühren, so ergibt sich aus der Zeitdifferenz der Abfahrtszeiten der beiden Züge am Ausgangsbahnhof des Streckenabschnittes die einzuhaltende Mindestzugfolgezeit.

Auf die Mindestzugfolgezeit werden zusätzlich noch Pufferzeiten – in Abbildung 10 durch die heller schattierten Farben dargestellt – aufgeschlagen. Diese Pufferzeiten dienen der Fahrplanstabilität während des Betriebsablaufes zur Vermeidung von Verspätungsübertragungen im Falle von kleinen Störungen im Betriebsablauf.

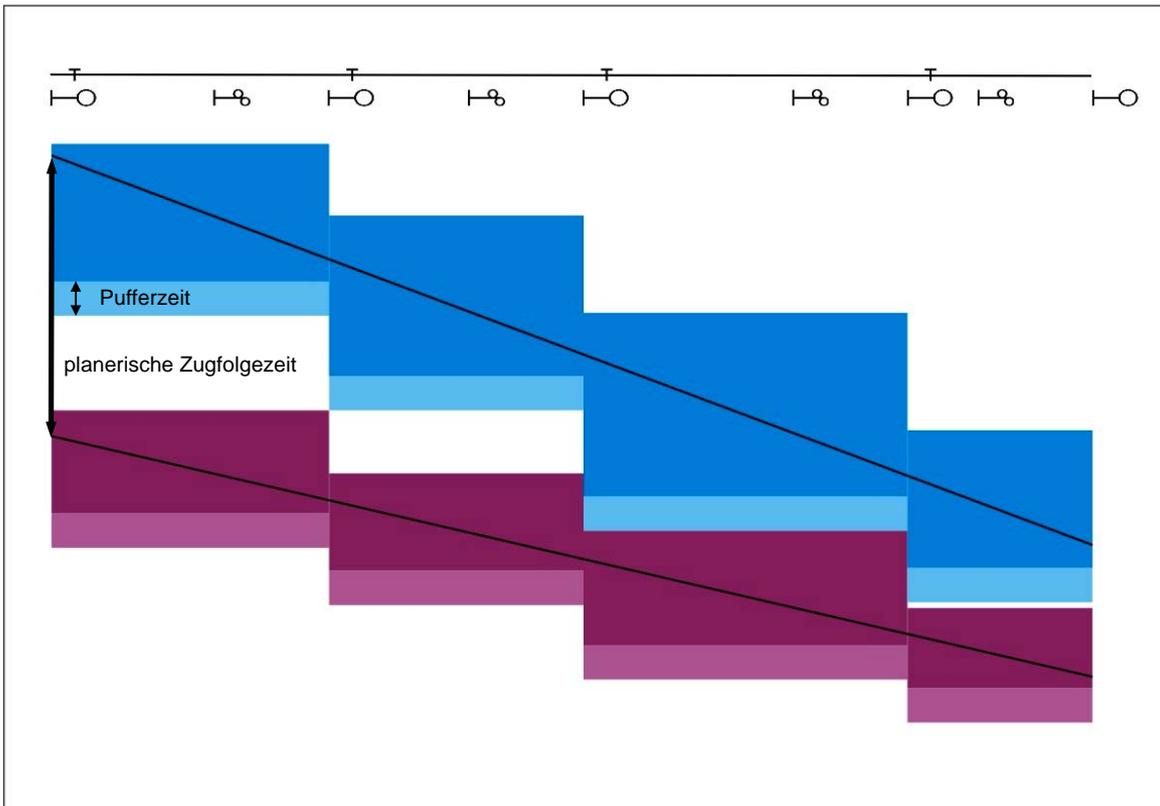


Abbildung 10: Sperrzeitentreppe und Zugfolgezeit (Quelle: [Borndörfer 2006])

Zum Ausgleich von Ungenauigkeiten, die durch die Einteilung in Zugtypen entstehen, werden neben den regulären Pufferzeiten von ein bis zwei Minuten bei der hier beschriebenen Methode der planerischen Zugfolgezeiten zusätzliche Pufferzeiten von bis zu einer Minute verwendet. Dabei ist darauf zu achten, dass diese groß genug gewählt sind, um die Umwandlung eines durch Anwendung dieser Methode bestimmten Grobfahrplanes in einen für die Betriebsdurchführung geeigneten Feinfahrplan sicher gewährleisten zu können. Andererseits dürfen sie aber nicht unnötig groß sein, da sonst die in der Realität verfügbaren Kapazitäten nicht ausgeschöpft werden können. Dies wird in Kapitel 4 näher untersucht.

	= traintypeID_prec...	= trackID_prec...	= traintypeID_suc...	= trackID_suc...	= value
1	RB111_D	TA600-1===BG6	RB111_D	TA600-1===BG6	160
2	RB111_D	TA600-1===BG6	RB111_H	TA600-1===BG6	160
3	RB111_D	TA600-1===BG6	RB111_P	TA600-1===BG6	218
4	RB111_D	TA600-1===BG6	RB111_S	TA600-1===BG6	218
5	RB111_D	TA600-1===BG6	RB143_D	TA600-1===BG6	164
6	RB111_D	TA600-1===BG6	RB143_H	TA600-1===BG6	164
7	RB111_D	TA600-1===BG6	RB143_P	TA600-1===BG6	218
8	RB111_D	TA600-1===BG6	RB143_S	TA600-1===BG6	218
9	RB111_D	TA600-1===BG6	RB628_D	TA600-1===BG6	157
10	RB111_D	TA600-1===BG6	RB628_H	TA600-1===BG6	157
11	RB111_D	TA600-1===BG6	RB628_P	TA600-1===BG6	218
12	RB111_D	TA600-1===BG6	RB628_S	TA600-1===BG6	218
13	RB111_D	TA600-1===BG6	RB643_D	TA600-1===BG6	162
14	RB111_D	TA600-1===BG6	RB643_H	TA600-1===BG6	162
15	RB111_D	TA600-1===BG6	RB643_P	TA600-1===BG6	218
16	RB111_D	TA600-1===BG6	RB643_S	TA600-1===BG6	218
17	RB111_D	TA600-1===BG6	RB646_D	TA600-1===BG6	163
18	RB111_D	TA600-1===BG6	RB646_H	TA600-1===BG6	163
19	RB111_D	TA600-1===BG6	RB646_P	TA600-1===BG6	218
20	RB111_D	TA600-1===BG6	RB646_S	TA600-1===BG6	218
390	RB646_S	TA600-1===BG6	RB628_H	TA600-1===BG6	126
391	RB646_S	TA600-1===BG6	RB628_P	TA600-1===BG6	179
392	RB646_S	TA600-1===BG6	RB628_S	TA600-1===BG6	179
393	RB646_S	TA600-1===BG6	RB643_D	TA600-1===BG6	131
394	RB646_S	TA600-1===BG6	RB643_H	TA600-1===BG6	131
395	RB646_S	TA600-1===BG6	RB643_P	TA600-1===BG6	179
396	RB646_S	TA600-1===BG6	RB643_S	TA600-1===BG6	179
397	RB646_S	TA600-1===BG6	RB646_D	TA600-1===BG6	132
398	RB646_S	TA600-1===BG6	RB646_H	TA600-1===BG6	132
399	RB646_S	TA600-1===BG6	RB646_P	TA600-1===BG6	179
400	RB646_S	TA600-1===BG6	RB646_S	TA600-1===BG6	179

Abbildung 11: Beispiel für Zugfolgezeiten eines Streckenabschnittes

Bei der Bestimmung der Zugfolgezeiten sind dabei folgende Arten von Zugfolgefällen in Betracht zu ziehen:

- Zugfolgezeiten für Ein-Richtungsverkehr (zweigleisige Strecken)

Auf zweigleisigen Strecken wird grundsätzlich im Ein-Richtungsverkehr gefahren. Dies stellt die einfachste Art von Zugfolgefällen dar, da hier nur potentielle Konflikte zwischen einander auf demselben Streckenabschnitt folgenden Zügen betrachtet werden müssen. Dieser Fall tritt auch mit Abstand am Häufigsten auf.

Wie in Abbildung 10 ersichtlich, ergibt sich die Zugfolgezeit als Maximum der Summe aus jeweiliger Blocksperrzeit und der Fahrzeitdifferenz zwischen den beiden aufeinander folgenden Zügen bis zum Beginn des

entsprechenden Blockabschnittes. Die Blocksperrzeit (siehe Abbildung 12) setzt sich dabei grundsätzlich aus folgenden Einzelzeiten zusammen:

- der Fahrstraßenbildezeit ( $t_{Fb}$ ),
- der Sicht- bzw. Reaktionszeit ( $t_{Si}$ ),
- der Annäherungsfahrzeit ( $t_{Af}$ ),
- der Blockfahrzeit ( $t_{Df}$ ),
- der Räumfahrzeit ( $t_{Rf}$ ) sowie
- der Fahrstraßenauflösezeit ( $t_{Fa}$  ggf. incl. einer Weichenstellzeit  $t_{We}$ ).

Die Mindestzugfolgezeit ergibt sich als das Maximum der Summe aus jeweiliger Blocksperrzeit ( $t_{Sp_i}$ ) und der Fahrzeitdifferenz ( $\Delta t_{F_i}$ ) der beiden beteiligten Züge bis zum Beginn des jeweiligen Blockabschnittes über alle Blockabschnitte im gesuchten Streckenabschnitt.

$$t_Z = \text{Max}_i(t_{Sp_i} + \Delta t_{F_i})$$

$$t_{Sp_i} = t_{Fb_{Zug_2}} + t_{Si_{Zug_2}} + t_{Af_{Zug_2}} \\ + t_{Df_{Zug_1}} + t_{Rf_{Zug_1}} + t_{Fa_{Zug_1}}$$

$$\Delta t_{F_i} = t_{F_{iZug_1}} - t_{F_{iZug_2}}$$

Zur Bestimmung der Zugfolgezeit unterschiedlicher Züge werden dabei für die Berechnung der Blocksperrzeiten für den vorausfahrenden Zug

- die Blockfahrzeit,
- die Räumfahrzeit sowie
- die Fahrstraßenauflösezeit

und für den nachfolgenden Zug

- die Fahrstraßenbildezeit,
- die Sicht- bzw. Reaktionszeit sowie
- die Annäherungsfahrzeit

verwendet.

Weitere Details und nähere Erläuterungen zu den einzelnen Bestandteilen der Blocksperrzeit und zur Bestimmung von Zugfolgezeiten können der einschlägigen Literatur, z.B. [Pachl 2002], [DB 2008], [Hansen 2008], entnommen werden.

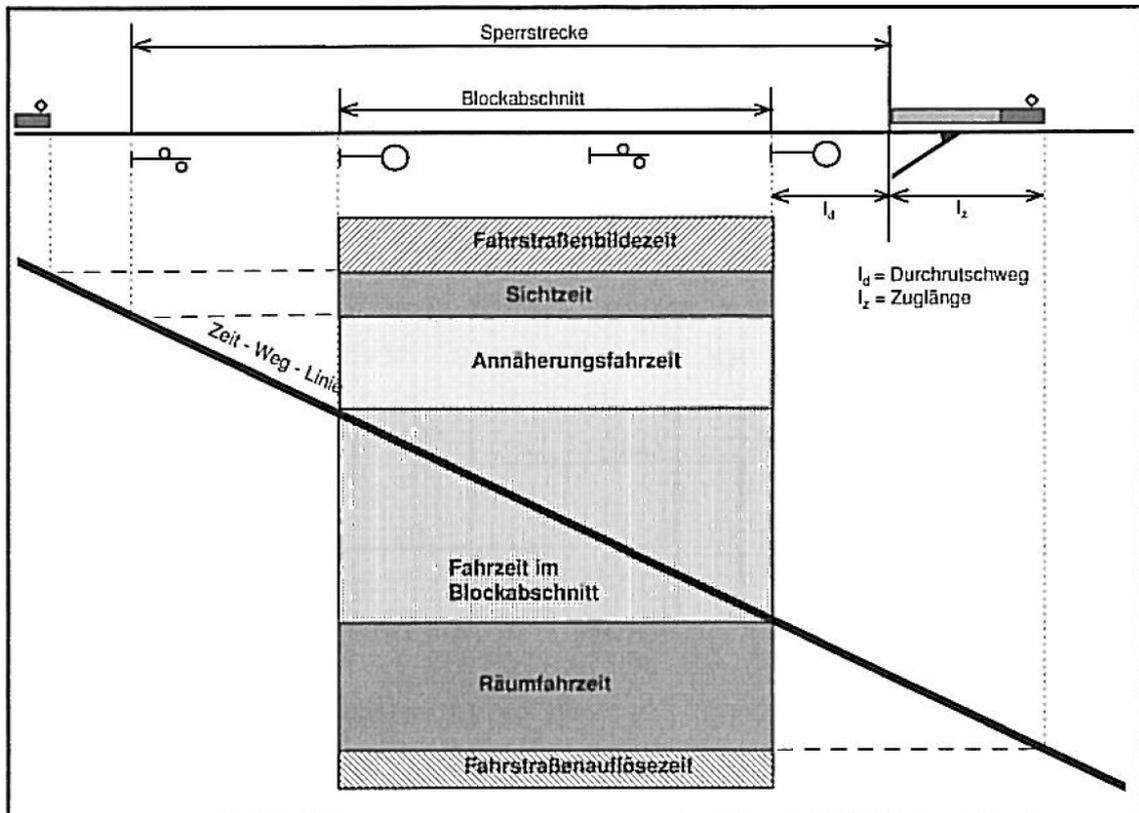


Abbildung 12: Bestandteile der Blocksperrzeit (Quelle: [DB 2008])

- Zugfolgezeiten für Zwei-Richtungsverkehr (eingleisige Strecken)

Auf eingleisigen Streckenabschnitten müssen neben möglichen Konflikten zwischen einander folgenden Zügen derselben Richtung auch potentielle Konflikte mit Zügen der Gegenrichtung betrachtet werden. Dafür werden zusätzliche Zugfolgezeiten zwischen Zügen, die auf einander entgegengerichteten Kanten fahren, bestimmt (siehe Abbildung 13 Zugfolgezeiten  $t_{AB}$  bzw.  $t_{BA}$ ).

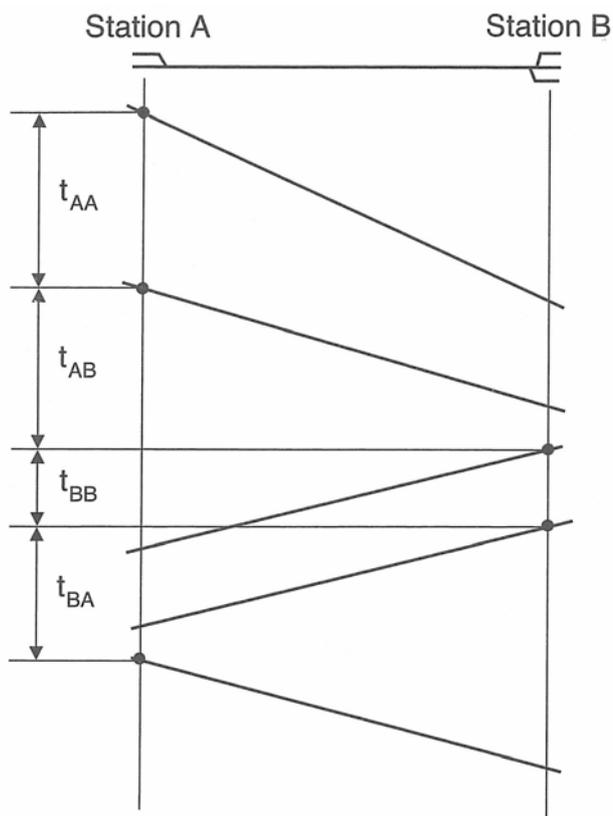


Abbildung 13: Notwendige Zugfolgezeiten für Zwei-Richtungsverkehr (Quelle: [Hansen 2008])

Für die Ermittlung der Zugfolgezeiten für Konflikte mit dem Gegenverkehr ist die Bestimmung des maßgeblichen Konfliktpunktes ausschlaggebend. Dieser ist für Gegenverkehrskonflikte aber im Gegensatz zu Folgekonflikten unabhängig von der konkreten Konfliktpaarung räumlich festgelegt.

Der maßgebliche Konfliktpunkt für die Bestimmung der Zugfolgezeiten für diesen Konfliktfall ist das Deckungssignal vor der Verbindungsweiche zum eingleisigen Bereich aus der Richtung des „nachfolgenden“ – in diesem Fall also des entgegenkommenden – Zuges (siehe Abbildung 14).

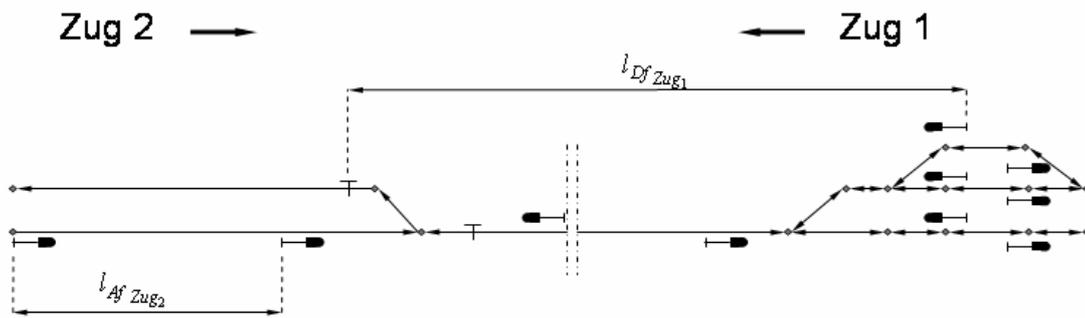


Abbildung 14: Schematische Darstellung der Konfliktsituation für  
Zwei-Richtungsverkehr bei eingleisigen Streckenabschnitten

Die Zugfolgezeit setzt sich damit aus

- der Blockfahrzeit,
- der Räumfahrzeit sowie
- der Fahrstraßenauflösezeit

für den vorausfahrenden Zug und

- der Fahrstraßenbildezeit,
- der Weichenumlaufzeit,
- der Sicht- bzw. Reaktionszeit sowie
- der Annäherungsfahrzeit

für den nachfolgenden Zug zusammen.

$$t_Z = t_{Fb_{Zug2}} + t_{Si_{Zug2}} + t_{Af_{Zug2}} + t_{Df_{Zug1}} + t_{Rf_{Zug1}} + t_{We_{Zug1}} + t_{Fa_{Zug1}}$$

Für die Einteilung der Infrastruktur in Streckenabschnitte ist dabei zu beachten, dass innerhalb eines Streckenabschnittes nur maximal ein eingleisiger Abschnitt je Streckenabschnitt vorkommen darf. Vor und hinter diesem eingleisigen Abschnitt kann ein zweigleisiger Vor- und/oder Nachlauf vorhanden sein.

Allerdings kann das bei sehr unterschiedlich langen Vor-/Nachlauf-

abschnitten dazu führen, dass der am Konfliktpunkt zuerst eintreffende Zug (per Definition der „vorausfahrende Zug“) an seinem Anfangsknoten des Streckenabschnittes erst nach dem am Konfliktpunkt später eintreffenden Zug („nachfolgender Zug“) losfährt. Dadurch können Zugfolgezeiten auftreten, die negativ oder Null sein können. Dies kann vom mathematischen Optimierungstool nicht interpretiert werden, so dass in diesen Fällen durch Hinzufügen von zusätzlichen Pufferzeiten der zulässige Minimalwert für die mathematische Optimierung von einer Zeiteinheit erreicht werden kann. Diese zusätzlich erforderliche Pufferzeit führt dann aber zu einer unnötigen Verminderung der Kapazität.

Durch das Einfügen zusätzlicher Knoten im Netz an den Übergangsstellen zwischen zwei und eingleisigen Abschnitten kann dieses Problem zumindest verringert werden. Dies vergrößert allerdings durch die zusätzlich eingefügten Knoten die Größe des mathematischen Optimierungsproblems und geht damit zu Lasten von dessen Lösbarkeit. Dies muss im Einzelfall gegeneinander abgewogen werden.

- Zugfolgezeiten für Abzweig- und Kreuzungsstellen

Je nach verwendeter Modellierungsphilosophie kann es erforderlich sein, Konflikte zwischen verschiedenen Streckenabschnitten durch zusätzliche Zugfolgezeiten zu modellieren. Dies muss hier bei der Modellierung mit „langen Streckenabschnitten“, bei der identische Infrastruktur teilweise in unterschiedlichen Streckenabschnitten berücksichtigt wird, immer dann erfolgen, wenn Züge, die auf unterschiedlichen Streckenabschnitten fahren und in der Realität – zumindest kurzzeitig – dieselbe Infrastruktur benutzen.

Die Zugfolgezeit wird dabei als die mindestens erforderliche Differenz der Abfahrtszeiten zweier Züge auf den beiden konfliktären Streckenabschnitten an ihrem jeweiligen Ausgangsknotenpunkt ausgedrückt. Maßgebend für die Reihenfolgeangabe ist ihre Reihenfolge am Konfliktpunkt. Dabei werden neben den Ein- und Ausfädelungskonflikten je nach vorhandenen Kreuzungsbauwerken auch Kreuzungskonflikte berücksichtigt.

Ein- und Ausfädelungskonflikte stellen dabei Zugfolgekonflikte von Zügen dar, die die gemeinsame Infrastruktur in derselben Richtung befahren. Diese Zugfolgezeiten werden analog zu den Zugfolgezeiten für den Ein-Richtungsverkehr bestimmt. Relevant ist hier aber nur der von beiden Zügen gemeinsam genutzte Infrastrukturabschnitt. Dabei muss bei Einfädelungskonflikten die Differenz der Fahrzeiten vom jeweiligen

Startbahnhof der Züge bis zum Beginn des gemeinsam genutzten Abschnittes berücksichtigt werden.

Kreuzungskonflikte werden ähnlich wie Zugfolgekonflikte im Zwei-Richtungsverkehr behandelt. Je nachdem, welcher Zug zuerst den Konfliktpunkt erreicht, sind unterschiedliche Annäherungs- ( $l_{Af\ Zug_2}$ ) bzw. Durchfahrwege ( $l_{Df\ Zug_1}$ ) zu berücksichtigen (siehe Abbildung 15 und Abbildung 16).

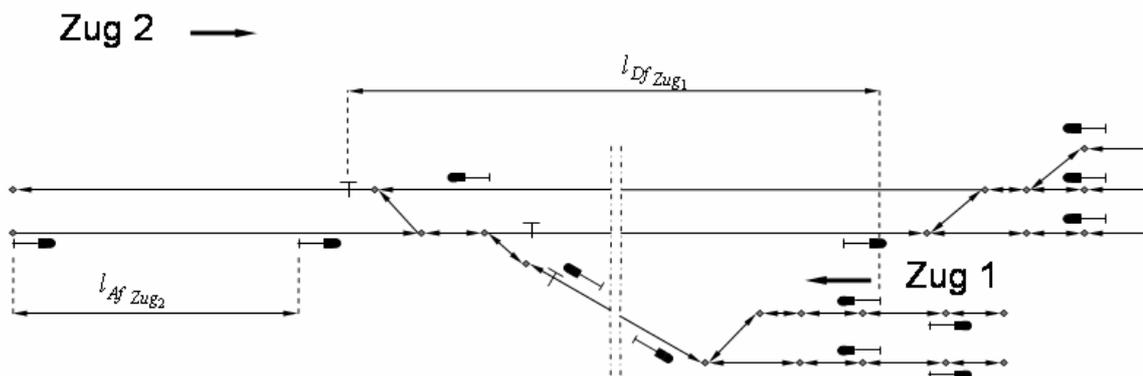


Abbildung 15: Schematische Darstellung der Konfliktsituation für Kreuzungskonflikte – kreuzender Zug „vorausfahrend“

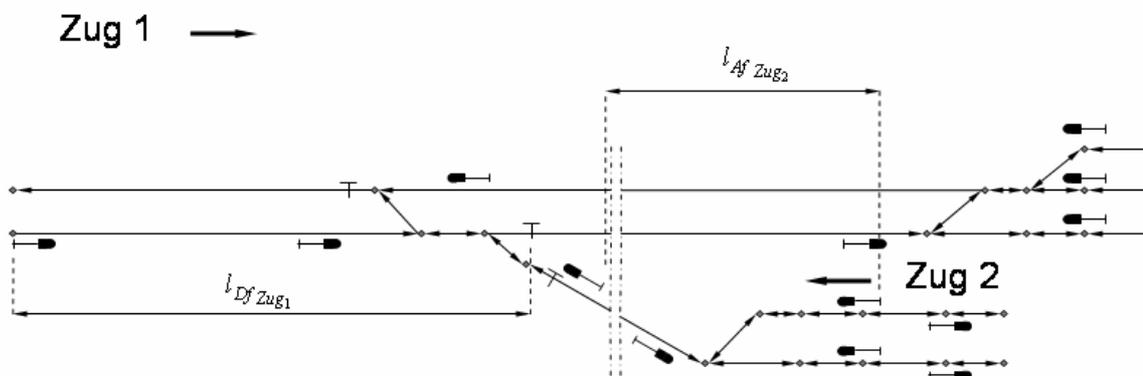


Abbildung 16: Schematische Darstellung der Konfliktsituation für Kreuzungskonflikte – kreuzender Zug „nachfolgend“

Bei der Modellierungsphilosophie mit „stellenweise gleisgenauer Abbildung“ werden Konflikte an Abzweigstellen durch Konflikte zwischen unterschiedlichen Fahrweisen von Zugtypen (siehe 2.2.4) dargestellt. Für jeden Zugtyp werden bis zu vier verschiedene vorgegebene Fahrweisen unterschieden (siehe 2.2.4), die angeben, ob der jeweilige Zug an diesem Abzweig geradeaus fährt oder abzweigt. Neben den üblichen Einflüssen auf die Blocksperrzeit ist in solchen Fällen insbesondere auch auf die

Berücksichtigung der durch Abzweig zusätzlich vorhandenen Sperrzeiteinflüsse, wie z.B. die Weichenumlaufzeit und eine abweichende Fahrstraßenauflösezeit, zu achten.

- Bereiche mit drei Gleisen

Bei dreigleisigen Streckenabschnitten ist in Einzelfällen eine Aufteilung in eine zwei- und eine eingleisige Strecke anwendbar, wenn lange Abstände zwischen Überleitstellen bzw. deutliche Unterschiede in der Infrastrukturausstattung (z.B. Elektrifizierung, zulässige Höchstgeschwindigkeit, etc.) zwischen den Gleisen die Kapazitätseffekte durch die Trennung realistisch wiedergeben. In allen anderen Fällen kann eine gleisgenaue Darstellung Abhilfe schaffen – unter Inkaufnahme einer Vergrößerung des Modellumfangs.

Eine spezielle Berücksichtigung dieser Bereiche ist bislang im Modell nicht vorgesehen.

- Bereiche mit vier Gleisen

Üblicherweise können viergleisige Strecken durch die ersatzweise Abbildung als zwei parallele Strecken dargestellt werden. Dies funktioniert bei Richtungsbetrieb allerdings nicht. Dort ist – insbesondere bei relativ kurzen Abständen zwischen Überleitstellen – eine gleisgenaue Darstellung sinnvoller, auch wenn die dazu notwendigen zusätzlichen Knoten und Kanten die Modellgröße erhöhen.

Eine spezielle Berücksichtigung dieser Bereiche ist bislang im Modell nicht vorgesehen.

- Gleiswechselbetrieb und fliegende Überholung

Diese Betriebsarten können bislang im Modell nur indirekt abgebildet werden. Dies geschieht in den Fällen, in denen eine Abbildung dieser Betriebsarten für die Fahrplangestaltung unabdingbar ist, durch die Verwendung einer gleisgenauen Darstellung für die davon betroffenen Strecken. Allerdings ist damit eine Vergrößerung des Modellumfangs einhergehend.

## 2.2.3 Bahnhöfe

### 2.2.3.1 Grundlagen

Bahnhöfe und weitere Betriebsstellen (wie z.B. Abzweigstellen), an denen sich die Reihenfolge der Züge im Planfall ändern kann, werden als Knoten in der hier vorliegenden Modellierung abgebildet. Zur Beschreibung ihrer Eigenschaften, insbesondere der verfügbaren Kapazitäten, werden einzelne Parameter verwendet. Die genaue Lage und Art von Gleisen in den Bahnhöfen wird dagegen grundsätzlich nicht extra modelliert. Ggf. können Teile eines größeren Bahnhofs durch einzelne Knoten dargestellt werden, um Fahrtenausschlüsse und besondere Zusammenhänge abbilden zu können.

Grundsätzlich wird im Modell zwischen Kopf- und Durchgangsbahnhöfen unterschieden. Dazu kommen als dritte Gruppe noch alle sonstigen relevanten Betriebsstellen, an denen sich die Reihenfolge der Züge ändern kann, aber in denen Züge keine Haltemöglichkeiten haben, wie z.B. Abzweig- und Kreuzungsstellen auf der freien Strecke.

Als Durchgangsbahnhof werden alle Bahnhöfe modelliert, an denen Züge von einer angrenzenden Strecke auf mindestens eine andere an diesem Bahnhof angrenzende Strecke fahren können, ohne eine Zugwendung durchführen zu müssen. Diese Bahnhöfe besitzen im Modell zwei Knotenseiten. Jede der angrenzenden Strecken wird dabei jeweils einer der beiden Knotenseiten zugeordnet. Dabei gilt die Prämisse, dass Kanten, bei denen zur gegenseitigen Erreichbarkeit eine Zugwendung im Bahnhof notwendig ist, derselben Knotenseite zugeordnet werden. Bei Durchfahrtmöglichkeiten zwischen zwei Kanten im Bahnhof, die ohne Wendung auskommen, müssen diese Kanten dagegen verschiedenen Bahnhofsseiten zugeordnet werden.

Züge, die von einer Kante zu einer anderen Kante derselben Knotenseite fahren, müssen im Bahnhof mindestens solange halten, wie die zugehörige zugtyp- und bahnhofsabhängige Wendezeit angibt. Besteht im Bahnhof für diesen Zugtyp keine Haltemöglichkeit, so kann ein Zug dieses Zugtyps auch keine Wendung durchführen.

Kopfbahnhöfe besitzen im Gegensatz dazu nur eine Knotenseite, um abzubilden, dass alle Züge dort vor ihrer Weiterfahrt eine Wendung durchführen müssen.

Die sonstigen Betriebsstellen werden grundsätzlich mit zwei Knotenseiten modelliert. Allerdings bestehen in diesen Knoten keine Haltemöglichkeiten für

Züge, so dass in diesen Knoten auch keine Zugwendungen durchgeführt werden können. Die Abbildung der sonstigen Betriebsstellen ist dabei grundsätzlich gleich, egal ob die Betriebsstellen dabei aus einer oder mehreren Gruppen von Weichen bestehen, nur eine Einzelweiche umfassen, oder auch einen Fahrzeitmesspunkt darstellen.

Diese Art von Knoten – auch als Pseudoknoten bezeichnet – dient demzufolge zur Modellierung von Abzweig- und Kreuzungsstellen auf der freien Strecke. Außerdem können Pseudoknoten auch zur Abbildung von Erreichbarkeitsausschlüssen in Bahnhöfen und für die Unterteilung größerer Bahnhöfe in Bahnhofsteile genutzt werden. Allerdings sind auch hierbei immer die realisierte sowie die erforderliche Abbildungstiefe und der dafür jeweils erforderliche Lösungsaufwand für das mathematische Optimierungsproblem gegeneinander abzuwägen.

Im Bahnhof haltende Züge verbleiben so viele Zeiteinheiten im Bahnhof, bis ihre jeweilige Haltezeit abgelaufen ist. Durchfahrende Züge befinden sich nur während genau einer Zeiteinheit im jeweiligen Bahnhof. Dies ist bei der Überprüfung der Kapazitätsbedingungen zu beachten. Außerdem sind die Fahrzeiten innerhalb des Bahnhofbereiches in die Fahrzeiten für die jeweiligen Streckenabschnitte mit eingerechnet.

### **2.2.3.2 Kapazitäten**

Für jeden Bahnhof wird ein Vektor mit Knotenkapazitäten angegeben. Dieser enthält für die einzelnen Zugtypen (siehe Kapitel 2.2.4) die Anzahlen der jeweils gleichzeitig nutzbaren Gleise für Halten bzw. Durchfahren sowie die erlaubte Gesamtanzahl der maximal gleichzeitig im Bahnhof haltenden sowie durchfahrenden Züge dieses Zugtypen. Diese Angaben stellen dabei die unter Berücksichtigung von Fahrtenausschlüssen und gegenseitigen Behinderungen praktisch nutzbaren Kapazitäten und nicht unbedingt die tatsächlich vorhandenen Gleiszahlen dar. Außerdem können die Kapazitätsparameter auch für die beiden Richtungen im Bahnhof unterschiedlich angegeben werden.

Bei der Interpretation dieser Angaben ist die Hierarchie der Zugtypen (siehe Kapitel 2.2.4) zu berücksichtigen. Das bedeutet, dass beim Test der Einhaltung der Kapazitätsparameter für einen Zugtyp auch alle an diesem Bahnhof haltenden und durchfahrenden Züge der untergeordneten Zugtypen mitgezählt werden müssen. Dies wird hier am Beispiel eines fiktiven Bahnhofs, dargestellt in Abbildung 17, näher erläutert.

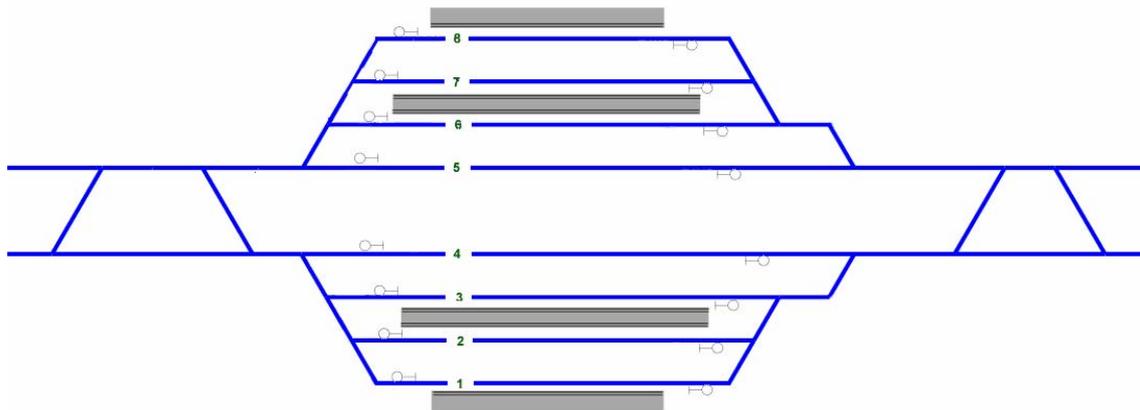


Abbildung 17: Spurplandarstellung für fiktiven Beispielbahnhof (eigene Darstellung)

Wie man in Abbildung 17 erkennen kann, ist der Beispielbahnhof ein symmetrisch aufgebauter Bahnhof mit einem durchgehenden Streckengleis als reinem Durchfahrtsgleis und 3 Bahnsteiggleisen unterschiedlicher Nutzlänge je Richtung. Die vorhandenen Weichenverbindungen erlauben das jeweilige Erreichen von allen Bahnsteiggleisen aus den beiden Durchfahrtsgleisen. Allerdings wird das zweimalige Kreuzen der Gegenrichtung aufgrund der dafür notwendigen großen Sperrzeiten nur in Ausnahmefällen praktiziert. Unter Berücksichtigung der in Abbildung 18 in Kapitel 2.2.4 dargestellten Zugtyp-Hierarchie ergeben sich damit die in Tabelle 1 aufgelisteten richtungsbezogenen Kapazitätsparameter. Dabei ist zu beachten, dass für die in der rechten Spalte abgebildeten Züge einzelner Baureihen keine separaten Kapazitätsparameter erforderlich sind. Außerdem muss der Tatsache Rechnung getragen werden, dass manche Zugtypen aufgrund ihrer Länge nicht in allen Haltegleisen halten können. Für einzelne Zugtypen können auch die Fahrzeitverluste durch stark verringerte Weichenabzweiggeschwindigkeiten dazu führen, dass bestimmte Haltegleise von diesen Zügen nicht verwendet werden. Für durchfahrende Züge werden bei der Bestimmung der Kapazitätsparameter nur die tatsächlich parallel verwendbaren Fahrstraßen im Bahnhof, also meist beschränkt auf die reinen Durchfahrtsgleise, berücksichtigt.

Für dieses Beispiel wurden zur besseren Übersicht nur die richtungsbezogenen Kapazitäten angegeben (siehe Tabelle 1). Die Gesamt-Kapazitätsparameter können aus den richtungsbezogenen Kapazitätsparametern durch Verdopplung der in Tabelle 1 dargestellten Zahlen ermittelt werden. Dies ist deshalb möglich,

da der Beispielbahnhof symmetrisch ist. Dabei werden aber die auf der jeweils „falschen“ Bahnhofsseite gelegenen Gleise nicht berücksichtigt, da ein Kreuzen der Gegenrichtung zwar möglich wäre, es aber aufgrund der dafür notwendigen großen Sperrzeiten nur in seltenen Fällen, die nicht der Fahrplanerstellung zugrunde liegen sollten, praktikabel ist. Demzufolge fließen die nur durch ein Kreuzen der Gegenrichtung erreichbaren Gleise nicht in die Bestimmung der Kapazitäten ein.

Tabelle 1: Beispiel für richtungsbezogene Kapazitätsparameter

Zugtyp	richtungsbezogene Kapazitätsparameter		
	alle Gleise	Durchfahrtsgleise	Haltegleise
alle Zugtypen (alleZT)	4	1	3
SPV	4	1	3
SPFV	3	1	2
ICE	2	1	1
IC	3	1	2
SPNV	4	1	3
RE	4	1	3
RB	4	1	3
SB	4	1	3
GV	1	1	0 <sup>1</sup>

Das bedeutet in diesem Beispiel, dass in Fahrtrichtung von Knotenseite 1 nach Knotenseite 2 maximal ein ICE und ein IC oder alternativ zwei IC gleichzeitig halten können. In diesem Fall bleibt aber für einen Nahverkehrszug, beispielsweise einen RE, nur ein Gleis übrig. Ein weiterer Nahverkehrszug findet dann noch Platz, wenn lediglich ein Fernverkehrszug hält. Wenn kein Fernverkehrszug in dieser Richtung hält, dann können in diesem Fall sogar bis zu drei Nahverkehrszüge am Beispielbahnhof in der angegebenen

---

<sup>1</sup> Zur Vereinfachung wurden Güterzüge für diese Beispielrechnung nicht berücksichtigt.

Fahrtrichtung halten.

Zur Verdeutlichung dieser Zusammenhänge sind in Tabelle 2 einzelne Beispiele für die Belegung des Bahnhofs mit haltenden Personenzügen und ihre Auswirkungen auf die Kapazitäten im Vergleich mit den ermittelten richtungsbezogenen Kapazitätsparametern angegeben. Dabei sind hier nur haltende Züge des Personenverkehrs für eine Richtung betrachtet worden. Für die unzulässigen Beispiele, die die Kapazitätsbedingungen nicht erfüllen, sind diejenigen Vergleichswerte markiert, bei denen die zulässigen Kapazitätsparameter überschritten werden.

Tabelle 2: Auswirkungen beispielhafter Belegungen auf die Kapazitätsbetrachtung

Beispiele für haltende Züge	Vergleichswerte der einzelnen Ungleichungen für die Kapazitätsprüfung für Haltekapazitäten									Zulässigkeit der Beispiele
	alleZT	SPV	SPFV	ICE	IC	SPNV	RE	RB	SB	
1 ICE + 1 IC + 1 RE	3	3	2	1	1	1	1	0	0	zulässig
2 ICE + 1 RE	3	3	2	2	0	1	1	0	0	unzulässig
2 IC + 1 RE	3	3	2	0	2	1	1	0	0	zulässig
1 ICE + 2 IC	3	3	3	1	2	0	0	0	0	unzulässig
1 ICE + 2 RE	3	3	1	1	0	2	2	0	0	zulässig
1 ICE + 1 IC + 2 RE	4	4	2	1	1	2	2	0	0	unzulässig
1 ICE + 1 RE + 1 SB	3	3	1	1	0	2	1	0	1	zulässig
1 ICE + 1 RE + 1 RB + 1 SB	4	4	1	1	0	3	1	1	1	unzulässig
1 RE + 1 RB 1 SB	3	3	0	0	0	3	1	1	1	zulässig

Züge, die in einem Bahnhof eine Zugwendung durchführen, werden für die Dauer der Wendezeit (siehe Kapitel 2.2.3.3) als haltende Züge in ihrer ursprünglichen Richtung gezählt. Für die letzte Zeiteinheit der Wendezeit sind sie dann für die Kapazitätsprüfungen als durchfahrende Züge in ihrer neuen Richtung zu berücksichtigen.

### 2.2.3.3 Wendezeiten

Wenn ein Zug den Bahnhof wieder über eine Kante verlässt, die derselben Knotenseite (siehe Kapitel 2.2.3.1) des Bahnhofes zugeordnet ist, wie die Kante über die er in den Bahnhof eingefahren ist, muss er eine zugtyp- und bahnhofsabhängige – sowie bei Bedarf auch richtungsabhängige – Mindesthaltezeit abwarten. Diese repräsentiert die erforderliche Zeit für alle zum Durchführen einer Zugwendung notwendigen Handlungen zuzüglich der durchschnittlichen Wartezeit, die aus statistischen Untersuchungen unter Einbeziehung der örtlichen Gegebenheiten und der Möglichkeiten des jeweiligen Zuges ermittelt wurde.

### 2.2.4 Züge und Zugtypen

Für Zwecke der Fahrplanerstellung und Betriebsuntersuchungen werden gleichartige Züge in Zugtypen (ZT) eingeteilt. Berücksichtigt werden dabei alle Züge, die für die Trassenvergabe relevant sind.

Ein Zugtyp stellt eine Zusammenfassung von Zügen mit ähnlichen Eigenschaften und ähnlichen Aufgaben dar. Jeder Zugtyp wird durch einen Modellzug repräsentiert, der die relevanten Eigenschaften der mit einem Zugtyp beschriebenen Züge darstellt. Dieser Modellzug wird für die Berechnungen von Fahrzeiten u.ä. verwendet. Das Ziel dieser Zusammenfassung der einzelnen Züge zu Zugtypen ist die Verringerung des Berechnungsaufwandes durch Standardisierung.

Aufgrund der für diese Modellierung notwendigen Abstrahierung werden auch hier die verschiedenen individuellen Züge in Zugtypen eingeteilt. Die Einteilung in Zugtypen erfolgt anhand folgender Merkmale

- ähnliche fahrdynamische Charakteristika
- gleiche sicherungstechnische Ausstattung
- gleiche Halte an Haltepunkten in den Streckenabschnitten
- gleiche Verkehrsart (SPFV, SPNV, SGFV, SGNV, ...)
- ähnliche verkehrliche Bedeutung

Wie die Züge eingeteilt und welche Züge den einzelnen Zugtypen zugeordnet werden, ist im Einzelfall zu prüfen. Dabei sind auch die anderen Diskretisierungsaspekte (siehe Kapitel 2.2.1) zu berücksichtigen.

Die Parameter des Modellzuges, der den Zugtyp repräsentiert, werden so

---

Möglichkeiten und Grenzen der Modellierung des Bahnbetriebes mit planerischen Zugfolgezeiten

gewählt, dass dessen Fahrdynamik und sicherungstechnische Ausstattung von allen Zügen des Zugtyps mindestens erreicht werden.

Für jeden Streckenabschnitt werden standardisierte Fahrweisen (als Beispiel siehe auch Abbildung 8) für jeden Zugtyp vorgegeben. Im praktischen Betrieb hat aber auch das individuelle Verhalten der Triebfahrzeugführer einen starken Einfluss auf die gefahrenen Fahrzeiten. Im Rahmen der Fahrplanung wird daher von einem Standardverhalten ausgegangen, das von allen ausreichend trainierten Triebfahrzeugführern eingehalten werden kann.

Diese Vorgaben für die standardisierten Fahrweisen werden hier als Fahrprofile bezeichnet und für jeden Zugtyp individuell vorgegeben in Abhängigkeit von:

- Höchstgeschwindigkeit und Fahrdynamik des Modellzuges
- Höchstgeschwindigkeitsprofil des Streckenabschnittes
- Steigungsprofil des Streckenabschnittes
- verfügbare Sicherungstechnik
- Halteprofil im Streckenabschnitt

Dabei werden je nach den Gegebenheiten im Streckenabschnitt und den angrenzenden Knoten bis zu vier verschiedene Fahrprofile für einen Zugtypen unterschieden. Die Unterscheidung erfolgt entweder anhand des Halteprofils im Ausgangs- und Endbahnhof des Streckenabschnittes oder anhand des Abzweigeverhaltens, wenn der Start- und / oder Endknoten durch einen Pseudoknoten modelliert wird.

Dies wird aufgrund der teilweise signifikanten Unterschiede zwischen diesen verschiedenen Fahrweisen erforderlich. Allerdings vergrößert sich die Problemgröße dadurch auch deutlich. Im Maximalfall, wenn man für jeden Zugtyp in jedem Abschnitt jeweils vier Fahrprofile betrachtete, würde sich die Problemgröße versechzehnfachen, da sich für jeden Zugtyp aufgrund der Kombination der vier verschiedenen Fahrweisen 16 mal mehr Zugfolgefälle ergeben.

Als Alternative ist die Bestimmung der Parameter für alle relevanten Fahrprofile mit anschließender Verwendung nur des maximalen Wertes für den jeweiligen zugtypenabhängigen Parameter möglich. Diese Betrachtungsweise sorgt dafür, dass sich die Problemgröße gegenüber der Betrachtung nur jeweils eines Fahrprofils je Zugtyp nicht vergrößert und dass trotzdem die Effekte der verschiedenen Fahrprofile berücksichtigt werden. Allerdings kommt es durch die Verwendung des jeweiligen Maximalwertes dazu, dass die Fahrzeit- und

Zugfolgezeit-Parameter in den meisten Fällen überschätzt werden, was zu einer Verringerung der verwendbaren Kapazität im betrachteten Streckennetz führt.

#### **2.2.4.1 Einteilung der Fahrzeuge in eine Zugtypen-Hierarchie**

Insbesondere die planerischen Zugfolgezeiten, deren Anzahl je Streckenabschnitt vom Quadrat der dort zu berücksichtigenden Zugtypen abhängt, erhöhen den Datenaufwand bei steigender Anzahl verwendeter Zugtypen. Um die Zahl der je Abschnitt bzw. Bahnhof zu verwendenden Daten zu begrenzen, kann daher nur eine eingeschränkte Auswahl aus der Gesamtheit der verwendeten Zugtypen genutzt werden. Analog verhält es sich für die verwendeten Daten zur Beschreibung der Bahnhöfe.

Grundsätzlich gilt, dass die Auswahl so genau wie nötig, aber gleichzeitig so allgemein wie möglich erfolgen soll. Das bedeutet beispielsweise, dass auf einem Streckenabschnitt mit begrenzter Höchstgeschwindigkeit – wie z.B. der Berliner Stadtbahn – die Unterschiede in der Fahrzeit (und den planerischen Zugfolgezeiten) zwischen einem ICE und einem IC vernachlässigbar sind, so dass in diesem Fall statt der individuellen Angabe der – in diesem Fall identischen – Fahrzeiten von ICE und IC auch eine zusammengefasste Angabe für einen „Personenfernverkehrszug“ (PFV-Zug) ausreichend ist.

Unter Berücksichtigung dieser Prämissen werden alle verwendeten Zugtypen in diese Hierarchie, die als Baumstruktur – angefangen von abstrahierten allgemeinen Zugtypen in der Wurzel hin zu den spezifischen Zugtypen in den untergeordneten Elementen – dargestellt werden kann, eingeordnet (siehe Abbildung 18). Dabei gilt, dass für alle Streckenabschnitte die planerischen Fahr- und Zugfolgezeiten für alle Zugfolgefälle des ursprünglichen Zugtypen kleiner oder gleich der planerischen Fahr- und Zugfolgezeiten der übergeordneten – also allgemeineren bzw. abstrahierteren – Zugtypen sein müssen.

Weil die dafür notwendigen Berechnungen durch die große Menge an Daten sehr aufwändig sind, kann durch den Vergleich der fahrdynamischen Parameter des ursprünglichen Zugtypen und des jeweiligen übergeordneten Zugtypen diese Abschätzung vorgenommen werden. Die dafür relevanten Parameter sind Tabelle 3 zu entnehmen. Für Bahnhöfe können neben diesen Parametern z.B. auch die notwendige Bahnsteighöhe und die Verfügbarkeit einer signaltechnischen Ausstattung für Train-Coupling- and –Sharing o.ä. relevant sein.

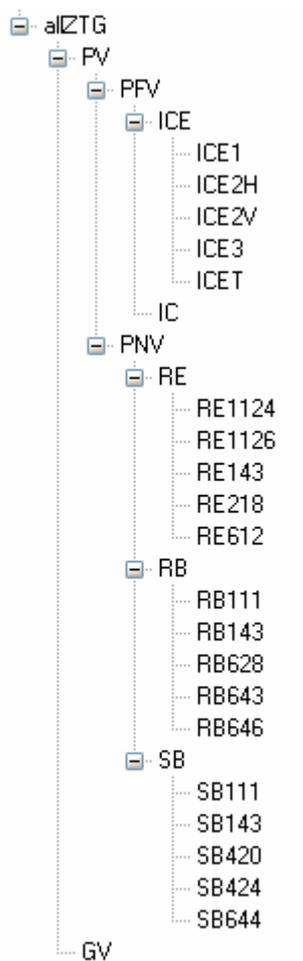


Abbildung 18: Beispiel für eine Hierarchie der Zugtypen (siehe Tabellen A1 – A4 im Anhang)

Tabelle 3: Vergleich von fahrdynamischen Parametern zwischen Zugtypen innerhalb der Zugtypen-Hierarchie

Fahrdynamische Parameter	Vergleich zwischen untergeordneten und übergeordneten Zugtypen
Zuglänge	größere bestimmend
Ausstattung mit Leit- und Sicherungstechnik	geringere bestimmend
Höchstgeschwindigkeit	geringere bestimmend
Bremsvermögen	geringeres bestimmend
Beschleunigungsvermögen	geringeres bestimmend

Für abstrahierte Zugtypen, wie z.B. einen Zugtyp Personenfernverkehrszug, wird für jeden relevanten Parameter der kleinste gemeinsame Nenner der untergeordneten Zugtypen verwendet. Für das Beispiel des PFV-Zuges könnte dies bedeuten, dass z.B. die Zuglänge eines ICE der BR 402 (410 m), die Höchstgeschwindigkeit eines IC mit 6 Wagen und einer Lok der BR 112 (160 km/h), sowie das Beschleunigungs- und Bremsvermögens eines IC mit 12 Wagen und einer Lok der BR 101 relevant sind.

Als Alternative können auch alle notwendigen Parameter für jeden untergeordneten Zugtypen berechnet werden, wobei für den abstrahierten Zugtypen dann der jeweils maximale Wert verwendet wird. Dabei muss bei den Zugfolgezeiten z.B. darauf geachtet werden, dass sämtliche Zugfolgefälle aus Kombinationen von untergeordneten Zugtypen berücksichtigt werden. Andernfalls könnten die ermittelten maximalen Zugfolgezeiten kleiner sein als tatsächlich auftretende Zugfolgezeiten zwischen Zügen, die von diesem abstrahierten Zugtypen repräsentiert werden sollen.

Diese Herangehensweise führt aber, insbesondere bei größeren Netzen und umfangreicheren Zugtyp-Hierarchien, zu einem immensen Rechenaufwand für die Bestimmung aller erforderlichen Parameter der untergeordneten Zugtypen, nur um diese dann wieder für die mathematische Optimierung auf eine handhabbare Größenordnung zu reduzieren. Da sich diese Berechnungen aber sehr gut parallel durchführen lassen, ist dieser Einwand – gerade vor dem Hintergrund des aktuellen Trends zu einer immer stärkeren Verwendung von Multicore-Architekturen im Hardwaredesign – als weniger schwerwiegend anzusehen.

Bei stärker abstrahierten Zugtypen, die eine Vielzahl unterschiedlicher Züge repräsentieren, ist zu beachten, dass auch größere Ungenauigkeiten entstehen können (siehe auch Kapitel 4.2.1). Durch die größere Zahl an unterschiedlichen Zugfolgefällen, die dann durch eine einzige Zugfolgezeit eines abstrahierten Zugtypen beschrieben wird, ist die Auswirkung einer in der Realität möglicherweise sehr seltenen, aber ungünstigen Abfolge von Zügen deutlich größer als bei einer weniger abstrahierten Einteilung der Züge. Das kommt daher, dass die größte Zugfolgezeit dann maßgeblich für alle Zugfolgefälle der durch den abstrahierten Zugtypen beschriebenen Züge ist, und nicht nur für den jeweils relevanten Zugfolgefall Anwendung findet.

Da im Zweifelsfall immer der jeweils maximale Wert bei der Zusammenfassung verwendet wird, sind die für abstrahierte Zugtypen verwendeten Zugfolgezeiten tendenziell größer als bei weniger stark zusammengefassten Zugtypen. Dies

führt dann auch dazu, dass die im Modell verfügbare Kapazität kleiner ist als bei Verwendung von weniger stark abstrahierten Zugtypen.

#### **2.2.4.2 Fahrweisen-Alternativen**

Zur Berücksichtigung der Harmonisierung im Betrieb können zusätzlich zu der Zugtypen-Hierarchie für einzelne Züge Fahrweisen-Alternativen angegeben werden. Z.B. könnte es auf Streckenabschnitten der SFS Berlin-Hannover für einige ICE notwendig sein, diese an das Fahrprofil von vorausfahrenden IC anzupassen, um passende Trassen finden zu können. Durch diese Geschwindigkeitsharmonisierung kann dann eine ausreichende Leistungsfähigkeit auf diesem Abschnitt erreicht werden.

Dabei gelten dieselben Restriktionen hinsichtlich der Fahrzeiten und planerischen Zugfolgezeiten wie bei der Einordnung der Zugtypen in die Zugtyp-Hierarchie. Analog dazu können zur Auswahl einer geeigneten Alternative für einen ursprünglichen Zugtyp die in Tabelle 3 angegebenen Parameter verwendet werden. Die Fahrweisen-Alternative ist dabei für die Angabe des Vergleichsparameters in der 2. Spalte der Tabelle mit dem übergeordneten Zugtypen gleichzusetzen.

Zur Bestimmung der alternativen Fahrweisen ist es nötig, dass im Zweifelsfall aber die errechneten Fahr- und Zugfolgezeiten der beiden Zugtypen für alle Streckenabschnitte miteinander verglichen werden. Für eine echte Fahrweisen-Alternative müssen alle Fahrzeiten sowie alle Zugfolgezeiten für die vergleichbaren Zugfolgefälle zu anderen Zugtypen für den als Fahrweisen-Alternative getesteten Zugtypen größer als oder gleich den Fahr- und Zugfolgezeiten des ursprünglichen Zugtypen sein.

Deshalb sind Fahrweisen-Alternativen zwischen beliebigen Zugtypen nur schwer konsistent für alle Streckenabschnitte durchzuhalten. Als allgemeine Alternative sind aber grundsätzlich die übergeordneten Zugtypen verwendbar.

Ggf. kann man partielle Fahrweisen-Alternativen nutzen, bei denen die Alternative nur für bestimmte Streckenabschnitte gültig ist. Dies erfordert allerdings einen deutlich größeren Aufwand für die anzugebenden Parameter und für die Umsetzung dieser partiellen Fahrweisen-Alternativen im mathematischen Optimierungstool.

## 2.3 Eingangsdaten und Rahmenbedingungen

### 2.3.1 Eingangsdaten

Zur Bestimmung der Parameter für die hier beschriebene Modellierung sind grundsätzlich dieselben Eingangsdaten notwendig, wie sie auch für mikroskopische Eisenbahnbetriebssimulationsprogramme verwendet werden. Übersichten über notwendige Daten für mikroskopische Eisenbahnbetriebssimulationen können z.B. [Schultz 1999], [Hürlimann 2001] oder [Radtke 2005] entnommen werden. Je nach Anwendungszweck können teilweise Abstriche in der Genauigkeit der Eingangsdaten hingenommen werden. Die Auswirkungen unterschiedlich genauer bzw. nicht verfügbarer Eingangsdaten auf die Genauigkeit der ermittelten Ergebnisse werden in Kapitel 4 näher untersucht.

#### 2.3.1.1 Infrastrukturdaten

##### Topologie:

Die Grundlage für die Darstellung der Infrastrukturdaten bilden die Topologiedaten, die die Netzzusammenhänge der Infrastruktur erkennen lassen. Diese werden üblicherweise als Graphenmodell mit Knoten und Kanten modelliert. Aufgrund der Topologiedaten wird die Einteilung der abzubildenden Infrastruktur in die Knoten und Kanten des Modells vorgenommen. Je nach Detaillierungsgrad können Bahnhöfe, Abzweigstellen auf der freien Strecke, ggf. Bahnhofsteile bzw. Weichengruppen und auch einzelne Weichen Knoten in einem solchen Netzgraphen sein. Zwischen den Knoten werden gerichtete Kanten verwendet. Diese stellen je nach Detaillierungsgrad einzelne Gleise oder Strecken dar.

Die Topologiedaten dienen dabei als Ordnungsrahmen, auf den sich alle anderen Infrastrukturdaten beziehen. Zu den erforderlichen Topologiedaten gehören:

- eindeutiges Identifikationsmerkmal (ID),
- Art des Infrastrukturmerkmals (z.B. Durchgangsbahnhof, Einzelweiche, mehrgleisige Strecke, Gleis, etc.),
- Längenangaben für den Koordinatenbezug im Streckenverlauf,
- ggf. Koordinatenangaben für graphische Darstellungen der Knoten sowie
- Anzahl der parallelen Streckengleise von Streckenabschnitten.

### Topographie:

Die topographischen Daten sind hauptsächlich für die Bestimmung der Fahrzeiten erforderlich und sind im Wesentlichen durch die Trassierung der Infrastruktur bestimmt. Dazu zählen insbesondere:

- Höchstgeschwindigkeitswechsel,
- Steigungswechsel,
- Krümmungswechsel,
- Positionen von Tunnelanfang bzw. –ende sowie zugehörige Tunnelquerschnitte.

Für genauere Berechnungen der Fahrzeiten, die über das hier erforderliche Maß hinausgehen, können auch Angaben zu:

- Radien,
- Übergangsbögen,
- Überhöhungen sowie
- Ausrundungsradien von Steigungswechseln

von Interesse sein.

### Sicherungstechnik:

Die sicherungstechnische Ausstattung der Infrastruktur bestimmt neben ihrem Einfluss auf die erzielbaren Fahrzeiten (insbesondere durch die jeweilige Sicherungstechnik bedingte Höchstgeschwindigkeitsbeschränkungen) hauptsächlich die notwendigen Zugfolgezeiten zwischen den Zügen. Außerdem wird durch die vorhandene Sicherungstechnik die Auswahl der verwendbaren Fahrwege der Züge festgelegt.

Zu den dazu benötigten Daten zählen:

- Art der Leit- und Sicherungstechnik,
- Stellwerksart und zugehörige Parameter (Fahrstraßenbildezeit, Fahrstraßenauflösezeit, Sichtzeit, Reaktionszeit, etc.),
- Signalstandorte mit Angaben zur Art des jeweiligen Signals,
- Lage von Gleisfreimeldeeinrichtungen (Auflösekontakte, Achszähler, Gleisstromkreise, etc. ),
- ggf. Positionen bzw. Längen von Blockabschnitten,

- ggf. Lage von LZB-Blöcken sowie
- ggf. Positionen von Euro-Balisen für ETCS.

Zu den Angaben für die Leit- und Sicherungstechnik ist zu beachten, dass ggf. auch unterschiedliche Systeme parallel vorhanden sein können.

#### weitere Merkmale:

Diese dienen hauptsächlich zur Ermittlung der Zulässigkeit der Nutzung von Streckenabschnitten für die verschiedenen Zugtypen. Dazu zählen insbesondere:

- Elektrifizierung ggf. mit Art des Stromsystems,
- Lichtraumprofil sowie
- Streckenklasse.

#### Bahnhöfe:

Bahnhöfe stellen komplexe Anforderungen an die zu ihrer Abbildung notwendigen Daten. Für Detailuntersuchungen erforderlich sind:

- ein eindeutiges Identifikationsmerkmal (ID),
- Lage,
- Art,
- verkehrliche Bedeutung,
- Art und Anzahl der vorhandenen Gleise, sowie deren Eignung für die verschiedenen Zugarten,
- Erreichbarkeiten von Gleisen,
- Lage von Fahrstrassen und Fahrstraßenausschlüsse sowie
- zulässige Geschwindigkeiten im Bahnhofsbereich und Abzweiggeschwindigkeiten der Weichen.

Diese Angaben sind z.B. schematischen Gleisplänen mit Längenangaben bzw. Lageplänen sowie Unterlagen zur Fahrstraßenlogik der Stellwerke zu entnehmen.

### 2.3.1.2 Fahrzeugdaten

Üblicherweise können die notwendigen Fahrzeugdaten nach Angabe der Zugkonfiguration (Typ / Bezeichnung von Triebfahrzeugen und Wagenmaterial) aus vorhandenen Fahrzeugkatalogen, Typenblättern o.ä. ermittelt werden. Im Einzelnen sind dies:

- fahrdynamische Daten, wie:
  - Zuglänge,
  - zulässige Höchstgeschwindigkeit des Zuges,
  - Zugkraft-Geschwindigkeits-Diagramm,
  - Bremskraft-Geschwindigkeits-Diagramm,
  - Massenkennwerte (Leermasse, Zuladung, Rotationsfaktor, etc.) sowie
  - Fahrwiderstandskennwerte,
- sicherungstechnische Ausstattung:
  - Art der nutzbaren Sicherungstechnik sowie
- verkehrliche Merkmale, wie:
  - Verkehrsart (Personen- / Güterverkehr, Fern- / Nahverkehr, etc.),
  - Traktionsart,
  - benötigtes Lichtraumprofil und
  - erforderliche Streckenklasse (Achs- und Meterlast).

### 2.3.2 Rahmenbedingungen

Die hier entwickelte Modellierung mit planerischen Zugfolgezeiten beruht auf Standardisierung und der Verwendung von Vorgaben und Annahmen, z.B. für Fahrweisen. Sie ist damit für die Ermittlung eines Soll-Zustandes („ex ante“- Betrachtungsweise) gedacht. Diese Modellierung ist deshalb hauptsächlich für das Trassenmanagement und die Fahrplanerstellung sowie für Betriebsanalysen und Fahrplanstudien mit Verwendung von Soll-Fahrweisen verwendbar.

Für die Darstellung eines Ist-Zustandes („ex post“-Betrachtungsweise) ist diese Modellierung nicht geeignet. Eine Abbildung des realen Betriebsgeschehens mit Berücksichtigung von Fahrplanabweichungen und Abweichungen von Soll-Fahrweisen, Störungen des Betriebsablaufes sowie dem individuellen Verhalten der Triebfahrzeugführer ist damit nur eingeschränkt darstellbar. Außerdem ist eine direkte Abbildung von Fahrwegen in Bahnhöfen mit dieser Modellierung auch nur bei sehr feiner Auflösung in kleinen Untersuchungsräumen möglich, so dass sich durch statistische Analysen nicht erfassbare Besonderheiten und Abweichungen nur unter Durchführung kleinräumiger Detailanalysen wichtiger Bahnhöfe berücksichtigen lassen.

## **2.4 Umsetzung der Modellierung in eine Software**

Zur Bestimmung der notwendigen Parameter der hier beschriebenen Modellierung mit planerischen Zugfolgezeiten wurde die Laborversion einer Software entworfen und implementiert. Diese basiert auf einem objektorientierten Datenmodell und wurde in der Programmiersprache C# umgesetzt. Das Datenmodell und die verwendeten Daten beruhen dabei auf SI-Einheiten. Es wurde ein drei-stufiges Programmierkonzept verwendet, das eine Trennung von Rechenkern, Ein- und Ausgabe (I/O) sowie graphischer Benutzerschnittstelle (GUI) vorsieht. Zur Unterstützung dieser Trennung wurden unterschiedliche Namensräume für die verschiedenen Teilbereiche verwendet. Die grundsätzlichen Zusammenhänge sind in Abbildung 19 dargestellt.

### **2.4.1 Rechenkern**

Für die Berechnung der makroskopischen Modellierungsparameter wurde ein mikroskopisches Datenmodell verwendet. Dieses ist auf die einzelnen Streckenabschnitte und Bahnhöfe sowie Auflistungen davon bezogen. Das sich dadurch ergebende Berechnungsproblem lässt sich gut parallelisieren, da für jeden Streckenabschnitt bzw. Bahnhof dieselben Berechnungen unabhängig von anderen Streckenabschnitten / Bahnhöfen durchgeführt werden können. Dies kann durch die Verwendung von Workerthreads zur Berechnung der Daten eines einzelnen Abschnittes / Bahnhofes erfolgen, was aber in der hier beschriebenen Laborversion bislang noch nicht umgesetzt worden ist.

Die Berechnung der Zugfahrt beruht auf der Anwendung der sie beschreibenden Bewegungsdifferentialgleichungen. Diese drücken das Kräftegleichgewicht der am Zug angreifenden Kräfte während einer Zugfahrt (siehe Kapitel 2.2.2.2, Abbildung 7, [Wende 2003]) aus.

# InfraGen

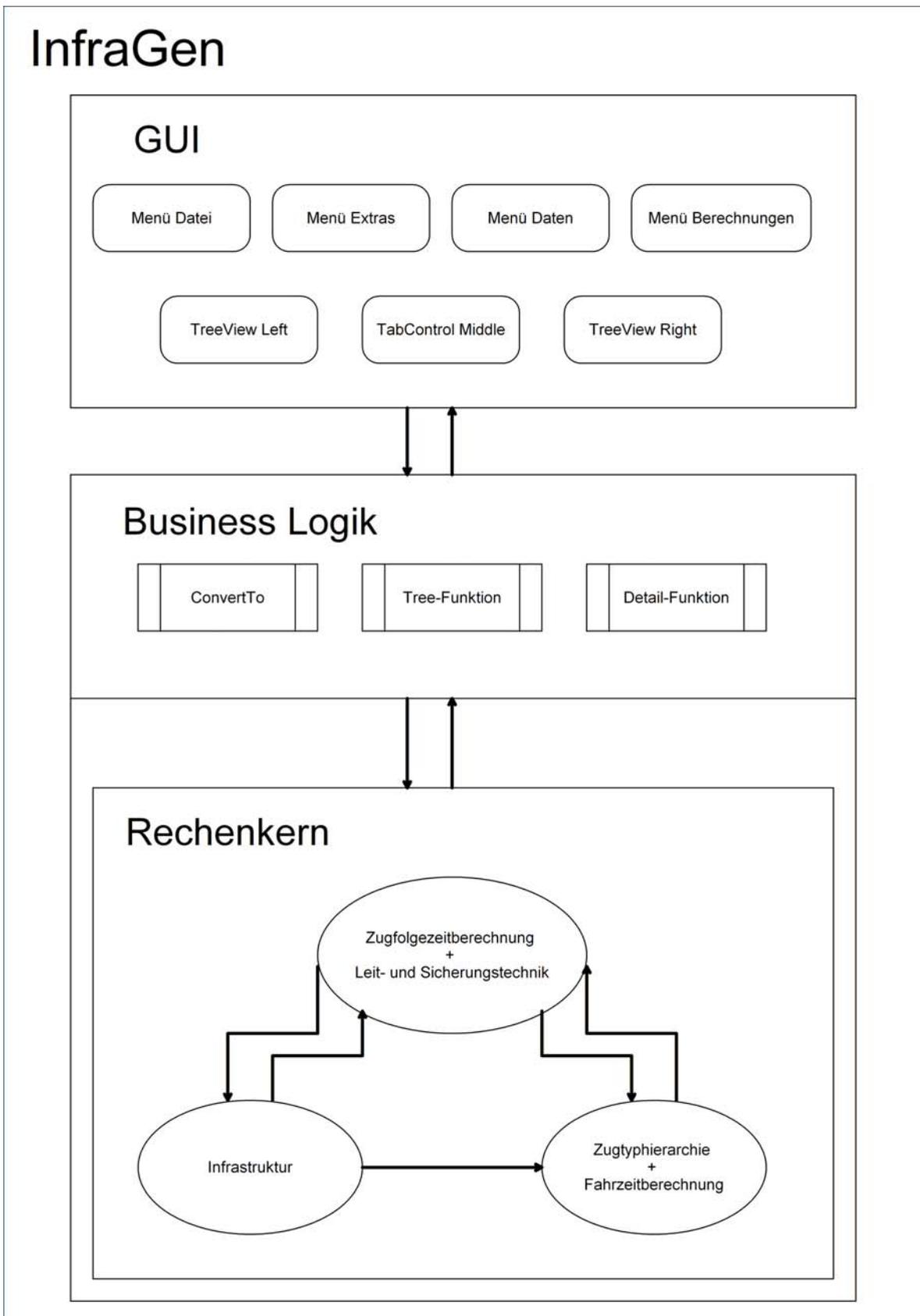


Abbildung 19: Übersichtsdarstellung der Bestandteile von InfraGen

Die Fahrzeitberechnung erfolgt als numerische Lösung der Bewegungsdifferentialgleichungen der Zugfahrt. Das daraus resultierende Anfangswertproblem wird über ein Zeitschrittverfahren berechnet. Bislang wird dafür ein Standard Euler-Verfahren 1. Ordnung ohne Schrittweitensteuerung verwendet. Die Implementierung von Verfahren höherer Ordnung (z.B. Runge-Kutta-Verfahren 4. Ordnung) und / oder einer Schrittweitensteuerung ist vorbereitet. In der einschlägigen Literatur (z.B. [Schwarz 2004]) ist eine Vielzahl von weiteren Lösungsansätzen vorhanden.

Das Grundprinzip der Lösung der Bewegungsdifferentialgleichungen einer Zugfahrt beruht darauf, dass von einem gegebenen Ausgangszustand durch Anwendung der Differentialgleichungen der Zustand für einen in einem geringen zeitlichen Abstand – als Schrittweite „ $h$ “ bezeichnet – liegenden Zeitpunkt geschätzt wird. Je kleiner diese Schrittweite gewählt wird, desto geringer ist der Unterschied zwischen geschätztem und tatsächlichem Zustand zum Zeitpunkt „ $t_0 + h$ “. Durch eine Verbesserung der Schätzmethode kann dieser Unterschied noch weiter verringert werden.

Der so ermittelte geschätzte Zustand für den Zeitpunkt „ $t_0 + h$ “ – als „ $t_1$ “ bezeichnet – dient im nächsten Verfahrensschritt wiederum als Ausgangspunkt für den nächsten Rechenschritt und die Bestimmung des Zustandes für den Zeitpunkt „ $t_1 + h$ “. Dies wird solange fortgesetzt, bis der gesuchte Zeitpunkt bzw. ein gesuchter Zustand erreicht wird.

Dabei ist zu beachten, dass sich die Parameter der Bewegungsdifferentialgleichungen auch zeit-, orts- und zustandsabhängig ändern können. Für die Bewegungsdifferentialgleichungen der Zugfahrt sind hauptsächlich die Änderungen von Zug- oder Bremskraft sowie unterschiedliche Fahrwiderstände zu berücksichtigen.

Für die Lösung der Bewegungsdifferentialgleichungen werden die an der jeweiligen Position gültigen Bedingungen und der jeweilige Belastungszustand (z.B. Fahrwiderstand, Zugkraft, etc.) beachtet. Zum Einsatz kommt ein aus den Bewegungsdifferentialgleichungen 2. Ordnung erzeugtes System von Bewegungsdifferentialgleichungen 1. Ordnung.

Die Parameter, welche die Höhe der Fahrwiderstandskräfte bzw. Zug- und Bremskraft bestimmen, sind dabei so abgebildet, dass bei einer Abfrage des Wertes für eine bestimmte Position bzw. einen bestimmten Zustand genau der dafür relevante Wert zurückgegeben wird. Aus diesem Grund ist es hier nicht notwendig, an Positionen mit Änderungen einzelner Fahrwiderstandsparameter

neue Berechnungsphasen beginnen zu lassen, da die jeweils gültigen Widerstandswerte in der Berechnungsformel automatisch berücksichtigt werden.

Bei der Ermittlung der Fahrzeiten für einen Streckenabschnitt wird ein Fahrprofil bestimmt und nach Reduktion auf die notwendigen Stützpunkte abgespeichert. Dadurch können notwendige Angaben für Fahrzeiten von Teilabschnitten, die gefahrene Geschwindigkeit für eine bestimmte Position sowie Weglängen für Bremsabschnitte im Verlauf des Fahrprofils ohne weitere aufwändige Rechnungen bestimmt werden. Nur für die Bestimmung von Werten außerhalb des Fahrprofils, wie z.B. der jeweilige Bremsweg des Zuges, der für die Ermittlung der Zugfolgezeit bei Einsatz von LZB benötigt wird, müssen separate Berechnungen durchgeführt werden. Das wird für die Berechnung der Zugfolgezeiten ausgenutzt, da diese auf den Fahrzeitberechnungen für entsprechende Teilabschnitte der jeweiligen Streckenabschnitte basiert.

Zur Reduktion des Speicherplatzbedarfes hat es sich bewährt und auch als ausreichend erwiesen, dass die notwendigen Ortskoordinaten als „integer“-Variablen angegeben werden. Die Angabe der Koordinaten erfolgt dabei in [dm]. Genauere Positionsangaben sind deshalb nicht möglich. Dies betrifft insbesondere:

- die Streckenlänge sowie
- die Positionen von:
  - Signalen,
  - LZB-Blockzeichen,
  - Steigungsänderungen,
  - Krümmungsänderungen,
  - Höchstgeschwindigkeitswechseln und
  - Halten.

Die numerischen Berechnungen z.B. der Fahrzeiten erfolgen aber mit höherer Genauigkeit durch die Verwendung von Variablen vom Typ „dezimal“. Vor der Abspeicherung der Werte des Fahrprofils ist eine Konvertierung notwendig, bei der unter Umständen auftretende Wertebereichsüberschreitungen der „integer“-Variablen berücksichtigt werden müssen.

Aus den Angaben zur Höchstgeschwindigkeit des Zuges, dem

---

Möglichkeiten und Grenzen der Modellierung des Bahnbetriebes mit planerischen Zugfolgezeiten

Höchstgeschwindigkeitsprofil und den Halten im Streckenabschnitt wird unter Berücksichtigung der Zuglänge vor der Fahrzeitberechnung ein resultierendes Höchstgeschwindigkeitsprofil bestimmt. Dafür werden alle Positionen von Geschwindigkeitswechseln ggf. auf die Zugspitze umgerechnet, wobei bei Wechseln zu einer höheren zulässigen Streckengeschwindigkeit der Zug mit seinem Zugschluss den Geschwindigkeitswechsel passiert haben muss, bevor er auf die neue Höchstgeschwindigkeit beschleunigen darf. Außerdem sind die Geschwindigkeitsangaben auf das Minimum von Zug- bzw. lokaler Streckenhöchstgeschwindigkeit zu begrenzen sowie Halte durch einen kurzzeitigen Abschnitt mit einer Höchstgeschwindigkeit von 0 m/s darzustellen.

Anhand dieses resultierenden Höchstgeschwindigkeitsprofils wird die Berechnung des Fahrprofils in Phasen zwischen Geschwindigkeitsänderungen im Höchstgeschwindigkeitsprofil eingeteilt. Grundsätzlich wird bis zum Erreichen der jeweiligen Höchstgeschwindigkeit mit maximaler Zugkraft beschleunigt und nach dem Erreichen der Höchstgeschwindigkeit, wenn möglich bis zum Ende der Phase, mit dieser Geschwindigkeit gefahren. Bei einem Höchstgeschwindigkeitswechsel zu einer größeren Höchstgeschwindigkeit wird ausgehend vom letzten berechneten Wert der vorhergehenden Phase weiter beschleunigt.

Bei einem Höchstgeschwindigkeitswechsel zu einer kleineren Höchstgeschwindigkeit wird dagegen geprüft, ob die aktuelle Geschwindigkeit größer als die neue Höchstgeschwindigkeit ist. Wenn die aktuelle Geschwindigkeit kleiner als die neue Höchstgeschwindigkeit ist, wird wie bei einem positiven Höchstgeschwindigkeitswechsel weiter beschleunigt.

Wenn allerdings die aktuelle Geschwindigkeit größer als die neue Höchstgeschwindigkeit ist, dann wird die notwendige Bremsung auf die neue Höchstgeschwindigkeit berechnet. Dies geschieht dadurch, dass eine Bremsphasenberechnung, ausgehend vom Zielpunkt der Bremsung, rückwärts als Beschleunigung bis zum Erreichen der vorher berechneten Fahrkurve durchgeführt wird.

Nach der Berechnung einer Phase werden die berechneten Fahrprofilwerte an das aus den vorhergehenden Phasen ermittelte Fahrprofil angehängt. Nach erfolgter Berechnung einer Bremsphase müssen allerdings die ermittelten Zeiten zu den einzelnen Fahrprofileinträgen der berechneten Bremskurve noch an die Zeiten der bestehenden Fahrprofileinträge angepasst werden. Ggf. muss eine Interpolation des exakten Treffpunktes der beiden zusammenführenden Fahrprofilkurven durchgeführt werden, so dass ein nahtloser Übergang

zwischen den Einträgen aus den aufeinander folgenden Berechnungsphasen entsteht.

Die Berechnungen der Fahrzeiten werden von den Klassen für die Abbildung der Züge aufgerufen. Über das Interface „ITrainDynamics“ werden die verschiedenen grundlegenden Funktionen für den Aufruf unterschiedlicher Berechnungsarten definiert. Diese Funktionen umfassen Berechnungen für:

- Fahrzeit
  - kompletter Streckenabschnitt
  - Teilbereiche eines Streckenabschnittes
  - die Fahrzeitdifferenz zwischen zwei Positionen innerhalb eines Streckenabschnittes
- Weg
  - Bremsweg
  - Beschleunigungsweg
  - Weg zum Erreichen einer bestimmten Endgeschwindigkeit
- Geschwindigkeit
  - aktuelle Geschwindigkeit für eine bestimmte Position
  - erlaubte Höchstgeschwindigkeit für eine bestimmte Position

In den implementierten Klassen zur Abbildung eines Zugtyps werden dann auch die Ergebnisse der Berechnungen im Speicher abgelegt und verwaltet. Jeder Aufruf einer Berechnung prüft zuerst, ob schon geeignete Fahrprofilaten für die gesuchte Kombination aus Zugtyp, Streckenabschnitt und Halteprofil vorhanden sind und ob diese Daten auch noch aktuell sind, also keine Änderungen an den Eingangsdaten nach der Abspeicherung der Fahrprofilwerte durchgeführt wurden. Wenn diese Bedingungen zutreffen, werden die Berechnungsaufrufe aus den schon abgespeicherten Werten ohne großen Rechenaufwand bestimmt.

Die notwendigen fahrdynamischen Angaben für die Modellzüge der Zugtypen sind über das Interface „ItrainDynamics“ festgelegt. Die weiteren vorhandenen Daten sind von der jeweiligen Klasse abhängig. Bisläng sind keine Daten für Einzelwagen modelliert. Die für die Fahrzeit- und Zugfolgezeitberechnung

notwendigen Daten sind jeweils auf den ganzen Zug bezogen. Dazu zählen u.a.:

- Zugkraft-Geschwindigkeits-Diagramm
- Bremskraft-Geschwindigkeits-Diagramm
- Fahrwiderstandsparameter
- Zuglänge
- Höchstgeschwindigkeit des Zuges
- Masse und Rotationsfaktor
- verfügbare leit- und sicherungstechnische Ausstattung des Zuges
- Angabe zur Art des Zuges

Die **Zugfolgezeitberechnungen** werden in speziellen „Headwaytime“-Klassen durchgeführt. Dabei wird auf die Fahrzeitberechnungen in den Zugtypklassen zurückgegriffen. Nach Möglichkeit werden die Werte aus den eventuell schon zwischengespeicherten Fahrprofilen verwendet.

Die Zugfolgezeitenberechnung kann mit verschiedenen Arten von Leit- und Sicherungstechnik umgehen. Die nötigen Angaben sind über das Interface „ITCS“ definiert. Dazu zählen (vgl. dazu [Pachl 2002]):

- Typ des Signalsystems
- Fahrstraßenbildezeit
- Fahrstraßenauflösezeit
- Sichtzeit
- Reaktionszeit
- Weichenumlaufzeit
- Vorsignalabstand
- Durchrutschweg

Die genauen Angaben für die einzelnen Typen können über unterschiedliche Objekte der grundlegenden Klassen oder über abgeleitete Klassen, die auch das Interface „ITCS“ implementieren, dargestellt werden. Bislang wird dabei grundsätzlich nur punktförmige sowie linienförmige Zugbeeinflussung berücksichtigt. Für die Einbeziehung einer grundsätzlich anderen Leit- und Sicherungstechnik, wie z.B. „Moving Block“, müssen aber auch Anpassungen an den Klassen für die Berechnung der Zugfolgezeiten sowie den Zug- und Streckenklassen vorgenommen werden.

Für die Auswahl der bei der Berechnung zu verwendenden Leit- und Sicherungstechnik wird davon ausgegangen, dass eine punktförmige Zugbeeinflussung als Rückfallebene immer zur Verfügung steht. Deshalb wird angenommen, dass auf Streckenabschnitten mit vorhandener linienförmiger Zugbeeinflussung Fahrzeuge ohne eine Ausstattung mit linienförmiger Zugbeeinflussung auf die punktförmige Zugbeeinflussung zurückgreifen können. Die dabei möglicherweise unterschiedlichen Signalstandorte zwischen punkt- und linienförmiger Zugbeeinflussung werden auch bei Kombinationen von unterschiedlichen Zugsicherungsarten im jeweils untersuchten Zugfolgefall differenziert betrachtet.

Zur Modellierung der **Hierarchie der Zugtypen** (siehe 2.2.4) wurden Klassen zur Abbildung der dafür nötigen Baumstruktur implementiert und Interfaces mit den Vereinbarungen der erforderlichen Daten und Funktionen definiert.

Zur Abbildung eines Elementes der Baumstruktur dient das Interface „ItrainHierarchyElement“. Es enthält folgende Angaben:

- ID des Elementes
- Zugriff auf:
  - den Inhalt des Elementes
  - die Wurzel des Baumes
  - das Vorgängerelement
  - die Liste der Nachfolgerelemente
- Aussage, ob:
  - ein Element ein direktes oder indirektes Vorgängerelement des betrachteten Elementes darstellt
  - ein Element ein direktes oder indirektes Nachfolgerelement des betrachteten Elementes darstellt
  - das betrachtete Element die Wurzel eines Baumes ist

Mit Hilfe dieser grundlegenden Funktionalitäten ist es möglich, alle Elemente eines Baumes und ihrer Zusammenhänge untereinander darzustellen. Für die administrative Zusammenstellung der Züge wird das Interface „ItrainAdministration“ von den Zugklassen implementiert, das Zugriff auf die ausgewählten Züge in der Hierarchie und auf eine Liste von Zügen, die der jeweilige Zug nachahmen kann (siehe Abschnitt 2.2.4.2), ermöglicht.

**Konflikte** stellen fahrwegbezogene Abhängigkeiten zwischen Zügen auf unterschiedlichen Streckenabschnitten dar. Dies wird durch die Angabe von Zugfolgezeiten zwischen diesen Zügen im Modell abgebildet. Für die Modellierung dieser fahrwegbezogenen Abhängigkeiten werden die für die Konflikte notwendigen Angaben über das Interface „ItrackConflict“ definiert. Diese beziehen sich immer auf genau ein Paar von Streckenabschnitten ohne Berücksichtigung ihrer Reihenfolge. Für jede Kombination aus zwei Streckenabschnitten kann es aber auch nur maximal einen Konflikt geben.

Für jeden Konflikt sind dazu Angaben über die Art des Konfliktes (Interface „Iconflict“), die zugehörigen Streckenabschnitte sowie die räumliche Positionierung des Konfliktabschnittes in den beiden Streckenabschnitten notwendig. Wichtig dabei ist, dass es nur genau einen Konfliktabschnitt je Konflikt gibt. Dies muss auch beim Modell der Shorttracks beachtet werden, da dort durch die interne Zusammensetzung der Shorttracks zur Berechnung in Longtracks unter Umständen auch mehrere Konfliktabschnitte je Konflikt auftreten könnten. In einem solchen Fall ist dann an geeigneter Stelle ein Zwischenknoten ins Netz einzufügen.

Es werden 4 Konfliktarten unterschieden:

- Follow  
Diese stellen normale Folgekonflikte für einander folgende Züge mit demselben Laufweg über den gesamten Streckenabschnitt dar.
- Follow | Touch  
Bei diesem Zugfolgekonflikt verkehren die Züge nur teilweise auf demselben Fahrweg. Demzufolge gehören zu diesem Konflikt unterschiedliche Streckenabschnitte. Wenn die Streckenabschnitte nicht an demselben Knoten beginnen, müssen die jeweils benötigten Positionen während der Durchführung der Zugfolgezeitberechnung umgerechnet werden.
- Meet  
Diese Konfliktart beschreibt einen Konflikt mit dem Gegenverkehr, bei dem der Laufweg der beiden beteiligten Züge den gesamten Streckenabschnitt umfasst. Die beiden beteiligten Streckenabschnitte stellen dabei die beiden entgegengerichteten Streckenabschnitte derselben eingleisigen Strecke dar.
- Meet | Touch  
Gegenverkehrskonflikt bei der Kreuzung von Gegengleisen bei höhengleichen Ein- und Ausfädelungen, bei dem die zueinander in Konflikt

befindlichen Fahrwege nur teilweise dieselbe Infrastruktur verwenden. Dies betrifft in diesem Fall auch unterschiedliche Streckenabschnitte.

## 2.4.2 Eingabe und Ausgabe (I/O)

Die Ein- und Ausgabe der Daten erfolgt hauptsächlich über xml-Dateien. Die verwendeten Formate sind an RailML angelehnt und berücksichtigen die Bedürfnisse der makroskopischen Modellierung, bieten aber auch die Möglichkeit, mikroskopische Infrastrukturdaten zu verwenden.

Diese Formate werden durch XML-Schema-Definitionsdateien („xsd“) beschrieben. Dabei stellen „TbFileInfrastructure“ für den Austausch von Infrastrukturformaten und „TbFileTimetable“ für den Austausch von Fahrplandaten die Hauptformate dar, die die jeweilige Obermenge der auszutauschenden Daten enthalten. Dateien in davon abgeleiteten Formaten für spezielle Anforderungen an den Datenaustausch werden aus Dateien mit diesen Hauptformaten über xslt-Transformationen erzeugt.

Dies ist durch den grundsätzlich gleichen Aufbau der Formate in der jeweiligen Gruppe möglich. Diese Formate unterscheiden sich jeweils nur in Details und in der Menge der enthaltenen Informationen. Ggf. notwendige, aber in dem jeweiligen Hauptformat nicht enthaltene Daten können während der Transformation aus den vorhandenen Daten bestimmt werden.

Zur Durchführung einer Transformation muss sich die entsprechende Transformationsdatei („xslt“) in demselben Verzeichnis wie die Ausgangs-xml-Datei befinden und den definierten Namen für diesen Transformationsfall besitzen. Falls keine geeignete Transformationsdatei im Ausgangsverzeichnis gefunden wird, kann der Nutzer über ein in diesem Fall dargestelltes Dialogfeld eine geeignete Transformationsdatei manuell auswählen.

Wenn eine oder beide Schema-Definitionen der an einer Transformation beteiligten xml-Dateien geändert werden, so ist die Transformationsdatei an diese Änderungen anzupassen und neu zu erstellen.

Die für die Ein- und Ausgabe der xml-Daten benötigten Klassen werden dabei mithilfe des im .net-Framework enthaltenen Programms „xsd.exe“ automatisch aus den Schemadefinitionen erzeugt.

Bei jeder Änderung der Schemadefinitionen muss aber auch eine neue Klassenstruktur erzeugt werden, wodurch ggf. manuell vorgenommene Anpassungen in den automatisch erzeugten Ein- und Ausgabe-Klassen für die

---

Möglichkeiten und Grenzen der Modellierung des Bahnbetriebes mit planerischen Zugfolgezeiten

xml-Daten verloren gehen. Aus diesem Grund sind im Ein- und Ausgabe-Prozess so genannte „Wrapper-Klassen“ zwischen die automatisch erzeugten Ein- und Ausgabe-Klassen und die Klassen der Datenstruktur zwischengeschaltet, in denen ggf. notwendige manuelle Anpassungen im Ein- und Ausgabe-Prozess vorgenommen werden können.

Für einzelne Anwendungsfälle werden auch nicht-xml-Dateien für die Ein- und Ausgabe verwendet.

Die im Longtrack-Modell notwendigen Konfliktangaben werden über eine Textdatei mit allen notwendigen Daten für die einzelnen Konfliktfälle eingelesen. Die Angaben für jeden Konfliktfall sind dabei in jeweils einer Zeile zusammengefasst.

Für Gegenverkehrsfahrtenausschlüsse für einzelne Zugtypen auf bestimmten Streckenabschnitten sind Angaben über die betroffenen Zugtypen und Streckenabschnitte notwendig. Diese Angaben werden über eine Textdatei eingelesen, in der für jeden zu berücksichtigenden Streckenabschnitt die Ids der betroffenen Zugtypen aufgelistet sind. Dabei stehen alle Angaben für einen Streckenabschnitt in derselben Zeile.

Für detaillierte Untersuchungen einzelner Fahrtverläufe können diese als Wertetabelle in eine Textdatei ausgegeben werden, um sie mit externen Programmen weiter auszuwerten. Dies geschieht durch eine zeilenweise Auflistung der Zwischenfahrzeiten mit ihren zugehörigen Positionen und Geschwindigkeiten des Zuges im untersuchten Streckenabschnitt.

### 2.4.3 Graphische Benutzerschnittstelle (GUI)

Da dieses Programm nur eine Entwicklungsversion darstellt, ist die Benutzeroberfläche auf das Notwendige beschränkt. Sie entspricht den üblichen Windows-Standards und wurde mit den im Microsoft Visual Studio 2005 und im .net-Framework 2.0 enthaltenen Möglichkeiten erstellt.

Sie enthält mehrere Menüs für die unterschiedlichen Aufgaben des Programms.

- Datei

Es beinhaltet die Menüpunkte zum Einlesen und Abspeichern der Daten sowie zum Im- und Export weiterer Formate. Letztere sind zur besseren Übersicht in zwei Untermenüs angeordnet. Zusätzlich ist im Menü „Datei“

auch der Menüpunkt zum Beenden des Programms enthalten.

- Daten

In diesem Menü sind Funktionen zum Einlesen zusätzlich erforderlicher Daten für bestimmte spezielle Berechnungen, wie z.B. für zugtypabhängige Fahrtenausschlüsse, sowie die Berechnungsfunktionen zur Bestimmung der Bahnhofparameter untergebracht.

- Einstellungen

Das Menü „Einstellungen“ dient der Darstellung und Auswahl von Einstellungsmöglichkeiten für die Berechnungen. In den Menüpunkten sind dabei aber nur die Einstellungsmöglichkeiten berücksichtigt, die keine zusätzlichen Steuerelemente benötigen. Alle weiteren Einstellungen befinden sich auf dem Tab „Einstellungen“ im Hauptbereich des Fensters (vgl. Abbildung 21).

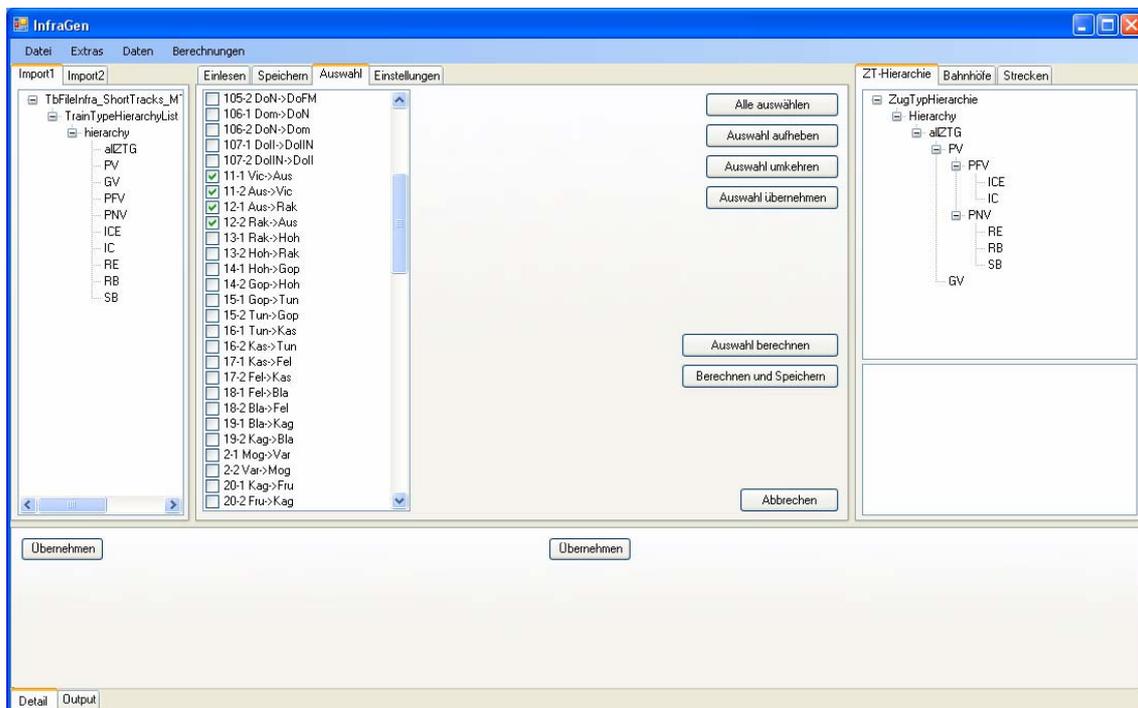


Abbildung 20: InfraGen – Ansicht der Auswahl für die zu berechnenden Streckenabschnitte

- Berechnungen

In diesem Menü sind alle erforderlichen Berechnungsfunktionen angeordnet. Dabei wird zwischen einer einfachen Berechnung aller erforderlichen Parameter, dem zusätzlichen automatischen Abspeichern nach erfolgter Berechnung sowie der Berechnung der Parameter für eine Auswahl von

Streckenabschnitten unterschieden.

Für die Berechnung der Parameter für eine Auswahl von Streckenabschnitten wird von diesem Menüpunkt erst der Tab „Auswahl“ im Hauptbereich des Fensters aufgerufen (siehe Abbildung 20), in dem alle zur Auswahl stehenden Streckenabschnitte aufgelistet werden. Nach der Auswahl der zu untersuchenden Streckenabschnitte und der Übernahme der getroffenen Auswahl stehen dann auch hier unterschiedliche Funktionen zur einfachen Berechnung der Parameter für die ausgewählten Streckenabschnitte sowie zur automatischen Speicherung nach durchgeführter Berechnung über Buttons zur Verfügung.

Der Hauptbereich des Programms wird zur Darstellung der Informationen des Programms verwendet. Dazu ist dieser Bereich in mehrere Teile eingeteilt. Durch Tabs können in verschiedenen Ansichten unterschiedliche Informationsgruppen dargestellt werden.

Im linken Teilbereich wird die Baumstruktur der Inputdatei dargestellt. Im rechten Teilbereich wird demgegenüber zu Kontroll- und Informationszwecken die Baumstruktur der eingelesenen Infrastruktur- und Zugdaten in drei verschiedenen Themenbereichen in unterschiedlichen Tabs angezeigt.

Den größten Bereich nimmt in der Mitte der Hauptbereich mit verschiedenen Ansichten für Einstellungen (siehe Abbildung 21), Auswahl von Streckenabschnitten sowie Buttons für Testanwendungen und –funktionen ein. Darunter befindet sich ein Bereich für Detaildarstellungen von ausgewählten Daten.

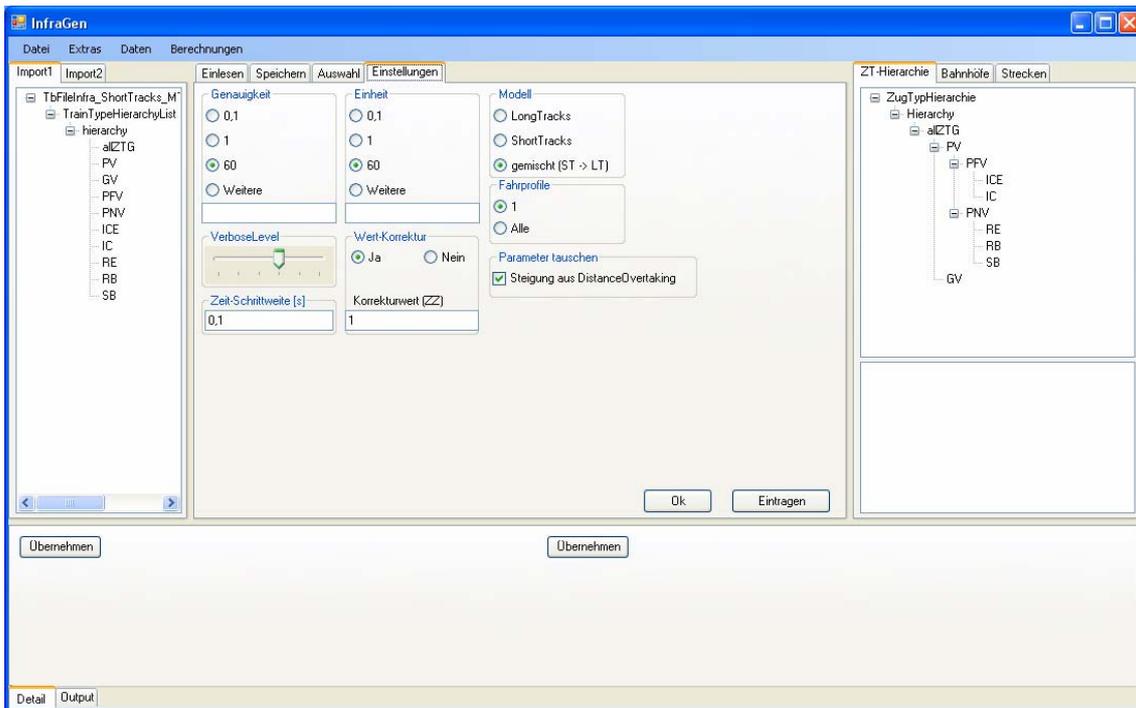


Abbildung 21: InfraGen – Ansicht der Einstellungen

In einer weiteren Ansicht des unten befindlichen Teilbereichs werden die Status- und Fehlermeldungen im sog. „Log-Fenster“ dargestellt. Dabei erscheint die jeweils neueste Meldung oben. Dies wird durch ein Textfeld realisiert, das alle darzustellenden Meldungen enthält. Die jeweils neueste Meldung wird dabei an den Anfang des Textfeldes geschrieben.

Dieses Vorgehen führt allerdings bei einer größeren Anzahl von Meldungen zu Performance-Problemen, da bei der Ausgabe einer neuen Meldung der den Inhalt des Textfeldes repräsentierende String immer komplett neu aufgebaut und mit den alten Meldungen aufgefüllt werden muss. Durch den Ausgabestandard (sog. Verbose-Level) kann aber die Art und Menge der ausgegebenen Meldungen reguliert werden. Um bei umfangreicheren Berechnungen ggf. auch höhere Verbose-Level mit einer größeren Zahl an erzeugten Meldungen verwenden zu können, werden alle Meldungen zur späteren Auswertung in einer Log-Datei abgelegt und die Anzahl der gleichzeitig im Log-Fenster dargestellten Meldungen begrenzt.

Die Interaktion der Klassen der Datenstruktur mit der GUI erfolgt über abgeleitete Klassen, die die entsprechenden Interfaces der „Business-Logik“ implementieren. Dies sind bislang Ansichten für Darstellungen von Baumstrukturen sowie Detailinformationen.

Der Aufbau der Baumstrukturen erfolgt dabei rekursiv durch den Aufruf der

entsprechenden Business-Logik-Funktionen untergeordnet darzustellender Elemente. Möglichkeiten zur Änderung der Anordnung der dargestellten Knoten in der Baumstruktur über die GUI sind bislang aber noch nicht vorgesehen.

Die Darstellung von Detailinformationen erfolgt durch eine Liste von Textfeldern, die eine flexible Darstellung textlicher Informationen, z.B. für Bezeichnungen und Angaben von Werten, ermöglicht. Die einzelnen Textfelder sind dabei aus den Informationen zum Titel des Feldes und den darin darzustellenden Informationen zusammengesetzt. Die Darstellung von Wertetabellen ist auf diese Art allerdings nur sehr umständlich und ohne für Wertetabellen sinnvolle Formatierungsmöglichkeiten realisierbar. Die Eingabe von Änderungen der Werte erfolgt auf demselben Weg über spezielle Funktionen des Business-Logik-Interfaces.

## **3 Anwendungsmöglichkeiten**

### **3.1 Trassenmanagement und Fahrplanerstellung**

Das Hauptanwendungsgebiet der hier untersuchten Modellierung liegt im Rahmen des Trassenmanagements und der Fahrplanerstellung. Mit Hilfe mathematischer Optimierungsmethoden ist es möglich, eine Vielzahl von Trassenwünschen simultan zu berücksichtigen. Daraus kann dann ein Fahrplan erstellt werden, der der optimalen Auswahl aus den betrachteten Trassenwünschen entspricht. Da die bei Verwendung herkömmlicher mikroskopischer Abbildung der Infrastruktur entstehenden Problemgrößen und Datenmengen nur für sehr kleine Untersuchungsräume handhabbar sind, wurde die hier untersuchte Modellierung im Rahmen des Forschungsprojektes Trassenbörse entwickelt und angewendet.

Das Projekt Trassenbörse ist ein zunächst vom Bundesforschungs- und dann vom Bundeswirtschaftsministerium gefördertes Forschungsprojekt, das von einem interdisziplinären Projektteam aus Mathematikern, Eisenbahnbetriebswissenschaftlern und Wirtschaftswissenschaftlern der Technischen Universität Berlin und dem Konrad Zuse-Zentrum in Berlin bearbeitet wird. Es verfolgt das

Ziel, neuartige Methoden für eine effiziente Vermarktung von Schienenverkehrsstrassen zu entwickeln. Untrennbar verbunden damit sind die Entwicklung fortgeschrittener Methoden und Softwarekomponenten für die Infrastrukturdatenhaltung und –darstellung, für die Konstruktion und Darstellung von Trassen und für die Generierung von Gesamtfahrplänen.

Die Entwicklung einer Trassenbörse stellt dabei eine echte interdisziplinäre Aufgabenstellung dar, das nicht einfach in unabhängige, einzeldisziplinär zu bearbeitende Module zerlegt werden kann. Im Verlauf der bisherigen Entwicklung hat sich mehrfach gezeigt, dass eine anvisierte Problemlösung für eine Fragestellung später im Lichte einer anderen Fragestellung wieder aufgerollt werden musste.

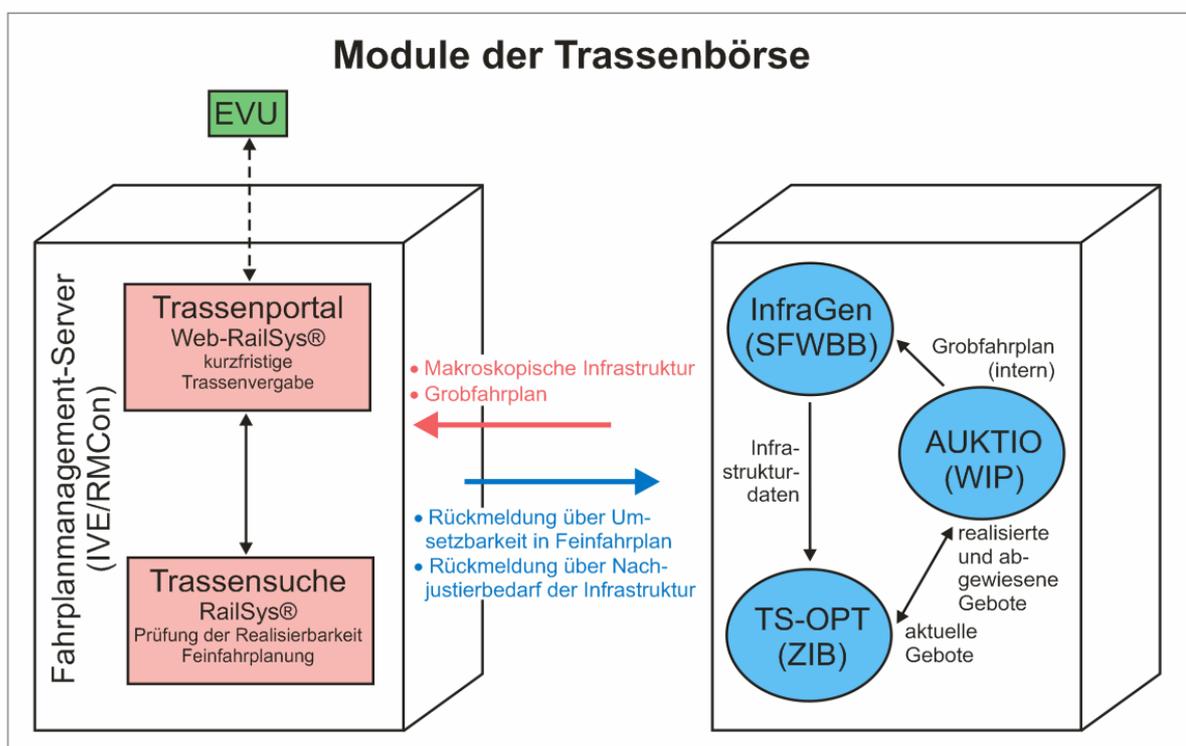


Abbildung 22: Module der Trassenbörse (Quelle: [Henkel 2007])

Der Schwerpunkt des Projekts Trassenbörse liegt auf der mathematischen Optimierung der Schienenverkehrsplanung im Rahmen eines Auktionsmechanismus, der sicherstellt, dass sich die Allokation der Trassen an den ökonomischen Wertschätzungen der unterschiedlichen Nutzer orientieren kann. Aus Gründen der Praktikabilität bedient sich die Trassenbörse dabei einer auf Standardisierung setzenden Infrastruktur- und Fahrweisedarstellung, deren Mechanismen und Auswirkungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit näher untersucht wurden. Diese Modellierung ist dabei so flexibel gestaltet

Möglichkeiten und Grenzen der Modellierung des Bahnbetriebes mit planerischen Zugfolgezeiten

worden, dass eine große Bandbreite unterschiedlicher Anwendungsfälle und Detaillierungsgrade abgedeckt werden können.

Auf dieser Grundlage werden aus den Trassenanmeldungen Gebote für Züge formuliert. Aus der Menge der Gebote berechnet das mathematische Optimierungstool diejenige konfliktfreie Trassenkombination, welche die vorgegebene Zielfunktion maximiert.

Das Programmpaket ist in der Lage, eine Vielzahl von Trassenwünschen gleichzeitig einzulegen und die Gesamtmenge der auftretenden Trassenkonflikte simultan zu behandeln. Die Lösung von auftretenden Konflikten zwischen verschiedenen Trassenwünschen kann durch Trassenvariationen in Form von zeitlichen Verschiebungen, angepassten Fahrweisen sowie alternativen Streckenführungen oder durch die Verwerfung nicht realisierbarer Trassenwünsche erfolgen.

Die Software kann verschiedene Regeln unterstützen, nach denen dies geschieht. In jedem Fall wird der Gesamtprozess der Trassenvariationen und Trassenablehnungen nach einer klaren Summen-Maximierungs-Zielfunktion in einer simultanen mathematischen Optimierung vorgenommen, d.h. es werden nicht einzelne Trassen nacheinander geplant, sondern es wird simultan die insgesamt beste Kombination ermittelt. Folgende Zielfunktionen sind derzeit implementierbar:

- Maximale Anzahl der Züge, die im Netz umgelegt werden,
- Maximale Anzahl der Zugkilometer, die auf dem Netz gefahren werden,
- Maximale Summe der Regelentgelte, die das Netunternehmen einnimmt,
- Maximale Summe der Zahlungen, die die Eisenbahnverkehrsunternehmen im Rahmen einer Auktionsrunde geboten haben.

Außerdem ist es möglich, bei Bedarf bestimmte Trassennachfragen zu priorisieren. Damit können bereits vergebene Trassen eingelegt und die entsprechenden Netzkapazitäten als reserviert abgebildet sowie rechtlich vorgegebene, abgestufte Prioritäten bestimmter Nachfragegruppen in den Planungsprozess mit einbezogen werden. Dadurch kann das im Rahmen des Forschungsprojektes entwickelte Programmpaket für die Fahrplanerstellung nicht nur Trassenauktionen, sondern alle aktuellen und in der Diskussion befindlichen Trassenzuteilungsregeln abbilden und einen Gesamtfahrplan aus einer großen Zahl von Trassenwünschen generieren, der im Rahmen der einzuhaltenden Regeln optimal ist.

Des Weiteren kann auch eine Suche nach freien Einzeltrassen im erzeugten

---

Möglichkeiten und Grenzen der Modellierung des Bahnbetriebes mit planerischen Zugfolgezeiten

Jahresfahrplan oder eine Routensuche für Fahrplanauskünfte durchgeführt werden. Dafür wird der Fahrplanmanagement-Server (siehe Abbildung 22) verwendet, der auf der mikroskopischen Infrastrukturmodellierung von RailSys [Henkel 2007] basiert. Alternativ kann dies auch durch die Verwendung der makroskopischen Abbildung mit dieser Modellierung unter Einsatz von mathematischen Standardalgorithmen zur Routensuche, wie z.B. Dijkstra [Radtke 2005] o.ä., erfolgen. Dabei kann der Aufwand gegenüber mikroskopischen Verfahren verringert werden.

### **3.2 Strategische Betriebsuntersuchungen**

Neben der Erstellung eines optimalen Fahrplans im Rahmen des Trassenmanagements ist das hier vorgestellte Instrumentarium auch für strategische Betriebsuntersuchungen und Kapazitätsbestimmungen anwendbar. Dabei sind mehrere Anwendungsfälle möglich:

#### a) kurzfristige Untersuchungen bei gegebenem Betriebsprogramm

Dieser Fall ist der Anwendung im Trassenmanagement sehr ähnlich. Es ist eine Aussage möglich, ob die Kapazität der einzelnen Abschnitte bzw. Bahnhöfe für das zu untersuchende Betriebsprogramm ausreicht.

Dazu müssen die vorgegebenen Zugfahrten in Gebote mit Zielfunktionsvorgaben umgewandelt werden. Aus diesen wird, wie im normalen Trassenmanagement, ein mathematisch optimaler Fahrplan erzeugt. Da für Betriebsuntersuchungen aber die letztendliche Gebotshöhe der einzelnen Gebote bekannt ist, kann auf ein mehrstufiges Auktionsverfahren verzichtet werden.

Durch eine zusätzliche Analyse der Zugfolgezeiten der tatsächlich auftretenden Zugfolgefälle und der verbleibenden Zeitlücken ist eine Abschätzung der verfügbaren Restkapazitäten möglich. Alternativ kann dazu auch in einem weiteren Untersuchungslauf unter Berücksichtigung der vorgegebenen Zugmischung zusätzliche fiktive und flexible Nachfrage erzeugt werden, die dann optimal in den aus dem vorgegebenen Betriebsprogramm erzeugten Fahrplan eingelegt wird.

#### b) mittelfristige Untersuchungen mit bekanntem Verkehrsaufkommen ohne Betriebsprogramm

Anhand des Verkehrsaufkommens bzw. einer ungefähren Zugmischung ist eine Aussage möglich, inwieweit die Kapazität der Streckenabschnitte bzw.

Bahnhöfe für dieses Verkehrsaufkommen ausreichend ist. Dazu sind mehrere Untersuchungsläufe mit Variationen in der erzeugten Nachfrage durchzuführen.

c) langfristige Untersuchungen ohne Angaben zu Verkehrsaufkommen oder Betriebsprogramm

Dazu wird fiktives Aufkommen erzeugt, das die vermutete Kapazität um ein Vielfaches übersteigt. Dabei ist auf eine möglichst große Flexibilität der Einzelgebote und eine vorhandene, aber geringe Streuung der Gebotshöhe zu achten. Es werden mehrere Untersuchungsläufe durchgeführt, zwischen denen diese Angaben geringfügig variiert werden.

Für jeden Untersuchungslauf werden dann aus den so erstellten Geboten die optimalen Fahrpläne erzeugt. Aus den ermittelten Fahrplänen der einzelnen Untersuchungsläufe und unter Berücksichtigung ihrer Unterschiede untereinander lässt sich die Kapazität für verschiedene Zugmischungen abschätzen.

### **3.3 Analytische Kapazitätsbestimmung**

Für großräumige Kapazitätsabschätzungen kann diese Modellierung auch ohne Verwendung der mathematischen Optimierung herangezogen werden. Zur Kapazitätsabschätzung werden dabei keine Fahrpläne erzeugt, sondern die bestimmten Modellparameter – insbesondere die Zugfolgezeiten und Bahnhofskapazitäten – für statistische Auswertungen herangezogen.

Dazu werden zur Bestimmung der Streckenkapazitäten die ermittelten Zugfolgezeiten anhand der statistischen Wahrscheinlichkeit der auftretenden Zugfolgefälle gewichtet. Dies kann anhand eines vorgegebenen Betriebsprogramms oder aufgestellten Wunschfahrplanes erfolgen. Sollte das nicht möglich sein, müssen mehrere unterschiedliche Betriebsprogramme abgeschätzt werden, um daraus die Kapazitäten für verschiedene Zugmischungen zu ermitteln.

Es können dabei auch Möglichkeiten zur Zugbündelung berücksichtigt werden. Dazu ist es notwendig, die Fahrweisen-Alternativen (siehe 2.2.4.2) für die betroffenen Züge zu verwenden. In diesem Fall kann ein Zug das Fahrverhalten eines anderen, langsameren – vorausfahrenden oder nachfolgenden – Zuges imitieren, um unter Inkaufnahme einer Fahrzeitverlängerung die Zugfolgezeit zu minimieren. Unter Berücksichtigung einer vorgegebenen Höchstfahrzeit für die betroffenen Züge können dann Anpassungen der Häufigkeiten der davon

betroffenen Zugfolgefälle vorgenommen werden. Falls die Fahrweisen-Alternativen angewendet werden sollen, muss für die davon betroffenen Züge überprüft werden, ob die vorgegebenen Höchstfahrzeiten nicht überschritten werden. Ggf. ist dann nur auf einzelnen Abschnitten die Verwendung der Fahrweisen-Alternativen möglich. Bei konkret vorgegebenen Wunschfahrplänen ist auch eine Überprüfung und Kontrolle der angegebenen Fahrzeiten für alle Züge möglich.

Die Parameter für die Knotenkapazitäten berücksichtigen schon die auftretenden Wahrscheinlichkeiten für gleichzeitige Ein- und Ausfahrten sowie die vorhandenen Fahrstraßenausschlüsse, so dass sie direkt verwendet werden können. Bei vorgegebenen Wunschfahrplänen bzw. bekannten Betriebsprogrammen – insbesondere bei Verwendung eines Integralen Taktfahrplanes – können für wichtige Knoten Detailuntersuchungen mit der vorgegebenen Zugmischung zur Anpassung der Parameter sinnvoll sein. Wenn keine anderweitigen Angaben für die benötigten Modellierungsparameter für diese Fälle vorliegen, können die Kapazitätsparameter ggf. auch durch Detailanalysen der relevanten Knoten mit Hilfe dieser Modellierung in einer feineren Aggregationsstufe bestimmt werden.

## **4 Untersuchung der Grenzen**

### **4.1 Überblick**

Ziel der Untersuchungen ist die Bestimmung des Einflusses der Genauigkeit der Eingangsdaten für die Betriebsabwicklung im Schienenverkehr mittels der Modellierung mit planerischen Zugfolgezeiten auf die erreichbare Genauigkeit der Ergebnisse. Insbesondere ist dabei die erforderliche Genauigkeit der Eingangsdaten für unterschiedliche Anwendungsfälle und die erreichbare Genauigkeit der Ergebnisse unter idealen Bedingungen zu ermitteln, um eine Abgrenzung der Einsatzmöglichkeiten dieser Modellierung zu bestehenden Verfahren der Fahrplanerstellung bzw. der Betriebsuntersuchung zu erreichen.

## 4.1.1 Test-Setup

### 4.1.1.1 Grundlagen

Zur Erreichung der drei Ziele wurden Untersuchungen der wichtigen Modellparameter unter ceteris-paribus-Bedingungen durchgeführt. Dazu wurden für die meisten Untersuchungsfälle idealisierte Infrastrukturen verwendet, die auf den jeweiligen Untersuchungsfall abgestimmt sind.

Zur Überprüfung der mit den generischen Streckendaten ermittelten Ergebnisse und für einige Untersuchungsfälle, für die eine generische Herangehensweise mit idealisierter Infrastruktur nicht zielführend ist, wurden ergänzend dazu die Streckendaten aus einem ausgewählten Teilnetz im Raum Hannover – Kassel – Fulda herangezogen (siehe Abbildung 23). Dieses Teilnetz ist gekennzeichnet durch seine zentrale Lage im deutschen Bahnnetz und durch das Vorhandensein aller bahnbetrieblich relevanten Merkmale, wie z.B. unterschiedlichster Streckenarten, verschiedener Bahnhofsgößen und –formen, sowie höhengleicher Abzweigungen außerhalb von Bahnhöfen.

Für die Untersuchungen wurden 15 unterschiedliche Personenfern- und -nahverkehrszüge ausgewählt, die grundsätzlich den Zugtypen „ICE“, „RE bzw. „RB“ zugeordnet“ werden können. Für jeden Modellzug wurden alle für die Berechnungen erforderlichen fahrdynamischen Daten (siehe Kapitel 2.3.1) ermittelt. Die wichtigsten Parameter sind im Anhang zusammengestellt.

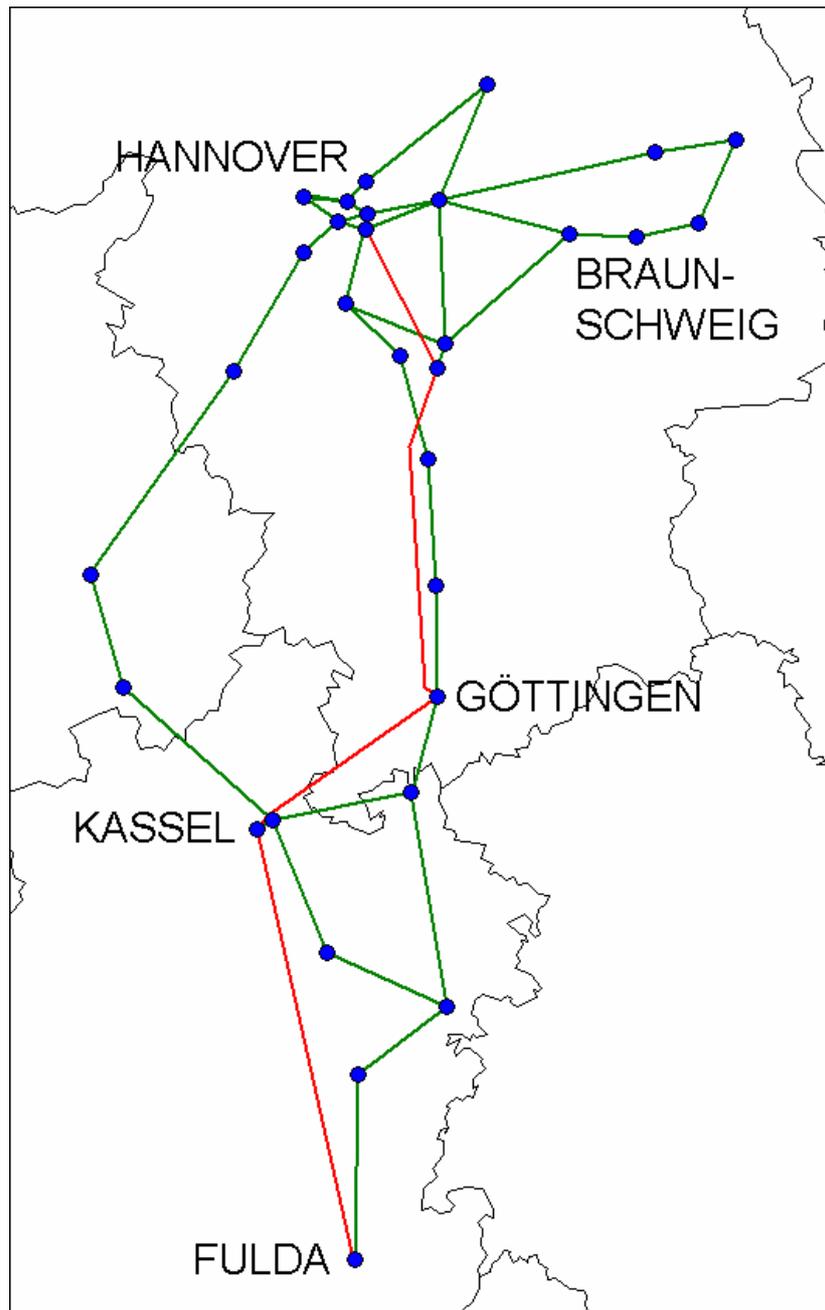


Abbildung 23: Stilisierte Darstellung des ausgewählten Teilnetzes

#### 4.1.1.2 Beschreibung der für die Untersuchung verwendeten Programme

Neben der in Kapitel 2.4 beschriebenen Laborsoftware InfraGen wurden die anerkannten mikroskopischen Fahrplanerstellungs- und Betriebssimulationsprogramme Railsys und OpenTrack als Vergleichs- und Kontrollinstrumente verwendet. Mit deren Hilfe können Fahrzeiten ermittelt und unterschiedliche Testfahrpläne aufgestellt werden. Anhand derer können die notwendigen Zugfolgezeiten bestimmt und die sich daraus ergebenden Kapazitäten ermittelt

werden.

**OpenTrack** ist ein Programm zur Simulation des Eisenbahnbetriebes, das mittels seiner graphischen Benutzeroberfläche den Entwurf und die Verwaltung von Daten für die Infrastruktur, die Fahrzeuge und die Fahrpläne unterstützt sowie die Durchführung und Auswertung von Betriebssimulationen ermöglicht [Hürlimann 2001]. Das Simulationssystem ermöglicht dabei das zeitgesteuerte Ablaufen der im Untersuchungsnetz auftretenden Betriebsprozesse der Fahrzeuge und der Sicherungstechnik. Die Berechnung der Bewegung der Züge basiert auf den Bewegungsgleichungen der Zugfahrt (siehe auch Kapitel 2.2.2). Diese werden für jeden Zug mit numerischen Verfahren gelöst, um dessen jeweilige Werte für Geschwindigkeit und Position zu bestimmen.

Die großen während der Simulation anfallenden Datenmengen lassen sich mit dafür vorgesehenen Hilfsmitteln (z.B. dem sog. „Inspector“, der Bildfahrplandarstellung und der Simulationsansicht) analysieren, um so wichtige Hinweise über den Verlauf der Simulation zu erhalten. Die Auswertung der während der Simulation anfallenden Daten lassen sich in einer für das Eisenbahnwesen üblichen Form darstellen. Dazu können z.B. Bildfahrpläne, Weg-Zeit-Linien, Belegungsdiagramme oder Verspätungsstatistiken ausgegeben werden. Dadurch können mit Hilfe von OpenTrack Kapazitätsuntersuchungen von Eisenbahnstrecken und -netzen, Stabilitätsuntersuchungen von Fahrplänen, Bemessungen von Sicherungsanlagen sowie die Fahrzeugeinsatz- und Baustellenplanung durchgeführt werden.

OpenTrack kann auf verschiedenen Plattformen, wie z.B. Windows NT, MacOS X, etc., eingesetzt werden. Das Programm ist von seiner Funktionalität her in verschiedene themenspezifische Module aufgeteilt. Dabei bildet die Verwaltung und Darstellung der Gleisanlagen das Zentrum der Anwendung. Die Topologiedarstellung bildet die Grundlage für die Visualisierung der während der Simulation ablaufenden Prozesse (wie z.B. die Zugfahrten und das Verhalten der Sicherungstechnik). Während eines Simulationslaufes wird das Verhalten der Prozesse von allen auf dem Untersuchungsnetz verkehrenden Zügen unter den Randbedingungen der Fahrpläne, der Infrastrukturressourcen sowie der technischen Möglichkeiten der modellierten Züge über einen vom Benutzer vorgegebenen Zeitraum berechnet.

Im Fahrplanmodul werden die Verknüpfungen zwischen den Zügen, den Gleisanlagen mit ihren Fahrwegen sowie den laufwegsbezogenen Zeitvorgaben zum Fahrplan hergestellt. Das Fahrplanwerkzeug unterstützt dabei auch die Handhabung von Taktzügen. Dazu können einerseits aus einer Vorlage beliebig

viele Fahrpläne für Taktzüge generiert werden. Andererseits werden Änderungen am Fahrplan eines Taktzuges auf alle zugehörigen Züge eines Taktgefüges übertragen.

**Railsys** ist ein integriertes Fahrplankonstruktions- und Simulationssystem für schienengebundene Verkehrsmittel [Radtke 2005]. Es ist darüber hinaus auch für das Trassenmanagement und die Baubetriebsplanung im Einsatz. Neben der Fahrplankonstruktion und Angebotsplanung bietet Railsys die Möglichkeit, die Kennwerte von Eisenbahnfahrplänen sowie deren betriebliche Qualität zu ermitteln. Dies geschieht mit Hilfe der synchronen Eisenbahnbetriebssimulation und des zugehörigen Auswertungsmanagers.

Die Grundlage der synchronen Simulation ist eine sperrzeitengenaue Fahrplankonstruktion auf Basis einer mikroskopischen Infrastruktur, einer exakten Fahrzeitrechnung, einer genauen Abbildung der Leit- und Sicherungstechnik sowie weiterer fahrplankonstruktionsspezifischer Randbedingungen. Die Zugfahrten belegen während der synchronen Simulation anhand ihres Fahrplans die zugehörigen Fahrwege. Wenn zwei oder mehr konkurrierende Zugfahrten gleichzeitig denselben Fahrweg oder Teile davon beanspruchen, entstehen Konflikte, die mit Hilfe des integrierten Dispositionsmanagers gelöst werden können. Dazu können die Zugfahrten in ihrer zeitlichen Lage verschoben werden, sich durch Veränderungen von Zuschlägen oder zusätzliche Halte anpassen, eine andere Route zugewiesen bekommen sowie in letzter Konsequenz auch ausfallen.

Die Disposition ist insbesondere für die Betriebssimulation erforderlich, bei der Fahrpläne, die mit Störungen überlagert sind, simuliert werden. Dazu werden von einem ungestörten Basisfahrplan durch stochastische Störungsdaten eine Vielzahl von gestörten Fahrplänen abgeleitet und anschließend simuliert. Dies dient der Bestimmung von Stabilität und Qualität eines Fahrplans, der Ursachenermittlung für Verspätungen und Verspätungsfortplanungen, der Engpassuntersuchung im Netz sowie dem Vergleich unterschiedlicher Infrastruktur- bzw. Fahrplanvarianten.

Der integrierte Auswertungsmanager liefert als Ergebnis eine Reihe von verkehrlichen, betrieblichen und kundenorientierten Kennwerten, die mit verschiedenen Kosten- und Bewertungsfunktionen überlagert werden können. Diese können eine Entscheidungshilfe liefern und zur Transparenz bei der Entscheidungsfindung für Infrastrukturmaßnahmen und Fahrplananpassungen beitragen.

### 4.1.1.3 Darstellung der verwendeten Infrastruktur

Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen zur Ermittlung von Fahr- und Zugfolgezeiten wurde hauptsächlich auf eine idealisierte Infrastruktur zurückgegriffen. Für die verschiedenen Untersuchungen wurden dabei sowohl strecken- als auch bahnhofseitige Variationen berücksichtigt.

Die grundsätzliche Untersuchungsanordnung besteht aus einer zweigleisigen Hauptstrecke von 30 km Länge zwischen dem Startbahnhof „A“ und dem Untersuchungsbahnhof „B“ (siehe Abbildung A1 im Anhang), der neben den Bahnsteigkanten an den beiden durchgehenden Hauptgleisen noch vier weitere Bahnsteiggleise besitzt. Es wird für die Untersuchungen angenommen, dass alle untersuchten Züge an jedem Bahnsteig halten können. Überholungsgleise ohne Bahnsteige werden für diese Untersuchungen nicht berücksichtigt. Vor den Bahnhöfen befinden sich Überleitstellen in A-Anordnung welche einen Laufweg in jedes Bahnhofsgleis gewährleisten.

Die zulässige Geschwindigkeit im Streckenbereich ist für den Basisfall mit 250 km/h ohne Einschränkungen im Streckenverlauf angenommen worden. In den Bahnhofsgebieten sind abgestufte Höchstgeschwindigkeiten verwendet worden, deren Höhe Tabelle 4 entnommen werden können. Der Basisfall entspricht der Kombination aus Streckenhöchstgeschwindigkeitsprofil „S1“ und Bahnhofsgeschwindigkeitsprofil „B1“.

Im Basisfall wird von einer Steigung von 0 ‰ und einer Krümmung von Null für den gesamten Streckenverlauf ausgegangen. Die Signalstandorte sind modellhaft gleichmäßig verteilt, so dass sich Blockabstände von einem Kilometer ergeben. Die Strecke ist mit LZB ausgestattet, welche dieselben Blöcke wie das konventionelle Signalsystem verwendet.

Zur Untersuchung der Fahrzeiten von durchfahrenden Zügen wurde die Untersuchungsstrecke um einen Streckenabschnitt „B – Z“ von 30 km Länge ergänzt. Die für diesen Untersuchungsfall verwendete Infrastruktur für den Abschnitt „B – Z“ wurde analog zur Infrastruktur des Abschnittes „A – B“ gestaltet, so dass sich eine Untersuchungsstrecke von 60 km Länge, mit einem Startbahnhof „A“ bei km 0,0, einem Endbahnhof „Z“ bei km 60,0 und einem in der Mitte gelegenen Untersuchungsbahnhof „B“ mit 6 Gleisen bei km 30,0 ergibt (siehe Abbildung A2 im Anhang).

Für weitere Untersuchungen wurden unterschiedliche Streckenhöchstgeschwindigkeiten und Abzweiggeschwindigkeiten von Weichen betrachtet. Die

Laufwege zu den verschiedenen Gleisen sind dabei aber zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit gleich lang. Aus abbildungstechnischen Gründen wurden bei der Variation der Abzweiggeschwindigkeiten dieselben Weichenlängen verwendet. Es wurden auf einer unveränderten Infrastruktur lediglich unterschiedliche Höchstgeschwindigkeiten eingestellt. Dabei sind unterschiedliche Geschwindigkeitsvorgaben sowohl für die freie Strecke (S1, S3) als auch für die Bahnhofsgleise (B1, B4) untersucht worden. Die Abzweiggeschwindigkeiten der einzelnen Weichen hängen von ihrer jeweiligen Lage im Gleisbild ab (siehe Tabelle 4 und Tabelle 5).

Tabelle 4: Übersicht der untersuchten Geschwindigkeitsprofile der Strecke

<b>Profil</b>	<b>Streckenhöchstgeschwindigkeit (<math>V_{zul}</math>) [km/h]</b>
<b>S1</b>	250
<b>S2</b>	200
<b>S3</b>	160
<b>S4</b>	120

Tabelle 5: Übersicht der untersuchten Geschwindigkeitsprofile im Bahnhof

<b>Szenariogeschwindigkeiten [km/h] – Bahnhof</b>						
<b>Bezeichnung</b>	<b>Erläuterung</b>	<b>Profil</b>	<b>B1</b>	<b>B2</b>	<b>B3</b>	<b>B4</b>
Durchfahrgleis	Hauptgleis + alle Bahnsteiggleise		160	120	120	100
Einfahrweiche	Überleitung + 1.Weiche		100	80	60	60
Verzweigungsweiche	2.Weiche		80	60	60	50
Verteilerweiche	3.Weiche		60	50	40	40
Feinverteilungsweiche	4.Weiche		50	40	40	40

## 4.1.2 Test-Übersicht

### 4.1.2.1 Einteilung der Zugtypen

Zur Abschätzung der Auswirkungen unterschiedlicher Zugtypeneinteilungen (siehe Abschnitt 2.2.4) sind Vergleichsrechnungen der unterschiedlichen Züge auf der Basisinfrastruktur durchgeführt worden. Es erfolgte ein Vergleich der sich ergebenden Fahr- und Zugfolgezeiten. Zusätzlich wurden zur Verdeutlichung von höchstgeschwindigkeitsabhängigen Zusammenhängen auch Geschwindigkeitsvariationen berücksichtigt. Dabei sind Kombinationen aus den streckenseitigen Höchstgeschwindigkeiten von 250 km/h und 160 km/h (Profile „S1“ bzw. „S3“) sowie den Geschwindigkeitsprofilen im Bahnhof „B1“ und „B4“ verwendet worden.

Zusätzlich dazu erfolgte auch die Durchführung und Auswertung von Untersuchungen der Fahrzeiten für unterschiedliche Züge mit dem Simulationsprogramm OpenTrack (siehe Abschnitt 4.1.1) auf der erweiterten Infrastruktur „A – B – Z“. Diese Untersuchungen auf der erweiterten Infrastruktur wurden auf durchfahrende Züge fokussiert. Sie dienen insbesondere zur Abschätzung der Auswirkungen unterschiedlicher Einteilungen der Zugtypen auf durchfahrende Züge.

### 4.1.2.2 Strecke

- Topographie
  - Steigungen

Zur Untersuchung der Auswirkungen von längeren Steigungs- oder Gefälleabschnitten erfolgten Untersuchungen mit einem gleichmäßigen Gefälle von -12,5 ‰ sowie einer gleichmäßigen Steigung von 12,5 ‰. Zur Abschätzung der Auswirkungen des Verhältnisses von Strecken- zu Fahrzeughöchstgeschwindigkeit sind diese Untersuchungen sowohl für eine Streckenhöchstgeschwindigkeit von 250 km/h als auch für 160 km/h unternommen worden.

Zum Vergleich wurde auch ein reales Steigungsprofil in Anlehnung an die auf der Schnellfahrstrecke Hannover – Göttingen vorkommenden Steigungen herangezogen. Zur Auswertung sind die Unterschiede der Fahr- und Zugfolgezeiten zum Basisfall mit der jeweils passenden Streckenhöchstgeschwindigkeit („S1“ bzw. „S3“) bestimmt worden.

- zulässige Streckenhöchstgeschwindigkeiten

Zur grundsätzlichen Abschätzung der Auswirkungen der Streckenhöchstgeschwindigkeiten auf die Fahrzeiten der Züge wurden Fahrzeituntersuchungen auf der Basisinfrastruktur mit unterschiedlicher Streckenhöchstgeschwindigkeit von 250 km/h (Profil „S1“) und 160 km/h (Profil „S3“) miteinander verglichen.

Zusätzlich wurden Vergleichsrechnungen eines realen Höchstgeschwindigkeitsprofils mit einer aus diesem Profil ermittelten durchschnittlichen Geschwindigkeit, die als zulässige Streckenhöchstgeschwindigkeit für den gesamten Streckenabschnitt angenommen wird, durchgeführt. Als Vorlage fanden dazu die zulässigen Geschwindigkeiten auf der Schnellfahrstrecke Hannover – Göttingen (siehe Abbildung 9) Verwendung.

- Leit- und Sicherungstechnik (LST)

- Signalstandorte

Als Grundlage diente hier eine Signalstandortverteilung, die in Anlehnung an die realen Signalstandorte eines Abschnittes der Schnellfahrstrecke Hannover – Göttingen erstellt wurde. Zusätzlich dazu wurden für Vergleichsrechnungen die durchschnittlichen Blocklängen in diesem Abschnitt abgeschätzt. Außerdem erfolgten weitere Rechnungen mit einer verbesserten Schätzung der durchschnittlichen Blockabstände in diesem Abschnitt unter Berücksichtigung von bekannten bzw. vermuteten Signalstandorten im Bahnhofsumfeld bzw. an vorhandenen Abzweigstellen auf der freien Strecke.

- Sicherungssystem

In Kombination mit den Berechnungen zur Abschätzung der Auswirkungen der Verteilung der Signalstandorte wurden auch die Auswirkungen durch die Linienförmige Zugbeeinflussung (LZB) mit Führerstandssignalisierung sowie die Punktförmige Zugbeeinflussung (PZB) mit ortsfesten Signalen bestimmt. Dazu sind alle im vorherigen Abschnitt beschriebenen Berechnungen jeweils unter Berücksichtigung von LZB als auch von PZB durchgeführt worden. Zur besseren Vergleichbarkeit erfolgte die Untersuchung nur bei einer zulässigen Streckenhöchstgeschwindigkeit von 160 km/h. Außerdem wurde die Annahme getroffen, dass grundsätzlich bei allen für die Untersuchung verwendeten Zugtypen eine LZB-Fahrzeugausstattung vorhanden ist, auch wenn das in der Praxis nicht der Fall wäre.

### 4.1.2.3 Bahnhof

- Topologie

- Fahrstraßenausschlüsse

Es erfolgte die Untersuchung der Auswirkungen unterschiedlicher Bahnhofslayouts auf gleichzeitig mögliche Ein- und Ausfahrten zur Überprüfung der in der Modellierung mit planerischen Zugfolgezeiten verwendeten Parameter. Das Ziel der Untersuchungen bestand daher nicht in der Optimierung der zugrunde liegenden Bahnhofslayouts.

Dazu sind neben dem einfachen Untersuchungsbahnhof „B“ auch Analysen der Bahnhöfe Celle und Nordstemmen aus dem Untersuchungsnetz durchgeführt worden. Beiden zusätzlich untersuchten Bahnhöfen ist gemein, dass an ihnen eine Streckenzusammenführung zweier zweigleisiger Strecken zu einer zweigleisigen Strecke stattfindet. Aufgrund der historischen Entwicklung und des unterschiedlichen Verkehrsaufkommens besitzen die Bahnhöfe aber ein unterschiedliches Layout.

- Topographie

- Weichenabzweiggeschwindigkeiten

Verglichen wurden die Auswirkungen auf die Fahr- und Zugfolgezeiten unterschiedlich abgestufter Weichenabzweiggeschwindigkeiten. Dazu wurden Untersuchungsrechnungen mit den Bahnhofsgeschwindigkeitsprofilen „B1“ und „B4“ durchgeführt.

- Lage der Gleise im Bahnhof

Als Grundlage wurden Untersuchungen der Fahrzeiten für den Basisfall (Bahnhofsgeschwindigkeitsprofil „B1“) nach den jeweiligen Gleisen ausgewertet. Ergänzend dazu wurden auch Untersuchungen mit reduzierten Geschwindigkeiten (Profil „B4“) durchgeführt.

### 4.1.2.4 Zeitdiskretisierung

Zur Abschätzung der Auswirkungen der Zeitdiskretisierung (siehe Kapitel 2.2.1) wurden Untersuchungsrechnungen des Basisfalles mit einer unterschiedlichen Genauigkeit der ausgegebenen Berechnungsergebnisse durchgeführt und miteinander verglichen. Es wurden Zeiteinheiten von einer Sekunde, 30 Sekunden, einer Minute und 5 Minuten berücksichtigt.

## 4.2 Durchführung und Auswertung der Untersuchungen

Für die Ermittlung der bei Anwendung der Modellierung mit planerischen Zugfolgezeiten auftretenden Abweichungen und zu beachtenden Randbedingungen wurden, wie im Kapitel 4.1 erläutert, Fahr- und Zugfolgezeitberechnungen für unterschiedliche Zugtypen und mit abweichenden Randbedingungen durchgeführt. Die so ermittelten Fahr- und Zugfolgezeiten wurden anschließend nach unterschiedlichen Gesichtspunkten ausgewertet. Als Ergebnis dieser Auswertungen wurden unterschiedliche Diagramme erstellt, die in diesem Kapitel dargestellt sind.

Dafür wurden je nach Untersuchungsgegenstand Vergleiche von Fahr- und Zugfolgezeiten für unterschiedliche Fahrspiele durchgeführt und die dabei auftretenden Abweichungen ermittelt. Beispielsweise werden in Abbildung 24 die Fahrzeitunterschiede, die zwischen Zügen unterschiedlicher Baureihen – hier verschiedener ICE – auftreten, dargestellt. Dazu wurden jeweils die Fahrzeitdifferenzen zwischen den Fahrzeiten verschiedener ICE mit denselben Fahrspielen, also z.B. alle ICE die im Untersuchungsbahnhof an Gleis 1 halten, gebildet. Bei Untersuchungen in der erweiterten Infrastruktur „A – B – Z“ (siehe Kapitel 4.1.1), wie bei der hier beschriebenen Abbildung 24, wurden die Maximalwerte der Fahrzeitdifferenzen verwendet. Die sich für die unterschiedlichen Fahrspiele ergebenden Werte wurden dann sortiert und in aufsteigender Reihenfolge, vergleichbar mit einer Summenlinie, im Diagramm dargestellt. Damit soll ein Eindruck der auftretenden Bandbreite der möglichen Abweichungen vermittelt werden.

In Diagrammen mit Ergebnissen zu Fahr- und Zugfolgezeituntersuchungen auf der einfachen Infrastruktur „A – B“ (siehe Kapitel 4.1.1) wurden der jeweilige Durchschnittswert und die zugehörige Standardabweichung der Differenzen verwendet. Die Standardabweichung ist dabei jeweils als obere und als untere Fehlerschranke in den Diagrammen eingezeichnet worden.

Da bei den für die Bewertung der Fahrzeitdifferenzen als Vergleich herangezogenen Werten für die Fahrzeitreserven (vergleiche [DB 2004]) auch von der jeweiligen Fahrzeit abhängige Bestandteile auftreten, wurden neben den absoluten Differenzwerten bei der Auswertung der Fahrzeiten auch die relativen Fahrzeitabweichungen in den zugehörigen Diagrammen dargestellt.

### 4.2.1 Fahrzeuge

Fahrdynamische Fahrzeugparameter besitzen einen deutlichen Einfluss auf die erzielbaren Fahr- und Zugfolgezeiten und sind mit verhältnismäßig geringem

Aufwand zu beschaffen. Daher werden sie als bekannt vorausgesetzt.

Auch die Umweltbedingungen, wie z.B. der Kraftschlussbeiwert oder die Windstärke und -richtung, haben einen nicht unerheblichen Einfluss auf den Fahrtverlauf. Die Auswirkungen dieser Umweltbedingungen werden deshalb in den Fahrzeugparametern weitestgehend berücksichtigt, so dass die praktisch erzielbaren Fahrzeiten – außer unter extremen Bedingungen – den im Rahmen der Fahrplanung ermittelten Fahrzeiten entsprechen.

Ebenso hat das individuelle Verhalten der Triebfahrzeugführer im praktischen Betrieb einen starken Einfluss auf die gefahrenen Fahrzeiten. Im Rahmen der Fahrplanung wird dagegen von einem Standardverhalten ausgegangen, das von allen ausreichend trainierten Triebfahrzeugführern eingehalten werden kann. Dieses Standardverhalten bildet daher eine Grundlage der für die Modellierung mit planerischen Zugfolgezeiten verwendeten Fahr- und Zugfolgezeiten.

#### **4.2.1.1 Einteilung der Zugtypen**

Wie die Berechnungsergebnisse zeigen, spielt die Einteilung der Züge in Zugtypen eine wesentliche Rolle für die Fahrbarkeit der ermittelten Fahrpläne und die verfügbaren Kapazitäten. Je homogener die Züge sind, die einem Zugtypen zugeordnet werden, desto geringer sind die Unterschiede in den Fahr- und Zugfolgezeiten.

Einen sehr starken Einfluss auf die Fahrzeitunterschiede hat auch das Verhältnis von jeweiliger Höchstgeschwindigkeit des Streckenabschnittes zur zulässigen Geschwindigkeit der Züge. Wenn die auf dem jeweiligen Streckenabschnitt realisierbare Höchstgeschwindigkeit der einzelnen Züge differiert, ergeben sich deutliche Fahrzeitunterschiede (siehe Abbildung 24 und Abbildung 25).

In den Diagrammen in Abbildung 24, Abbildung 25 und Abbildung 26 sind die Fahrzeitunterschiede zwischen verschiedenen ICE-Baureihen auf der erweiterten Infrastruktur „A – B – Z“ dargestellt. Dort sind auf der Abszissenachse unterschiedlichen Fahrprofile der untersuchten ICE abgetragen. Diese Fahrprofile unterscheiden sich hinsichtlich der Strecken- und Bahnhofsgeschwindigkeiten sowie den befahrenen Gleisen im Untersuchungsbahnhof „B“. Die aus den berechneten Fahrzeiten ermittelten Fahrzeitunterschiede wurden dabei in aufsteigender Reihenfolge sortiert dargestellt. Zur Ermittlung der Auswirkungen unterschiedlich stark zusammengefasster Zugtypen wurden dabei Untersuchungen mit der

---

Möglichkeiten und Grenzen der Modellierung des Bahnbetriebes mit planerischen Zugfolgezeiten

Zusammenfassung von zwei, drei sowie 5 unterschiedlichen ICE zu jeweils einem Zugtyp durchgeführt.

Bei zwei sehr ähnlichen Zügen, die zu einem Zugtyp zusammengefasst sind, bleiben die Fahrzeitdifferenzen auch bei ungünstigen Streckenhöchstgeschwindigkeiten kleiner als eine Minute bzw. kleiner als 5 %. Dies wird bei eingeschränkter Streckenhöchstgeschwindigkeit, welche die Höchstgeschwindigkeitsunterschiede der einzelnen Züge nivelliert, auch für die Zusammenfassung von 5 unterschiedlichen Zügen zu einem Zugtypen erreicht. Andernfalls können die Fahrzeitunterschiede bei 5 unterschiedlichen Zügen auch mehr als drei Minuten bzw. mehr als 15 % erreichen.

Dieses Ergebnis spricht für eine streckenabschnittsabhängige Zuordnung der Züge in Zugtyp-Klassen, soweit das für die Anwendung der mathematischen Optimierung unbedingt erforderlich ist, um die während der Optimierung maximal verarbeitbare Anzahl von Zugtypen nicht zu überschreiten. Da bei Anwendungsfällen ohne mathematische Optimierung keine Beschränkung der Zugtypen-Anzahl vorliegt, kann dort die individuelle Betrachtung unterschiedlicher Züge gute Ergebnisse liefern.

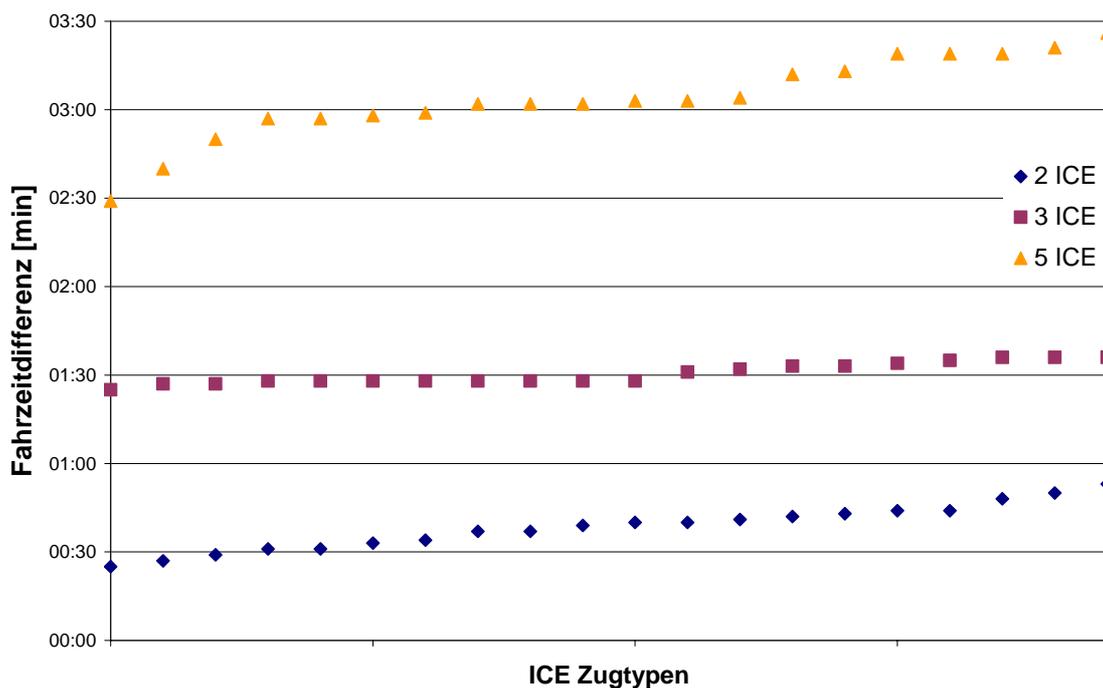


Abbildung 24: Absolute Fahrzeitunterschiede zwischen verschiedenen ICE auf der erweiterten Infrastruktur „A – B – Z“ bei einer Streckenhöchstgeschwindigkeit von 250 km/h (Geschwindigkeitsband S1Bx)

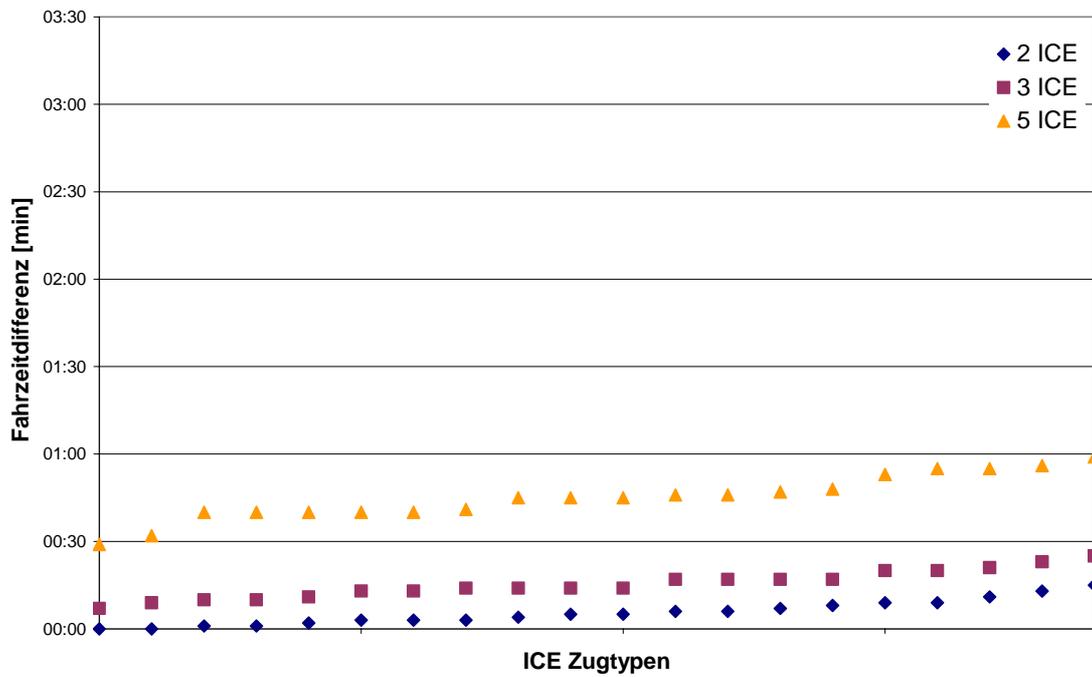


Abbildung 25: Absolute Fahrzeitunterschiede zwischen verschiedenen ICE auf der erweiterten Infrastruktur „A – B – Z“ bei einer Streckenhöchstgeschwindigkeit von 160 km/h (Geschwindigkeitsband S3Bx)

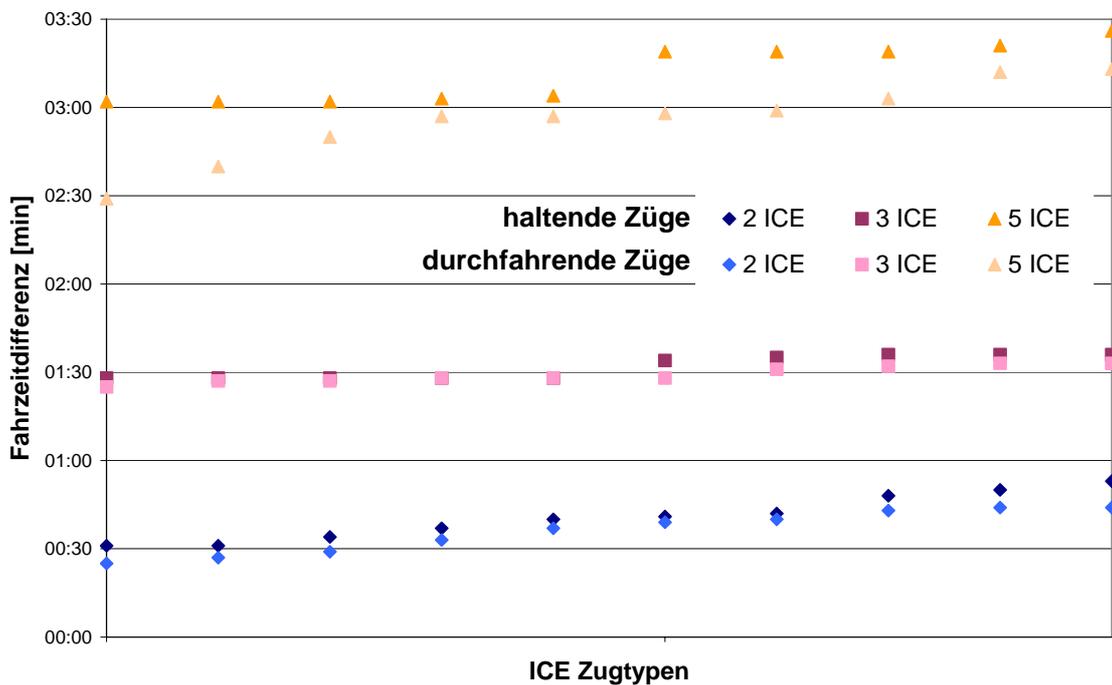


Abbildung 26: Absolute Fahrzeitunterschiede haltender und durchfahrender ICE auf der erweiterten Infrastruktur „A – B – Z“ bei einer Streckenhöchstgeschwindigkeit von 250 km/h (Geschwindigkeitsband S1Bx)

Bedingt durch die Unterschiede im Beschleunigungsvermögen der individuellen Züge sind die Fahrzeitdifferenzen bei haltenden Zügen grundsätzlich etwas größer als bei durchfahrenden Zügen (vgl. Abbildung 26). Bei Betrachtung der relativen Fahrzeitunterschiede zeigt sich, dass durch die kürzeren Fahrzeiten durchfahrender Züge (siehe auch Abbildung 27) deren geringere absoluten Fahrzeitunterschiede nicht immer zu kleineren relativen Fahrzeitunterschieden führen.

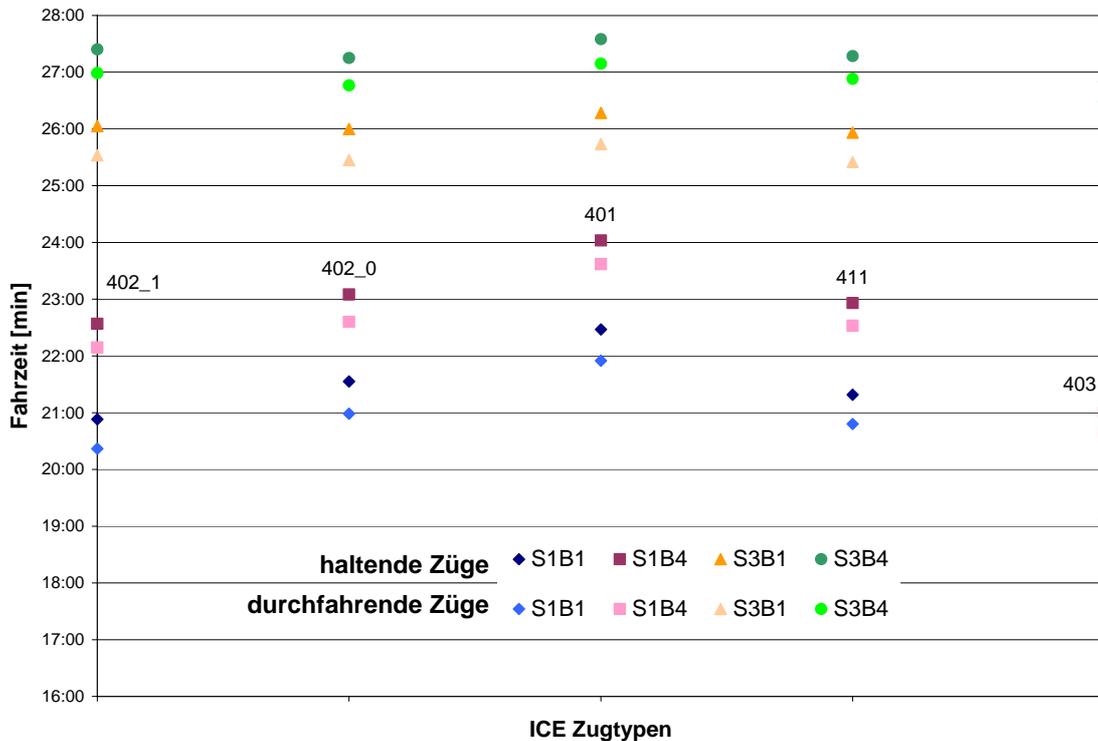


Abbildung 27: Fahrzeiten haltender und durchfahrender ICE für Gleis 1 auf der erweiterten Infrastruktur „A – B – Z“ unterschieden nach den untersuchten ICE-Baureihen

Abbildung 28 zeigt die Zugfolgezeitunterschiede zwischen verschiedenen ICE-Baureihen bei unterschiedlichen Zugtypeinteilungen. Es sind neben den Mittelwerten auch die jeweiligen Standardabweichungen dargestellt und als obere sowie untere Fehlerschranke in das Diagramm eingezeichnet. Auf der Abszissenachse sind in diesem Diagramm die verschiedenen Kombinationen von Fahrprofilen der an den untersuchten Zugfolgefällen jeweils beteiligten Züge abgetragen. Hierbei unterscheiden sich die Fahrprofile durch das befahrene Gleis im Untersuchungsbahnhof „B“.

Dabei liegen die Zugfolgezeitunterschiede mit bis zu 50 Sekunden im Mittel auch bei der Zusammenfassung von 5 ICE zu einem Zugtyp noch unter den

üblichen Pufferzeiten von 60 Sekunden (siehe [DB 2004]). Die Abweichungen der Zugfolgezeitunterschiede von ihrem Mittelwert sind hier allerdings so groß, dass Ausreißer auch über 80 Sekunden erreichen können, wodurch ein Ausgleich mit Pufferzeiten in üblicher Höhe nicht mehr möglich ist.

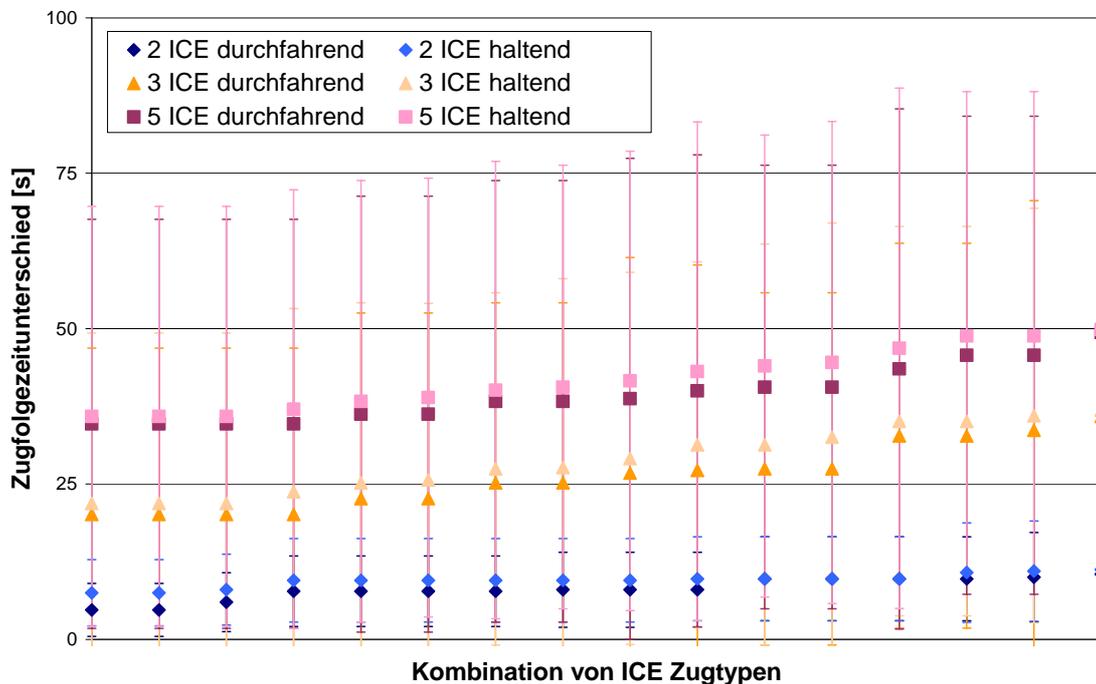


Abbildung 28: Zugfolgezeitunterschiede zwischen verschiedenen ICE bei unterschiedlichen Zugtypeinteilungen

Auch bei der Zusammenfassung von drei verschiedenen ICE treten noch einige wenige Ausreißer von mehr als 60 Sekunden auf. Allerdings liegen bei dieser Konstellation die Zugfolgezeitunterschiede im Mittel bei unter 35 Sekunden. Aber erst wenn nur zwei ICE zusammengefasst werden, lassen sich die auftretenden Abweichungen der Zugfolgezeiten vollständig durch die üblichen Pufferzeiten von 60 Sekunden ausgleichen.

**Fazit:** Die Zuordnung der Züge zu Zugtypen hat einen erheblichen Einfluss auf die Genauigkeit der ermittelten Fahr- und Zugfolgezeiten, die wiederum wesentlich die Fahrbarkeit der damit ermittelten Fahrpläne und die verfügbaren Kapazitäten beeinflussen. Je homogener die Züge eines Zugtyps sind, desto geringer sind die Fahrzeit- und Zugfolgezeitunterschiede der Züge innerhalb eines Zugtypen. Diese Unterschiede müssen für die Festlegung der Größe von Reserve- und Pufferzeiten berücksichtigt werden.

Für die Fahrplanung sind Vorgaben zur Fahrweise möglich, wodurch sich die Unterschiede zwischen den Fahr- und Zugfolgezeiten zwischen den

verschiedenen Zügen nivellieren. Die schnelleren Züge passen sich den langsameren Zügen an und haben dadurch höhere Reservezeiten, die zum Aufholen von Verspätungen oder auch zum Energiesparen genutzt werden können. Allerdings werden dadurch die Möglichkeiten zur Erzielung kürzerer Fahrzeiten durch schnellere Fahrzeuge nicht ausgeschöpft. Wenn die kürzere Fahrzeit für einzelne Züge ein wichtiges Kriterium der Trassenwahl ist, dann sollten diese Züge jeweils einen eigenständigen Zugtypen bilden bzw. nur mit anderen gleichartigen Zügen zusammengefasst werden. Diese separate Einteilung sollte aber bei streckenabschnittsabhängiger Einteilung der Zugtypen nur für die Streckenabschnitte erfolgen, in denen relevante Unterschiede auftreten.

Für Betriebsuntersuchungen können diese Vorgaben zu Fahrweisen nicht verwendet werden. Deshalb ist dabei nur die Zusammenfassung sehr ähnlicher Züge vertretbar. Nach Möglichkeit sollte aber auch hier bei einer streckenabschnittsabhängigen Zugtypeinteilung die Einteilung ähnlicher Züge in unterschiedliche Zugtypen nur für Streckenabschnitte vorgenommen werden, an denen deutliche Unterschiede vorkommen. Daher ist für Untersuchungen des Betriebsablaufes in kleinen Teilnetzen eine Zugtypeneinteilung nicht bzw. kaum praktikabel, um belastbare Ergebnisse zu erzielen.

## 4.2.2 Strecken

### 4.2.2.1 Topographie

In den in diesem Abschnitt verwendeten Diagrammen werden auf der Abszissenachse die verschiedenen untersuchten ICE-Baureihen bzw. – bei Betrachtung der Zugfolgezeiten – die Kombinationen der an den Zugfolgefällen beteiligten Baureihen in aufsteigender Reihenfolge der ermittelten Unterschiede abgetragen.

#### Steigungsprofil

Untersucht wird hier, welchen Einfluss die Nichtberücksichtigung von Steigungen auf die ermittelten Fahr- und Zugfolgezeiten hat. Dazu erfolgte ein Vergleich von Fahr- bzw. Zugfolgezeiten, deren Berechnungen unter Einbeziehung exakter Steigungsdaten durchgeführt wurden, gegenüber Fahr- bzw. Zugfolgezeiten, deren Berechnung ohne die Berücksichtigung von Steigungen stattfand.

Es ergibt sich in diesem Szenario in Abhängigkeit vom Zugtyp und dessen Zugkraftreserven keine oder nur eine geringe Erhöhung der Fahrzeit auf der untersuchten Musterstrecke von höchstens 25 Sekunden bzw. ca. 3 %. Dies ist

---

Möglichkeiten und Grenzen der Modellierung des Bahnbetriebes mit planerischen Zugfolgezeiten

auf die sich bei Betrachtung über den gesamten Streckenabschnitt ergebende Steigung von durchschnittlich 4,5 ‰ zurückzuführen. Außerdem können sich durch die Überlagerung von Steigungs- und Gefälleabschnitten mit Brems- bzw. Beschleunigungsphasen je nach konkreter Kombination noch zusätzliche Fahrzeitverlängerungen ergeben.

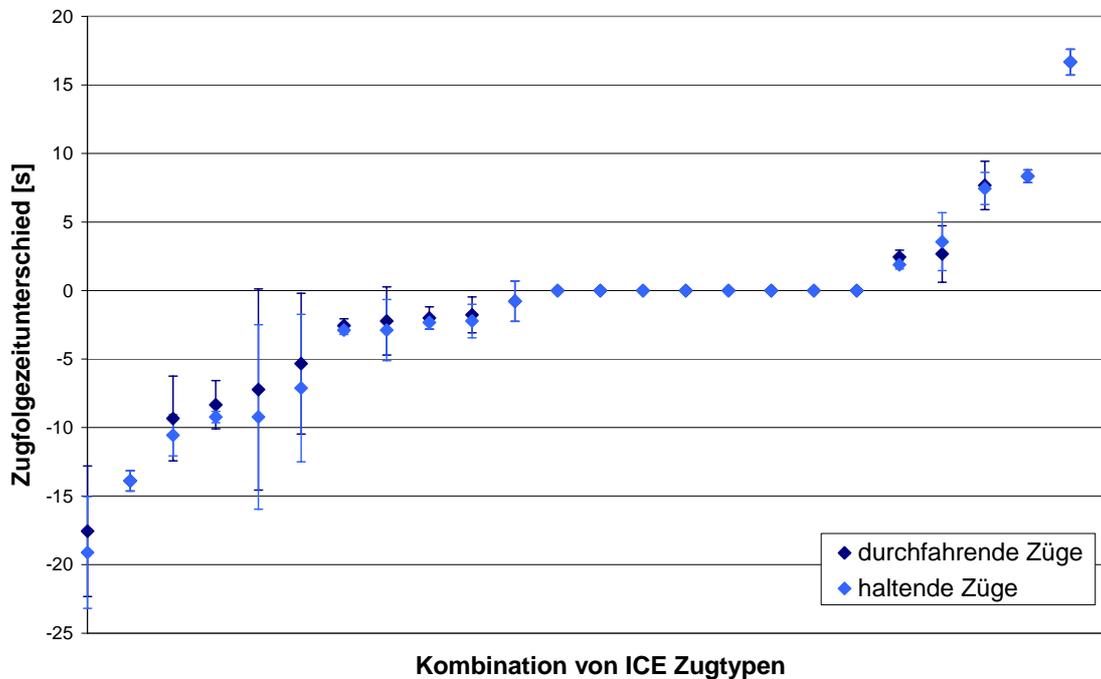


Abbildung 29: Zugfolgezeitunterschiede für ICE zwischen einer ebenen Strecke und einer Strecke mit realem Steigungsprofil

Die Zugfolgezeiten sind zwischen gleichen Zügen auf einer Strecke mit realem Steigungsprofil etwas geringer (bis zu 15 Sekunden) als auf einer Strecke ohne Steigung. Zwischen unterschiedlichen Zügen ergibt sich ein uneinheitliches Bild. Die Abweichungen liegen je nach konkretem Konfliktfall im Bereich von +/- 20 Sekunden (siehe Abbildung 29). Dabei ergibt sich ein ähnliches Verhalten haltender und durchfahrender Züge. Durchfahrende Züge haben in diesem Zusammenhang tendenziell etwas geringere Zugfolgezeitveränderungen.

Eine gleichmäßige, große Steigung von 12,5 ‰ führt zu teilweise deutlichen Fahrzeitverlängerungen von bis zu 200 Sekunden gegenüber der Nichtberücksichtigung der Steigungen für die Beispielstrecke (siehe Abbildung 30). Dies ist abhängig von den vorhandenen Zugkraftreserven der Züge bei den jeweiligen Streckengeschwindigkeiten. Bei der Berücksichtigung einer geringeren Höchstgeschwindigkeit von 160 km/h für ICE, die bei dieser

Geschwindigkeit einen stärkeren Zugkraftüberschuss besitzen als bei 250 km/h, ergeben sich deutlich geringere Fahrzeitverlängerungen gegenüber Zugfahrten auf ebenen Strecken von bis zu 70 Sekunden (siehe Abbildung 30).

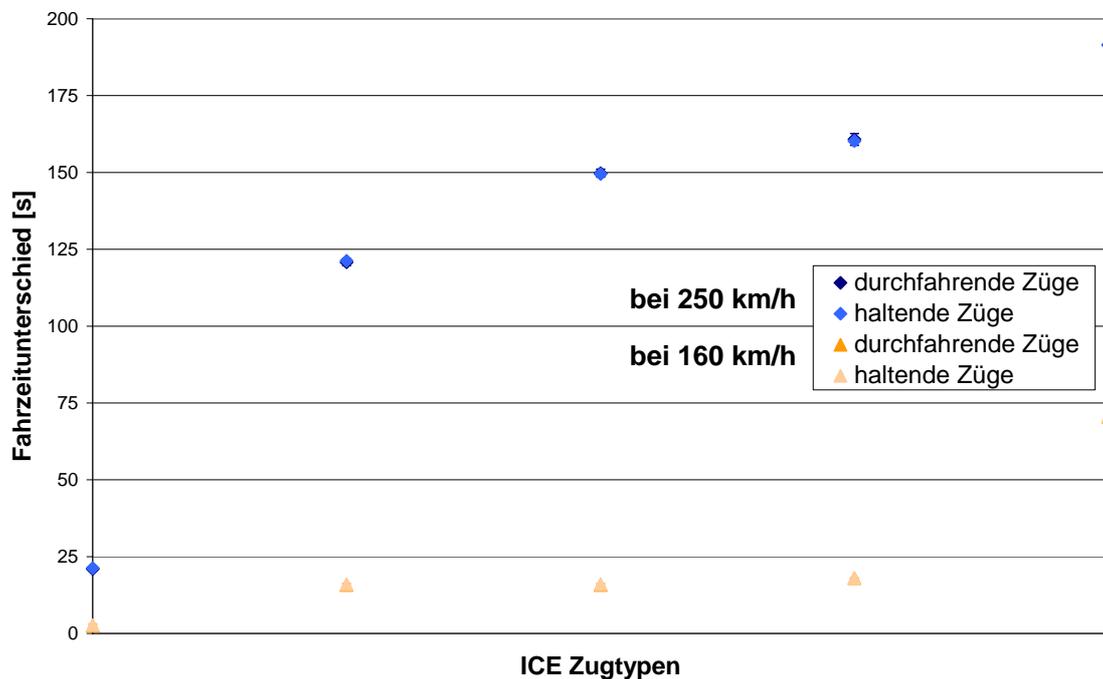


Abbildung 30: Fahrzeitunterschiede für ICE zwischen einer ebenen Strecke und einer Strecke mit gleichmäßiger Steigung (12,5 ‰) bei unterschiedlichen Streckenhöchstgeschwindigkeiten

Auch bei verringerter Höchstgeschwindigkeit von 160 km/h sind bei beim ICE-2-Halbzug die Fahrzeitverlängerungen mit ca. 8 % noch oberhalb der üblichen Fahrzeitreserven. Bei den anderen untersuchten ICE sind in diesem Fall die Fahrzeitverlängerungen mit ca. 2 % bzw. sogar nur 0,3 % beim ICE-3 deutlich geringer und innerhalb der üblichen Höhe der Fahrzeitreserven. Bei einer Höchstgeschwindigkeit von 250 km/h sind die Fahrzeitverlängerungen bei allen untersuchten ICE bis auf den ICE-3 deutlich oberhalb der üblichen Pufferzeiten. Selbst bei diesem Zugtyp mit dem auch bei einer Geschwindigkeit von 250 km/h noch deutlich vorhandenen Zugkraftüberschuss wirken sich die längeren Beschleunigungsabschnitte fahrzeitverlängernd aus.

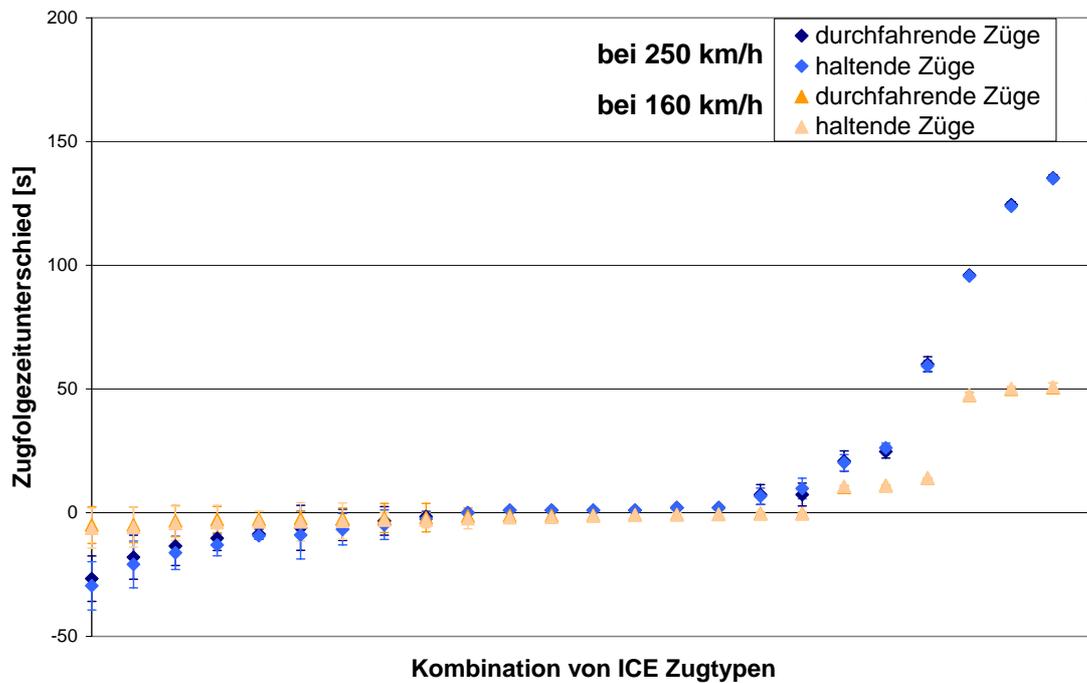


Abbildung 31: Zugfolgezeitunterschiede für ICE zwischen einer ebenen Strecke und einer Strecke mit gleichmäßiger Steigung (15 ‰) bei unterschiedlichen Streckenhöchstgeschwindigkeiten

Die unterschiedlichen Fahrzeitveränderungen durch die Steigung wirken sich je nach den am jeweiligen Konfliktfall beteiligten Zugtypen und der Lage ihres Konfliktpunktes verschieden auf die Zugfolgezeiten aus. Bei gleichen Zugtypen ergeben sich z.T. sogar geringfügig kürzere Zugfolgezeiten als auf einer ebenen Strecke. Bei ungünstigen Zugpaarungen können sich die Zugfolgezeiten aber auch teilweise um über 150 Sekunden verlängern (siehe Abbildung 31). Dabei sind nur unwesentliche Unterschiede zwischen haltenden und durchfahrenden Zügen festzustellen.

Bei einer verringerten Höchstgeschwindigkeit von 160 km/h fallen die Zugfolgezeitveränderungen nicht so stark aus. Die größten Verlängerungen betragen in diesem Fall ca. 65 Sekunden und befinden sich damit noch im Bereich der üblicherweise verwendeten Pufferzeiten. Bei mehr als 80 % der betrachteten Zugfolgefälle ergeben sich aber nur Zugfolgezeitveränderungen, die weniger als 25 Sekunden betragen.

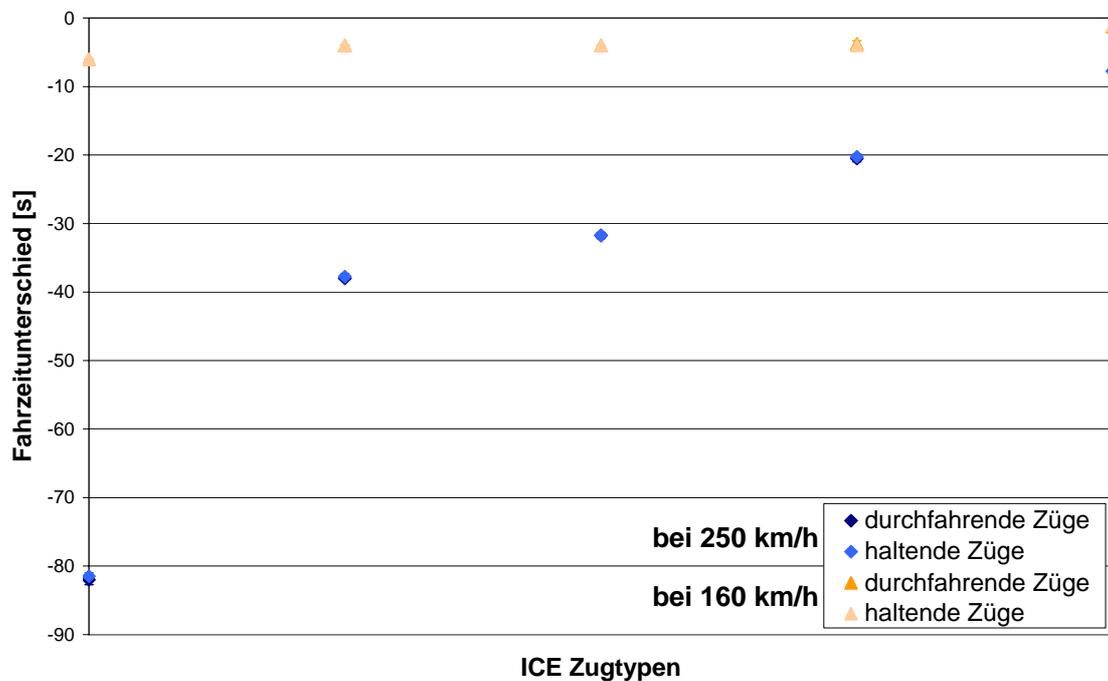


Abbildung 32: Fahrzeitunterschiede für ICE zwischen einer ebenen Strecke und einer Strecke mit gleichmäßigem Gefälle (-12,5 ‰) bei unterschiedlichen Streckenhöchstgeschwindigkeiten

Bei einem gleichmäßigen Gefälle von -12,5 ‰ treten teilweise deutliche Verkürzungen der Fahrzeiten gegenüber der Zugfahrt auf einer ebenen Strecke von bis zu 80 Sekunden auf (siehe Abbildung 32). Dies ist insbesondere bei Zügen mit geringem Zugkraftüberschuss auf die verkürzten Beschleunigungsabschnitte durch das Gefälle zurückzuführen. Bei einer Verringerung der zulässigen Streckenhöchstgeschwindigkeit auf 160 km/h verringern sich die erzielten Fahrzeitverkürzungen auf wenige Sekunden. Da Fahrzeitverkürzungen gegenüber Fahrzeitverlängerungen sich nicht negativ auf die Fahrbarkeit eines vorgegebenen Fahrplanes auswirken, sind die Auswirkungen von nicht berücksichtigten Gefälleabschnitten nur als gering einzustufen.

Die Auswirkungen von Gefälleabschnitten auf die Zugfolgezeiten bieten je nach den am jeweiligen Konfliktfall beteiligten Zugtypen und der Lage ihres Konfliktpunktes ein unterschiedliches Bild. Zum Teil sind deutliche Zugfolgezeitverkürzungen von bis zu -70 Sekunden zu erkennen (siehe Abbildung 33). Diese ergeben sich durch die deutliche Fahrzeitverkürzung des vorausfahrenden langsameren Zuges (in diesem Fall der ICE-2-Halbzug). Die Zugfolgezeiten zwischen gleichen Zugtypen ändern sich nur geringfügig.

In einigen Fällen sind auch Zugfolgezeitverlängerungen von im Mittel bis zu 25 Sekunden festzustellen. Diese treten dann auf, wenn nachfolgende langsamere Züge durch die Gefällestrecke schneller werden, aber der vorausfahrende Zug nicht in demselben Maße von der Gefällestrecke profitieren kann. Bei den hier untersuchten ICE tritt dieses Phänomen bei einem vorausfahrenden ICE-T auf, der die Streckenhöchstgeschwindigkeit von 250 km/h nicht voll ausnutzen kann und daher durch die Gefällestrecke seine Fahrzeit nicht so sehr verkürzen kann, wie nachfolgende ICE-1 oder ICE-2.

Bei einer Verringerung der zulässigen Streckengeschwindigkeit auf 160 km/h nivellieren sich diese Unterschiede deutlich, so dass nur geringfügige Zugfolgezeitunterschiede von bis zu +/- 5 Sekunden auftreten (vgl. Abbildung 33).

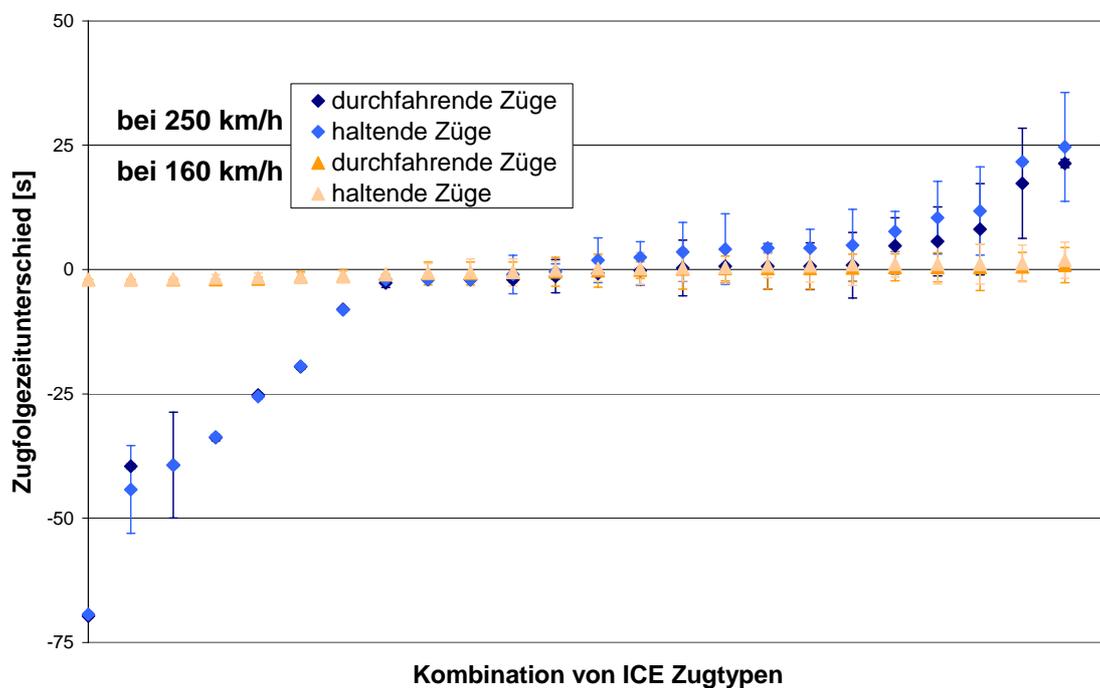


Abbildung 33: Zugfolgezeitunterschiede für ICE zwischen einer ebenen Strecke und einer Strecke mit gleichmäßigem Gefälle (-12,5 ‰) bei unterschiedlichen Streckenhöchstgeschwindigkeiten

**Fazit:** Insgesamt lässt sich feststellen, dass Steigungen und Gefälle einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Fahr- und Zugfolgezeiten haben können. Gefälleabschnitte sind durch die sich daraus ergebenden Fahrzeitverkürzungen weniger kritisch. Hohe Steigungen über einen längeren Streckenabschnitt hinweg führen gerade bei Zügen mit nur geringem Zugkraftüberschuss bei den zulässigen Streckengeschwindigkeiten zu sehr

großen Fahrzeitverlängerungen. Diese können nicht pauschal durch höhere Fahrzeitreserven ausgeglichen werden. Daher sollten bei längeren Steigungsabschnitten die Steigungen überschlägig berücksichtigt werden. Diese Wirkungen verringern sich aber bei niedrigeren zulässigen Streckengeschwindigkeiten durch den höheren Zugkraftüberschuss deutlich.

In der Realität treten üblicherweise mehrere unterschiedliche Steigungs- und Gefälleabschnitte innerhalb eines Streckenabschnittes auf, so dass sich die fahrzeitverlängernden Wirkungen von Steigungsabschnitten und die fahrzeitverkürzenden Wirkungen von Gefälleabschnitten teilweise ausgleichen können. Die im Flachland vorhandenen geringeren Streckenneigungen lassen sich daher üblicherweise durch Fahrzeitreserven ausgleichen. In bergigeren Gegenden ist dies durch die geringere Wahrscheinlichkeit für eine ausgleichende Abwechslung von Steigungs- und Gefälleabschnitten innerhalb eines Streckenabschnittes nicht möglich. Dort sollten die auftretenden Steigungen abgeschätzt werden und in die Fahrzeitberechnung einfließen.

Die Auswirkungen auf die Zugfolgezeiten sind abhängig von den jeweiligen Konfliktfällen und daher schwieriger abzuschätzen. Üblicherweise treten aber Verlängerungen der Zugfolgezeiten nur in einer Höhe auf, die sich im Rahmen der üblichen Pufferzeiten bewegt. Nur bei hohen Steigungen über längere Streckenabschnitte treten teilweise so hohe Zugfolgezeitverlängerungen auf, dass eine höhere Pufferzeit einkalkuliert werden sollte oder eine Abschätzung der Steigung in die Fahr- und Zugfolgezeitberechnung einfließen sollte.

#### Profil der zulässigen Höchstgeschwindigkeiten (VzG)

Wie die Berechnungsergebnisse zeigen, hat die zulässige Streckenhöchstgeschwindigkeit einen deutlichen Einfluss auf die ermittelten Fahr- und Zugfolgezeiten (vgl. Abbildung 34). Der Höchstgeschwindigkeitsunterschied von 250 km/h zu 160 km/h führt dabei auf dem 60 km langen Untersuchungsabschnitt der erweiterten Infrastruktur „A – B – Z“ erwartungsgemäß zu Fahrzeitverlängerungen von bis zu 8 min. Dies entspricht einer relativen Fahrzeitänderung von über 30 %. Diese Unterschiede sind deutlich größer als die üblichen Fahrzeitreserven und lassen sich daher nicht ausgleichen.

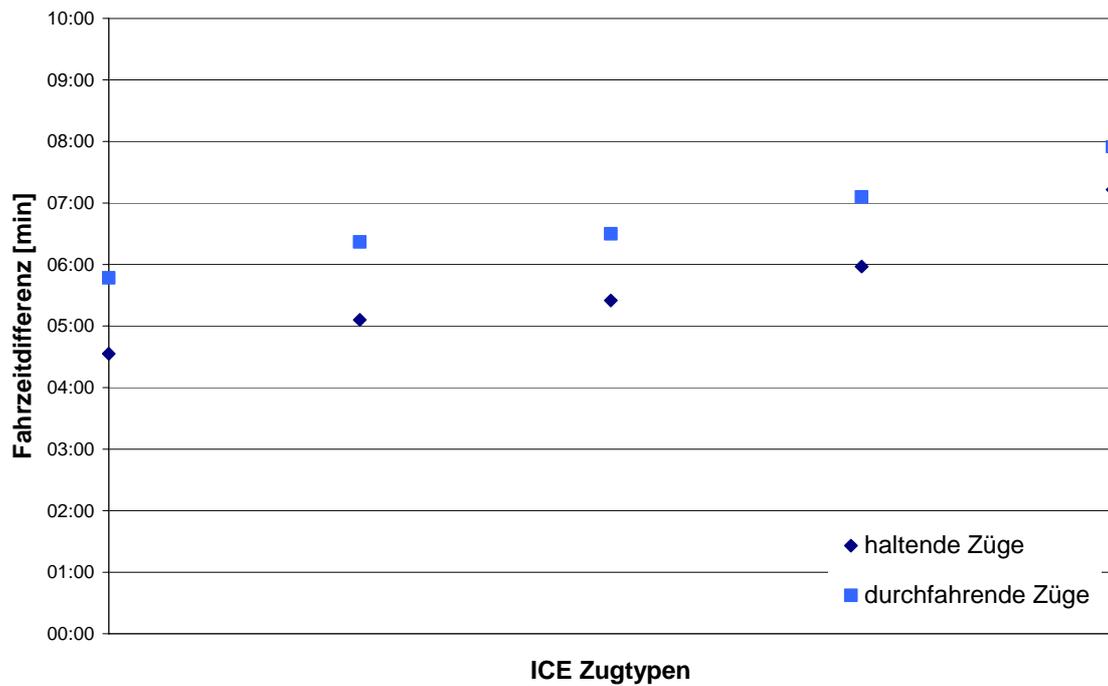


Abbildung 34: Absolute Fahrzeitunterschiede einzelner ICE bei unterschiedlichen Streckenhöchstgeschwindigkeiten (160 km/h und 250 km/h) im durchgehenden Hauptgleis (Gleis 6) auf der erweiterten Infrastruktur „A – B – Z“

Die Verwendung einer gleichmäßigen, durchschnittlichen Streckenhöchstgeschwindigkeit führt im Vergleich zu einem realen Höchstgeschwindigkeitsprofil zu um ca. 30s bis 50s kürzeren Fahrzeiten, da durch Beschleunigungs- und Bremsphasen zusätzliche Zeit benötigt wird. Deren genaue Höhe ist jedoch je nach beteiligtem Zugtypen unterschiedlich und liegt mit 4,5 % bis 7,5 % noch im Bereich der üblichen Fahrzeitreserven bzw. etwas oberhalb.

Dies ist abhängig vom Beschleunigungsvermögen und der Fahrzeughöchstgeschwindigkeit im Vergleich zur Höhe der zulässigen Streckenhöchstgeschwindigkeiten. Außerdem spielt die Bandbreite und die Häufigkeit der Geschwindigkeitswechsel eine sehr starke Rolle.

Insbesondere stärkere Geschwindigkeitseinbrüche an Stellen, an denen normalerweise nahe der Höchstgeschwindigkeit gefahren wird, verlängern die Fahrzeiten deutlich. Je länger der Zug und je geringer dessen Beschleunigung ist, desto stärker wirken sich kurze Geschwindigkeitseinbrüche (z.B. durch Weichen, ungesicherte Bahnübergänge oder nicht ausreichend belastbare Brücken) aus. Am stärksten davon betroffen sind Personenfernverkehrszüge

aufgrund ihrer großen Höchstgeschwindigkeit. Bei Güterzügen wirken sich durch ihre deutlich geringere Höchstgeschwindigkeit nur Geschwindigkeitseinbrüche auf sehr niedrige Geschwindigkeiten stärker aus. Befinden sich diese Geschwindigkeitseinbrüche dagegen im Umfeld planmäßiger Halte und somit in Bereichen, in denen der Zug deutlich langsamer fährt, sind die Auswirkungen auf die Fahrzeit deutlich geringer und somit meist vernachlässigbar (siehe auch Abschnitt 0).

Die Zugfolgezeiten zwischen gleichen Zügen werden durch die vorgegebenen Streckenhöchstgeschwindigkeiten nur unwesentlich beeinflusst, da sich die Fahrzeiten der Züge auf gleiche Weise ändern. Zugfolgezeiten zwischen verschiedenen Zügen können sich aber sehr deutlich verändern (siehe Abbildung 35). Dies ist abhängig von den Auswirkungen auf die Fahrzeiten der beteiligten Züge und die Lage des Konfliktpunktes auf der Strecke. Dabei können sowohl Zugfolgezeitverlängerungen, die größer als die üblichen Pufferzeiten von 60 Sekunden sind, als auch kleinere Zugfolgezeitverkürzungen von bis zu 20 s auftreten.

**Fazit:** Insgesamt lässt sich erkennen, dass das Profil der zulässigen Geschwindigkeiten (VzG) einen deutlichen Einfluss auf die Genauigkeit hat und für die Bestimmung der Fahr- und Zugfolgezeiten berücksichtigt werden muss. Unter Inkaufnahme von Genauigkeitseinbußen kann ggf. auf ein exaktes VzG verzichtet werden, wenn zumindest die generelle Streckenhöchstgeschwindigkeit sowie deutliche Geschwindigkeitseinbrüche außerhalb des Einflussbereichs von Halten bekannt sind. Als deutliche Geschwindigkeitseinbrüche sind für Güter- und Regionalverkehrszüge Abschnitte mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit kleiner als 50 km/h bzw. für Fernverkehrszüge und Züge des schnellen Regionalverkehrs (Regionalexpresszüge mit einer Höchstgeschwindigkeit von 160 km/h) kleiner als 100 km/h bei einer Langsamfahrstelle mit einer Länge von 100 m je 10 km Weglänge anzusehen.

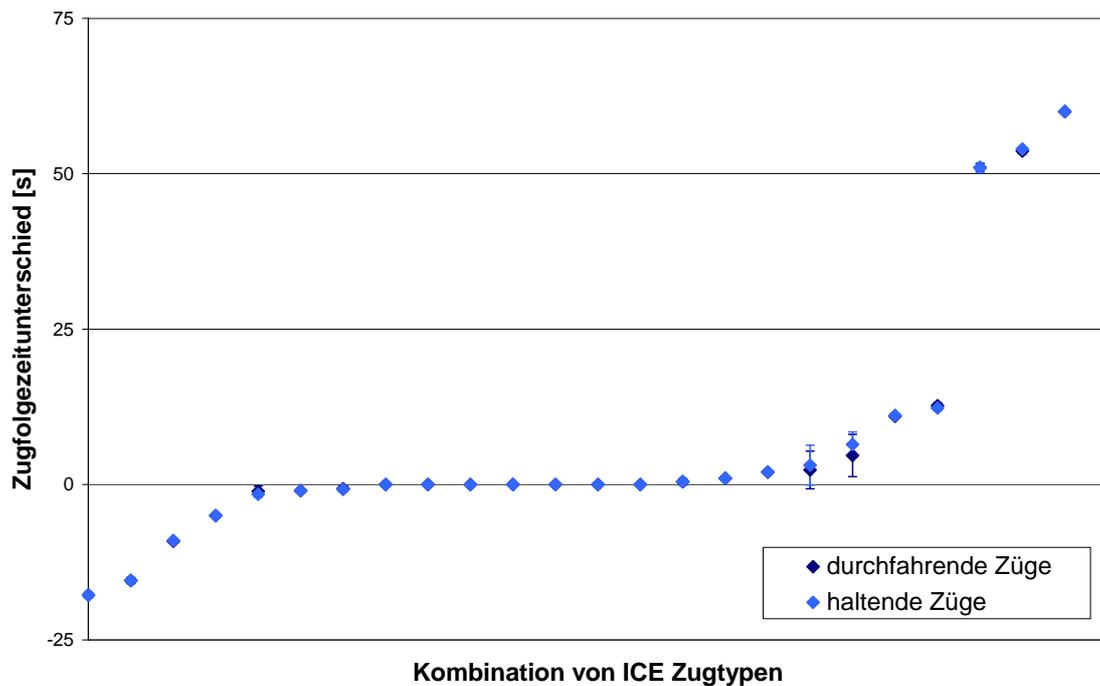


Abbildung 35: Zugfolgezeitunterschiede für ICE zwischen einem realen Höchstgeschwindigkeitsprofil und der Verwendung einer geschätzten gleichmäßigen Höchstgeschwindigkeit

#### 4.2.2.2 Sicherungstechnik

##### Signalpositionen/Blocklängen

Die Positionen von Signalen und die sich daraus ergebenden Längen der Blockabschnitte haben keinen Einfluss auf die geplanten Fahrzeiten, da bei der Fahrplanung davon ausgegangen wird, dass keine Behinderungen durch die Zugfolge auftreten. Hier werden deshalb nur Zugfolgezeiten miteinander verglichen. In die Berechnungen der Zugfolgezeiten fließen durchschnittliche bzw. aus statistischen Ermittlungen geschätzte Blockabstände ein. In einem weiteren Schritt wurden diese Schätzungen durch die Einbeziehung der Positionen von Ein- und Ausfahrtsignalen verbessert. Diesen Zugfolgezeiten aus geschätzten Signalpositionen werden Zugfolgezeiten gegenübergestellt, die unter Einbeziehung exakter Signalpositionen berechnet wurden.

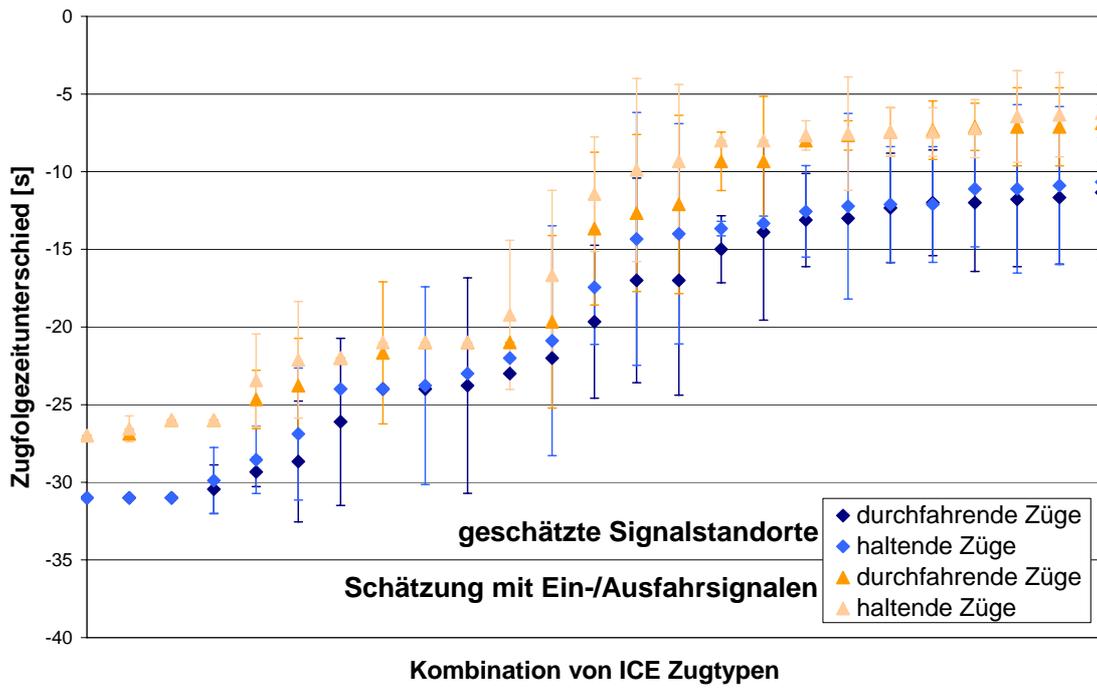


Abbildung 36: Zugfolgezeitunterschiede für unterschiedliche ICE bei geschätzten Signalpositionen

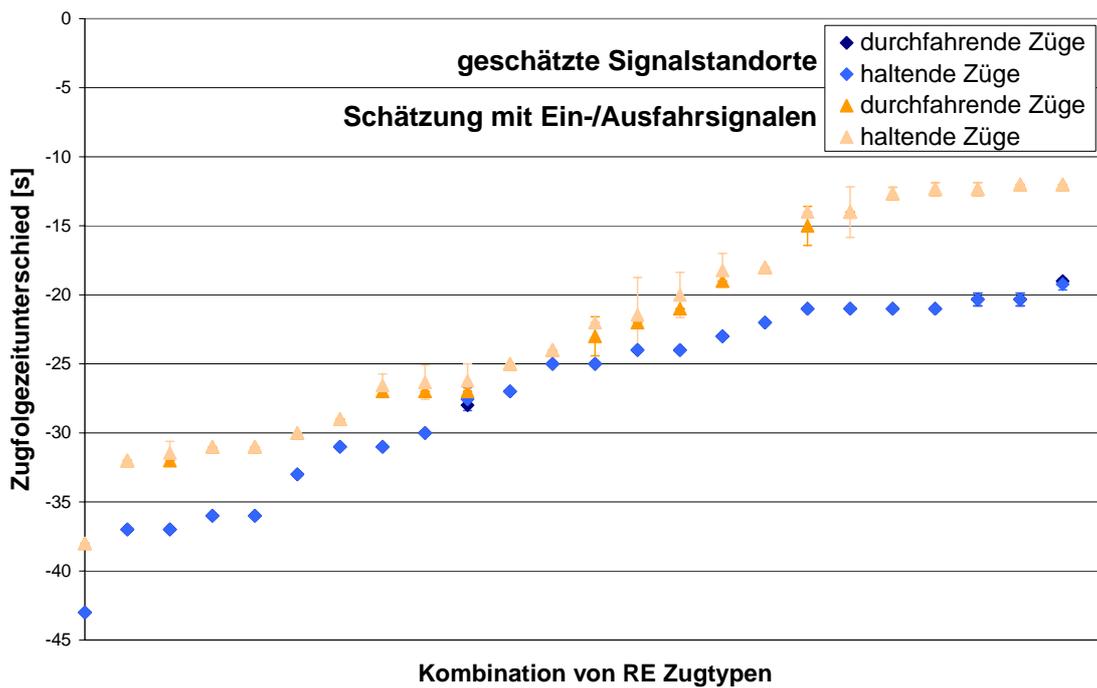


Abbildung 37: Zugfolgezeitunterschiede für unterschiedliche RE bei geschätzten Signalpositionen unter Verwendung von LZB

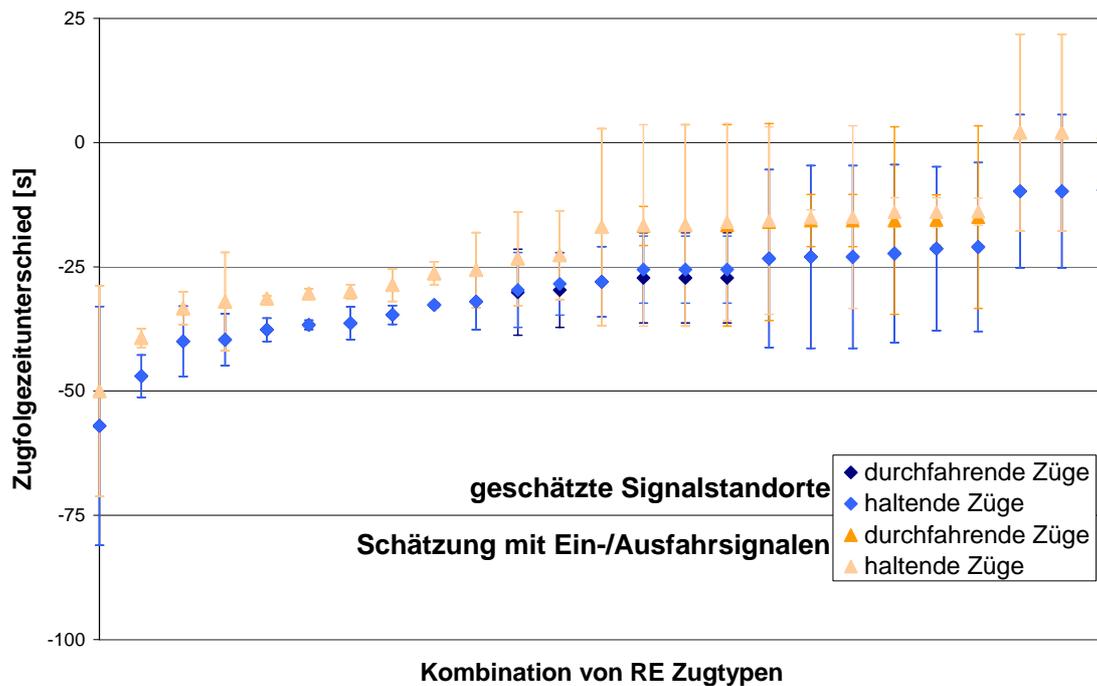


Abbildung 38: Zugfolgezeitunterschiede für unterschiedliche RE bei geschätzten Signalpositionen unter Verwendung von PZB

Bei Verwendung geschätzter Signalpositionen wurden gegenüber der Berücksichtigung realer Signalpositionen zu kurze Zugfolgezeiten bestimmt. Diese Zugfolgezeitverkürzungen betragen bei ICE bis zu 35 Sekunden (siehe Abbildung 36) und bei RE, welche die Linienförmige Zugbeeinflussung verwenden, bis zu 45 Sekunden (siehe Abbildung 37). Bei RE mit Punktförmiger Zugbeeinflussung können sich durch die auf dieser Strecke sehr unterschiedlich verteilten Signalpositionen der ortsfesten Signale der Punktförmigen Zugbeeinflussung bei der Nutzung geschätzter Signalpositionen größere Zugfolgezeitverkürzungen von z.T. über 60 Sekunden ergeben (siehe Abbildung 38).

Diese Zugfolgezeitverkürzungen werden durch die Annahme gleichmäßiger Signalabstände und Blocklängen bei der Ermittlung der geschätzten Signalstandorte hervorgerufen. Da in der Realität die Blockabstände meist nicht gleichmäßig verteilt sind, werden durch die Schätzungen zu kurze Zugfolgezeiten ermittelt. Auch eine Verbesserung der Schätzung unter Berücksichtigung von Ein- und Ausfahrtsignalen von Bahnhöfen bzw. von Deckungssignalen an Abzweigungen auf der freien Strecke führt immer noch zu einer Unterschätzung der Zugfolgezeiten. Durch die Anpassung der Schätzung lässt sich aber eine durchschnittliche Verbesserung von ca. 5 – 10 Sekunden erreichen.

## 4.2.3 Bahnhöfe

### 4.2.3.1 Topologie

#### Fahrstraßen/Fahrtenausschlüsse

Der Untersuchungsbahnhof „B“ ist simpel aufgebaut (siehe Abbildung A1 im Anhang). Allerdings ist er nicht symmetrisch, so dass in „B“ haltende Züge, die von „A“ kommen, gegebenenfalls auf eins der vier Nebengleise „1-4“ ausweichen müssen. Dazu ist das Kreuzen von Fahrwegen der Gegenrichtung notwendig. Die dabei auftretenden Zugfolgezeiten betragen auch bei günstiger Lage der beteiligten Signale und Zugschlussmeldestellen je nach den betroffenen Zügen und zulässigen Geschwindigkeiten bis zu zwei Minuten. Allerdings ist ein derartiger Laufweg üblicherweise nur bei zwei gleichzeitig haltenden bzw. durchfahrenden Zügen in dieser Richtung erforderlich.

Dieses Phänomen ist deshalb mit der Angabe von Kapazitäten für haltende und durchfahrende Züge nicht direkt abzubilden. Erst bei der Verwendung von Zeiteinheiten, die deutlich größer als zwei Minuten sind, kann mit Hilfe statistischer Verfahren eine geeignete Kapazität abgeschätzt werden. Für eine genauere Abbildung dieses Bahnhofs ist daher eine Aufteilung in zwei Bahnhofsteile erforderlich.

Der erste Bahnhofsteil wird durch die beiden durchgehenden Hauptgleise gebildet und besitzt eine Kapazität von einem Zug je Richtung. Die vier Nebengleise des Bahnhofs bilden den zweiten Bahnhofsteil. Dieser hat dabei eine Kapazität von vier Zügen in beiden Richtungen ohne Unterscheidung von richtungsabhängigen Kapazitäten. Das Kreuzen der Fahrwege wird bei dieser Aufteilung dann durch die Angabe von Zugfolgezeiten zwischen den kreuzenden Streckenabschnitten abgebildet.

Eine vergleichbare Situation ist auch am untersuchten Knotenbahnhof Nordstemmen (siehe Abbildung 39 rechts) festzustellen. Da dort die Zusammenführung der beiden Strecken erst am in Richtung Göttingen liegenden Bahnhofskopf erfolgt, besteht dieser Knotenbahnhof aus zwei getrennten Bahnhofsteilen. Daher ist auch in diesem Fall eine getrennte Abbildung der beiden Bahnhofsteile erforderlich. Der auftretende Kreuzungskonflikt zwischen einfahrenden Zügen in Richtung Hannover und Zügen, die aus Richtung Hildesheim kommend aus dem Bahnhof Nordstemmen ausfahren, ist durch die Angabe von Zugfolgezeiten zwischen diesen beiden Streckenabschnitten abzubilden. Alle anderen auftretenden Konflikte sind durch die Zugfolgezeiten für einander folgende Züge abgedeckt.

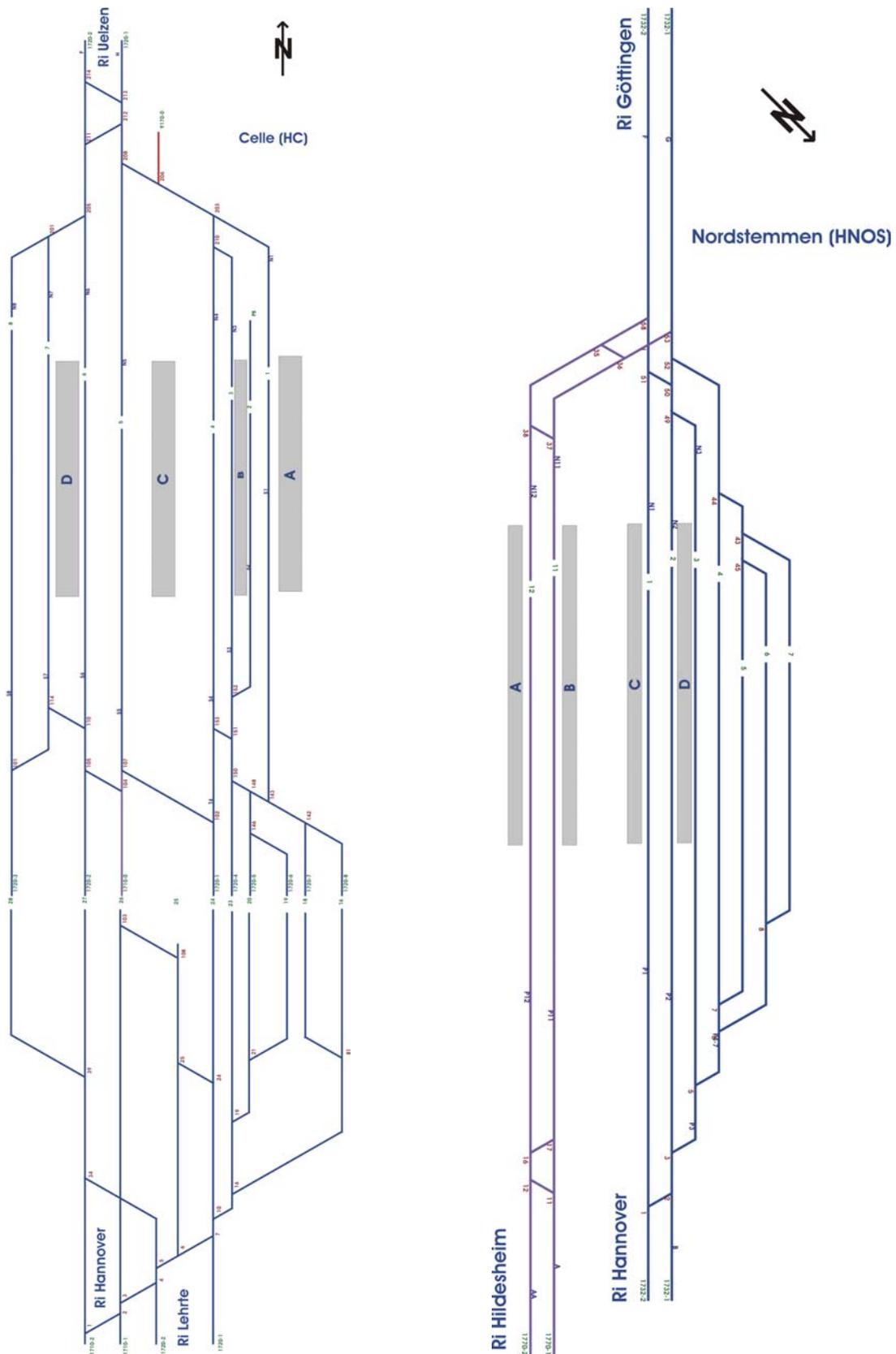


Abbildung 39: Schematisches Bahnhofslayout der Bahnhöfe Celle (links) und Nordstemmen (rechts) nach [SNB 2008]

Im Gegensatz dazu ist der Knotenbahnhof Celle (Abbildung 39 links) auch ohne Unterteilung in weitere Knoten abzubilden. Dies ist aufgrund seiner an beiden Bahnhofsköpfen vorhandenen Streckenverknüpfungen und der vielfältigen Gleisverbindungen innerhalb des Bahnhofs möglich. Dadurch steht eine große Zahl von Fahrwegen für die unterschiedlichen Züge zur Verfügung, die eine flexible Betriebsabwicklung ermöglichen.

Dabei zeigt sich deutlich, dass die Kapazitäten für haltende Züge von den Kapazitäten für gleichzeitig durchfahrende Züge abzugrenzen sind. Zudem ist die Berücksichtigung ein- bzw. ausfahrender Züge erforderlich. Die Interpretation der Durchfahrtskapazitäten ist dahingehend auf gleichzeitig ein-, durch- sowie ausfahrende Züge abzustimmen. Außerdem sind richtungsbezogene Kapazitätsangaben für die hier untersuchten unsymmetrischen Bahnhöfe unerlässlich.

**Fazit:** Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass das Bahnhofslayout und die Fahrstraßenausschlüsse eines Bahnhofs einen deutlichen Einfluss auf die Kapazitätsangaben haben. Insbesondere bei unsymmetrischen Bahnhöfen kann eine Unterteilung in Bahnhofsteile zur Abbildung der jeweiligen Besonderheiten erforderlich sein. Außerdem ist die Verwendung richtungsbezogener Kapazitätsangaben zumindest für unsymmetrische Bahnhöfe unerlässlich. Dabei sind Kapazitätsangaben für haltende Züge sowie ein-, durch- und ausfahrende Züge zu unterscheiden.

#### 4.2.3.2 Topographie

In den in diesem Abschnitt verwendeten Diagrammen werden auf der Abszissenachse die verschiedenen untersuchten ICE-Baureihen bzw. – bei Betrachtung der Zugfolgezeiten – die Kombinationen der an den Zugfolgefällen beteiligten Baureihen in aufsteigender Reihenfolge der ermittelten Unterschiede abgetragen.

##### Abzweiggeschwindigkeiten in Haltegleisen

Die sich durch unterschiedliche Weichenabzweiggeschwindigkeiten im Bahnhof ergebenden Fahrzeitunterschiede liegen mit ca. 3 % bis 6,5 % im Bereich der üblichen Fahrzeitzuschläge. Sie können dabei von ca. 20 s bis zu 40 s betragen. Die für diese Untersuchung vorgenommene Verringerung der Abzweiggeschwindigkeiten (von Bahnhofsgeschwindigkeitsprofil „B1“ zu Profil „B4“) führt dabei erwartungsgemäß zu einer Verlängerung der Fahrzeiten. Dabei treten für durchfahrende Züge etwas größere Fahrzeitverlängerungen als für haltende Züge auf.

Diese Unterschiede sind dabei auch vom konkreten Zugtyp abhängig. Bei Zügen mit besserem Beschleunigungs- und Bremsvermögen (wie z.B. SPNV-Zügen) wirken sich die durch die Weichenabzweiggeschwindigkeiten vorgegebenen Höchstgeschwindigkeitseinschränkungen mit Fahrzeitunterschieden von ca. 15 s bis zu 25 s nicht so stark aus, da nach dem Ende einer Geschwindigkeitsbeschränkung die neue Zielgeschwindigkeit schneller erreicht werden kann, als bei schlechter beschleunigenden Zügen. Zusätzlich spielen bei RE auch die im Gegensatz zu ICE deutlich kürzeren Zuglängen beim Beschleunigen nach dem Ende einer Höchstgeschwindigkeitseinschränkung eine Rolle. Die Unterschiede zwischen verschiedenen abzweigenden Gleisen mit unterschiedlichen Weichenabzweiggeschwindigkeiten fallen mit ca. 2,5 % Fahrzeitverlängerung auch bei den RE relativ gering aus.

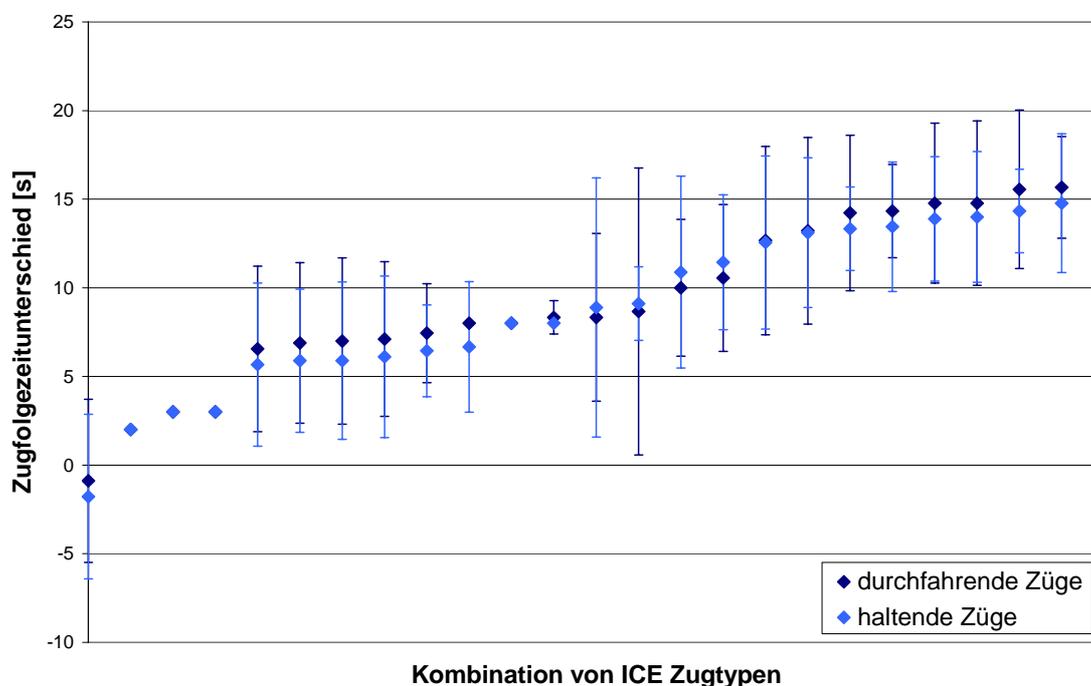


Abbildung 40: Zugfolgezeitunterschiede für ICE bei unterschiedlichen Weichenabzweiggeschwindigkeiten im Bahnhof

Beim Vergleich der Zugfolgezeiten bei unterschiedlichen Weichenabzweiggeschwindigkeiten im Bahnhofsbereich (Profil „B1“ mit Profil „B4“) ergeben sich beim Profil „B4“ geringfügig höhere Zugfolgezeiten, die aber deutlich kleiner als die üblichen Pufferzeiten sind (siehe Abbildung 40). Dabei ergibt sich für haltende und durchfahrende Züge ein ähnliches Bild.

**Fazit:** Die sich durch unterschiedliche Weichenabzweiggeschwindigkeiten im Bahnhof ergebenden Fahrzeitunterschiede liegen im Bereich der üblichen Fahrzeitzuschläge. Es ergeben sich auch geringe Abweichungen der Zugfolgezeiten, die aber deutlich kleiner als die üblichen Pufferzeiten sind. Bei Zügen mit besserem Beschleunigungs- und Bremsvermögen (wie z.B. SPNV-Zügen) sind die Auswirkungen auf Fahr- und Zugfolgezeitunterschiede geringer als bei anderen Zügen.

### Gleispositionen im Bahnhof

Zwischen verschiedenen Laufwegen bzw. Zielgleisen im Bahnhof weichen die Fahrzeiten der einzelnen Züge z.T. deutlich voneinander ab. Die Abweichungen aufgrund der unterschiedlichen Laufwege bleiben im Untersuchungsbahnhof aber auch bei Betrachtung der erweiterten Infrastruktur „A – B – Z“ üblicherweise unter zwei Minuten (siehe Abbildung 41 und Abbildung 42).

Insbesondere zwischen durchgehenden Hauptgleisen und abzweigenden Gleisen sind bei Durchfahrt Fahrzeitunterschiede von mehr als einer Minute (> 5 %) bis zu zwei Minuten (ca. 7,5 %) für Fahrzeiten auf der erweiterten Infrastruktur „A – B – Z“ zu erkennen (siehe Abbildung 41). Bei haltenden Zügen nivellieren sich die Unterschiede (ca. 1 min / 5 %). Die Unterschiede zwischen den abzweigenden Gleisen (Gleise 1 – 4) untereinander sind dabei deutlich geringer und liegen bei max. 5 % (siehe Abbildung 42).

**Fazit:** Typische Fahrwege für bestimmte Zugtypen sollten daher – wenn bekannt bzw. erkennbar – bei der Berechnung der Fahr- und Zugfolgezeitparameter berücksichtigt werden.

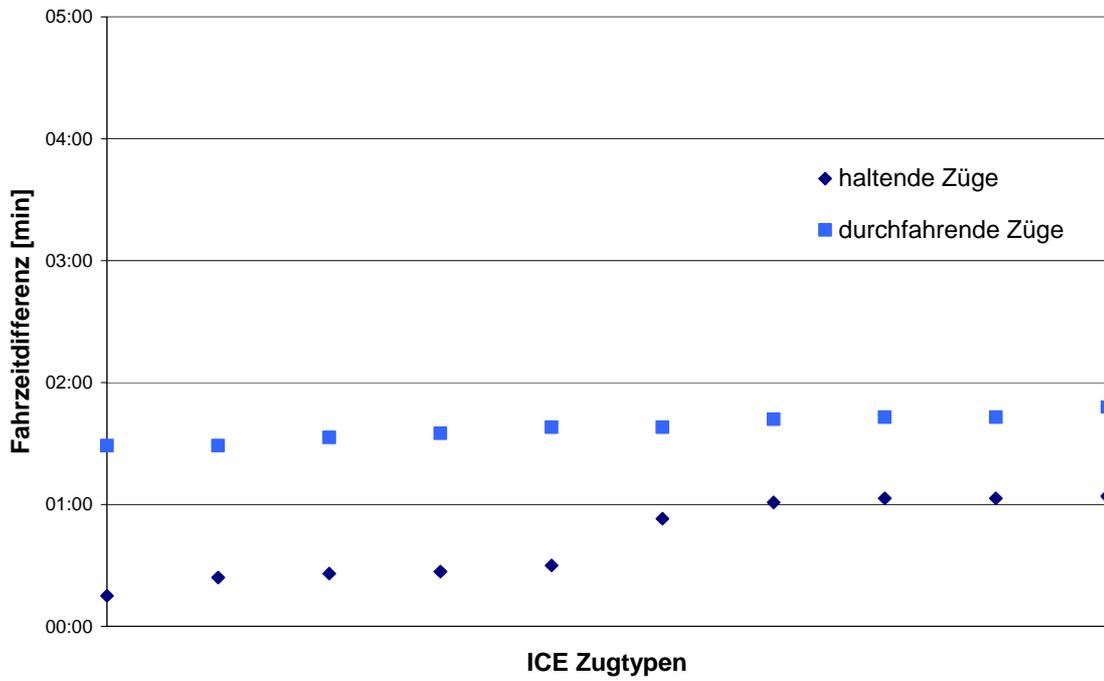


Abbildung 41: Absolute Fahrzeitunterschiede einzelner ICE zwischen verschiedenen Gleisen (nur Geschwindigkeitsband S3Bx) auf der erweiterten Infrastruktur „A – B – Z“

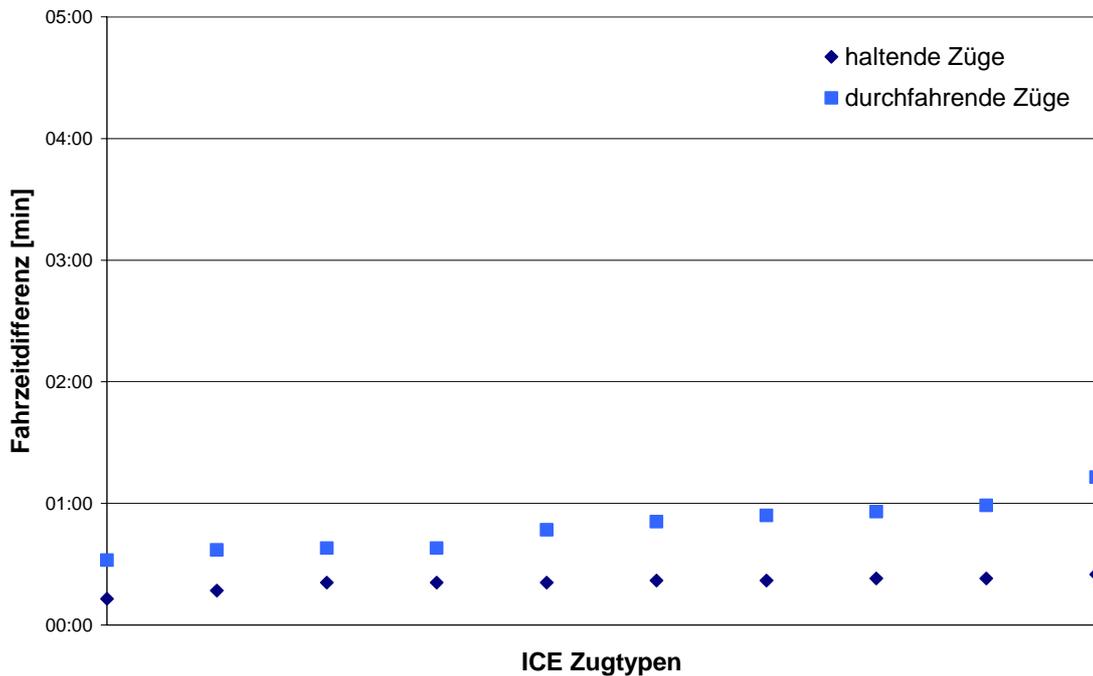


Abbildung 42: Absolute Fahrzeitunterschiede einzelner ICE zwischen den abzweigenden Gleisen 1-4 (nur Geschwindigkeitsband S3Bx) auf der erweiterten Infrastruktur „A – B – Z“

#### 4.2.4 Zeitdiskretisierung

Die Verwendung unterschiedlicher Zeiteinheiten hat erwartungsgemäß einen deutlichen Einfluss auf die erzielbare Genauigkeit der Ergebnisse. Dies trifft in gleicher Weise auf Fahr- und Zugfolgezeiten zu. Die Abweichungen ergeben sich durch die Rundung der Fahr- und Zugfolgezeiten auf ganze Zeiteinheiten, die für Anwendung der mathematischen Optimierung erforderlich sind. Je nach der Höhe des jeweils ermittelten Wertes im Verhältnis zur verwendeten Zeiteinheit ist diese Rundungsdifferenz unterschiedlich groß und kann bis an die Größe der Zeiteinheit heranreichen. Um die Fahrbarkeit der so ermittelten Fahrpläne gewährleisten zu können, werden die Werte immer auf ganze Zeiteinheiten aufgerundet. Dies führt dadurch zu Verlängerungen der Fahr- und Zugfolgezeiten.

In den hier verwendeten Diagrammen werden auf der Abszissenachse die verschiedenen untersuchten ICE-Baureihen (Abbildung 43) bzw. – bei Betrachtung der Zugfolgezeiten (Abbildung 44) – die Kombinationen der an den Zugfolgefällen beteiligten Baureihen in aufsteigender Reihenfolge der ermittelten Unterschiede abgetragen.

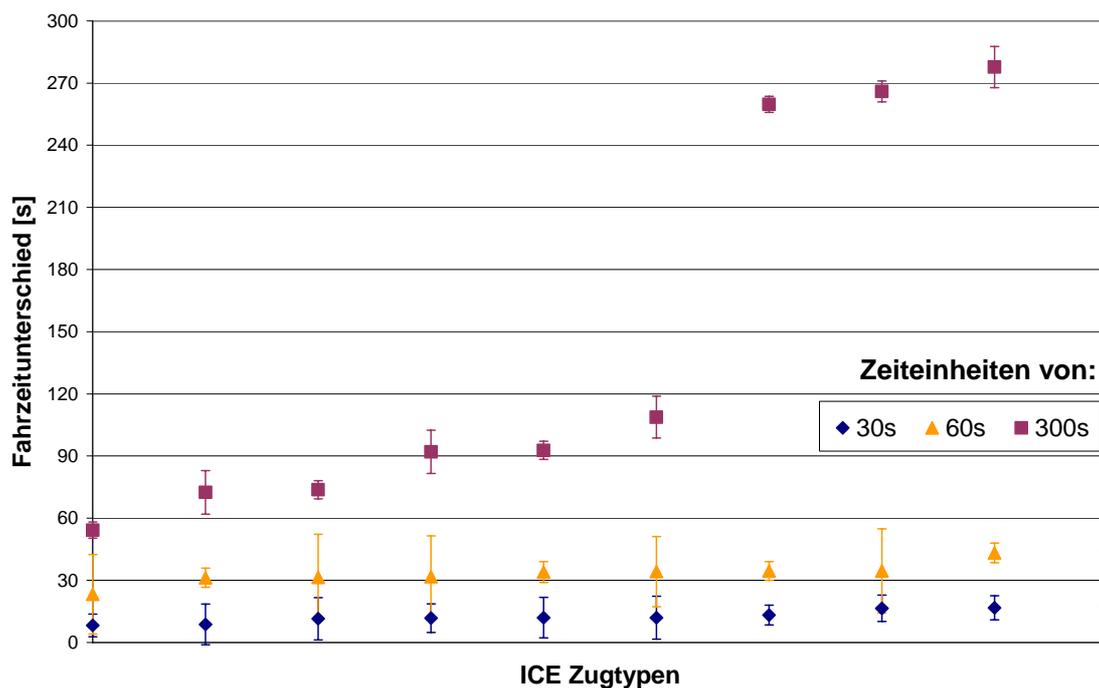


Abbildung 43: Fahrzeitunterschiede bei Verwendung unterschiedlicher Zeiteinheiten

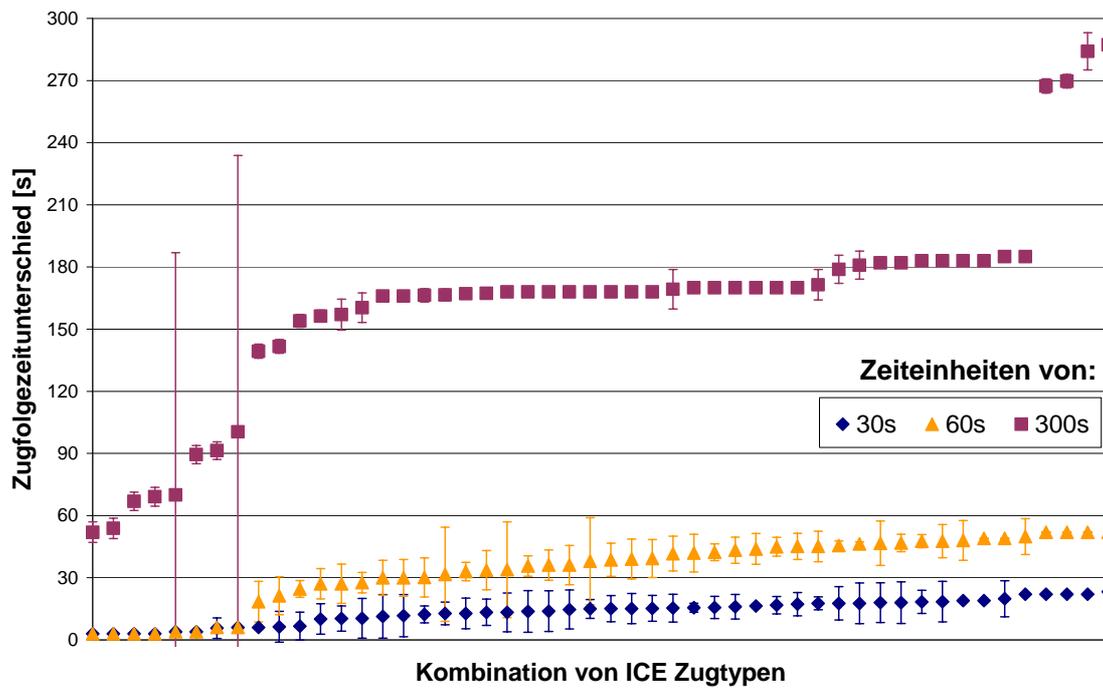


Abbildung 44: Zugfolgezeitunterschiede bei Verwendung unterschiedlicher Zeiteinheiten

Die relative durchschnittliche Fahrzeitverlängerung bei Verwendung von Zeiteinheiten von 60 Sekunden bewegt sich mit ca. 3 % bis 7 % für den betrachteten Streckenabschnitt von 30 km Länge in der Größenordnung der üblichen Fahrzeitreserven. Bei der Verwendung von kürzeren Streckenabschnitten mit ihren kürzeren Fahrzeiten würde die durch die Zeitdiskretisierung verursachte Abweichung dieses Maß schon deutlich übersteigen. Diese Tendenz verstärkt sich bei Betrachtung der Auswirkungen auf eine komplette Zugfahrt deutlich, wenn die Infrastruktur, wie bei der Abbildungsvariante mit teilweise gleisgenauer Abbildung (siehe Kapitel 2.2.2.1), in viele kürzere Streckenabschnitte unterteilt wird.

Dies zeigt sich auch deutlich bei der Betrachtung der Zugfolgezeiten (siehe Abbildung 44). Durch deren vergleichsweise geringe Höhe ergeben sich bei den großen Zeiteinheiten von 5 Minuten Abweichungen, die deutlich größer (teilweise über 150 %) als die Zugfolgezeiten selbst sind. Eine realistische Modellierung des Bahnbetriebes für die Fahrplanung muss daher auf Zeiteinheiten von maximal 60 Sekunden bestehen.

## 4.3 Bewertung der Untersuchungsergebnisse

### 4.3.1 Erforderliche Genauigkeit der Eingangsdaten

#### 4.3.1.1 Infrastrukturdaten

##### Topographie

Die **Höchstgeschwindigkeit** auf der Strecke hat einen deutlichen Einfluss auf die Genauigkeit der Fahr- und Zugfolgezeiten. Daher ist die genaue Kenntnis der zulässigen Geschwindigkeiten im Streckenabschnitt wichtig. Berücksichtigt werden sollten dabei auch mögliche Anwendungsvorschriften bzw. Gepflogenheiten verschiedener Bahngesellschaften, nach denen sehr kurze Abschnitte mit höherer zulässiger Geschwindigkeit nicht beachtet werden (vgl. [Radtke 2005]).

Unter Inkaufnahme von Genauigkeitseinbußen kann auf die exakte Kenntnis des für den jeweiligen Streckenabschnitt gültigen Verzeichnisses der zulässigen Geschwindigkeiten (VzG) verzichtet werden, wenn zumindest die grundsätzliche Streckenhöchstgeschwindigkeit sowie deutliche Geschwindigkeitseinbrüche außerhalb des Einflussbereichs von Halten bekannt sind.

**Steigungen** und Gefälle haben einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Fahr- und Zugfolgezeiten. Dabei sind Gefälleabschnitte durch die sich ergebenden Fahrzeitverkürzungen weniger kritisch. Allerdings stellen sie für die jeweilige Gegenrichtung Steigungen dar, so dass sie dort eine Rolle spielen.

Hohe Steigungen über einen längeren Streckenabschnitt hinweg führen aber gerade bei Zügen mit nur geringem Zugkraftüberschuss bei den zulässigen Streckengeschwindigkeiten zu sehr großen Fahrzeitverlängerungen. Bei längeren Steigungsabschnitten sollten die Steigungen deshalb zumindest überschlägig berücksichtigt werden.

Die im Flachland vorhandenen geringeren Streckenneigungen mit üblicherweise wechselnden Steigungs- und Gefälleabschnitten lassen sich durch Fahrzeitreserven ausgleichen und müssen nicht gesondert berücksichtigt werden. In bergigeren Gegenden ist dies durch die geringere Wahrscheinlichkeit für eine ausgleichende Abwechslung von Steigungs- und Gefälleabschnitten innerhalb eines Streckenabschnittes nicht möglich. Dort müssen die auftretenden Steigungen abgeschätzt werden und in die Fahrzeitberechnung einfließen. Eine überschlägige Abschätzung der auftretenden Steigungen kann dabei durch eine Auswertung topographischer

Karten und der daraus möglichen Erstellung eines Höhenprofils erfolgen

Der **Krümmungswiderstand** hat nur einen sehr geringen Einfluss auf die Fahrzeiten [Voß1998] – insbesondere da stärkere Krümmungen nur mit verhältnismäßig geringer Geschwindigkeit durchfahren werden, wo Triebfahrzeuge üblicherweise über ausreichend Leistungsreserven zur Kompensation der höheren Fahrwiderstände verfügen. Aus diesen Gründen ist die Kenntnis der genauen Krümmungen für die Ermittlung der Fahrzeiten nicht relevant. Beim Vorhandensein sehr enger Radien mit großen Krümmungen im Streckenverlauf muss aber sichergestellt werden, dass alle für den jeweiligen Streckenabschnitt vorgesehenen Fahrzeuge für diese Radien zugelassen sind. Derart enge Radien lassen sich allerdings nur in sehr seltenen Fällen auf Strecken finden, so dass die Wahrscheinlichkeit dafür nur als sehr gering einzustufen ist.

### Sicherungstechnik

Die sicherungstechnische Ausstattung der Infrastruktur bestimmt hauptsächlich die notwendigen Zugfolgezeiten zwischen den Zügen zur Durchführung eines reibungslosen Betriebsablaufes. Daneben übt sie allerdings auch einen Einfluss auf die erzielbaren Fahrzeiten durch etwaige Höchstgeschwindigkeitsbeschränkungen aus. Die Art der verfügbaren Leit- und Sicherungstechnik muss daher für jeden Streckenabschnitt bekannt sein.

Die Positionen der Signale und die Länge der Blockabschnitte bestimmen die Höhe der Zugfolgezeiten in einem Streckenabschnitt. Daher müssen sie zur Erzielung genauer Ergebnisse bekannt sein.

Unter Inkaufnahme von Genauigkeitseinbußen, die aber durch die Berücksichtigung von zusätzlichen Pufferzeiten in der Modellierung mit planerischen Zugfolgezeiten wieder ausgeglichen werden können, ist auch die Verwendung von geschätzten Signalstandorten der Ein- und Ausfahrtsignale sowie Deckungssignale in Verbindung mit der Anwendung durchschnittlicher Blocklängen denkbar. Im Zweifelsfall ist die Berücksichtigung größerer Werte zu empfehlen, da durch die Verwendung durchschnittlicher Blocklängen zwischen den Bahnhöfen die Mindestzugfolgezeiten tendenziell unterschätzt werden.

### Bahnhöfe

Die Erreichbarkeiten von Gleisen, die Lage der Fahrstrassen und vorhandene **Fahrstraßenausschlüsse** spielen eine entscheidende Rolle für Bestimmung der Bahnhofskapazitäten. Daher müssen alle zur Ermittlung der Bahnhofskapazitäten erforderlichen Daten (schematische Gleispläne mit

Längenangaben bzw. Kilometrierung, Angaben zur Stellwerkslogik, etc.) zur Verfügung stehen.

Zur Verringerung des Erhebungsaufwandes empfiehlt sich ein mehrstufiger Prozess zur Eichung der verwendeten Kapazitäten. In erster Näherung und als Obergrenze für die Bahnhofskapazitäten kann die Zahl der für die verschiedenen Zugtypen (anhand der Nutzlängen der Gleise, Bahnsteighöhen, etc.) verwendbaren Gleise unter der Annahme vollständiger Erreichbarkeit unterstellt werden.

Wird während des Eichungsprozesses festgestellt, dass für einzelne Bahnhöfe die angenommenen Kapazitäten zu groß sind, ist die Berücksichtigung offensichtlicher Erreichbarkeitsausschlüsse in den betroffenen Knoten erforderlich. Dabei kann näherungsweise auf Standardlayouts für Knoten (siehe beispielsweise [Bendfeldt 2004b]) zurückgegriffen werden. Für komplexere Bahnhöfe sind Knotenuntersuchungen und ggf. eine Unterteilung zur Modellierung von Erreichbarkeitsausschlüssen erforderlich.

Im Zielzustand erfolgt letztendlich eine detaillierte Abschätzung der gleichzeitig nutzbaren Gleise durch Knotenuntersuchungen zur Festlegung der Knotenkapazitäten spezifisch für jeden Zugtyp. Erreichbarkeitsausschlüsse werden durch individuelle Modellierung und eine weitere Unterteilung des Bahnhofs in Bahnhofsteile abgebildet.

Die Position von Weichen und die genaue Kenntnis der **Weichenabzweiggeschwindigkeiten** im Bahnhofsbereich haben einen Einfluss auf die zu ermittelnden Fahr- und Zugfolgezeiten. Deren Abweichungen sind aber üblicherweise so klein, dass sie sich durch die Reserve- bzw. Pufferzeiten ausgleichen lassen. Für den seltenen Fall des Auftretens von Weichenabzweiggeschwindigkeiten unter 40 km/h müssen dabei allerdings zusätzliche Reservezeiten von mindestens 30 s berücksichtigt werden.

Zwischen verschiedenen Laufwegen zu unterschiedlichen **Gleispositionen** bzw. Zielgleisen im Bahnhof weichen die Fahrzeiten der einzelnen Züge z.T. deutlich voneinander ab. Typische Fahrwege für bestimmte Zugtypen sollten daher bei der Berechnung der Fahr- und Zugfolgezeitparameter berücksichtigt werden. In Einzelfällen, wenn keine typischen Fahrwege für die Züge einzelner Zugtypen erkennbar sind, kann zur Berücksichtigung der abweichenden Positionen von Zielgleisen alternativ auch die Aufteilung eines betroffenen Bahnhofs in Bahnhofsteile vorgenommen werden.

### 4.3.1.2 Fahrzeugdaten

Wie die Untersuchungen zeigten, haben die fahrdynamischen Fahrzeugparameter sehr große Auswirkungen auf die Berechnung von Fahr- und Zugfolgezeiten. Nach [Voß 1998] sind insbesondere die genaue Kenntnis von:

- zulässiger Fahrzeughöchstgeschwindigkeit,
- Zugkraft-Geschwindigkeits-Diagramm,
- Bremskraft-Geschwindigkeits-Diagramm sowie
- der Massenkennwerte (Leermasse, Zuladung, Rotationsfaktor, etc.)

für die Ermittlung genauer Fahrzeiten von großer Bedeutung. Üblicherweise können die notwendigen Fahrzeugdaten aber nach Angabe der Zugkonfiguration (Typ / Bezeichnung von Triebfahrzeugen und Wagenmaterial) aus vorhandenen Fahrzeugkatalogen, Typenblättern o.ä. in ausreichender Genauigkeit ermittelt werden.

Auch die Umweltbedingungen, wie z.B. der Kraftschlussbeiwert oder die Windstärke und -richtung, haben einen nicht unerheblichen Einfluss auf den Fahrtverlauf. Die Auswirkungen dieser Umweltbedingungen werden deshalb in den Fahrzeugparametern weitestgehend berücksichtigt, so dass die praktisch erzielbaren Fahrzeiten – außer unter extremen Bedingungen – den im Rahmen der Fahrplanung ermittelten Fahrzeiten entsprechen. Ähnlich wird auch bei der Einschätzung der anzusetzenden Zuladung im Rahmen der Fahrplanung vorgegangen.

Im praktischen Betrieb hat zudem das individuelle Verhalten der Triebfahrzeugführer einen starken Einfluss auf die gefahrenen Fahrzeiten. Im Rahmen der Fahrplanung wird ein Standardverhalten vorausgesetzt, das von allen ausreichend trainierten Triebfahrzeugführern eingehalten werden kann, so dass individuelle Besonderheiten vernachlässigbar sind.

### 4.3.2 Erzielbare Genauigkeit

Unter der Voraussetzung ausreichend genauer Eingangsdaten (siehe Kapitel 4.3.1) hängt die erzielbare Genauigkeit der Infrastruktur- und Bahnbetriebsabbildung unter Verwendung der Modellierung mit planerischen Zugfolgezeiten im Wesentlichen von der Diskretisierung von:

- Infrastruktur,
- Zugtypen sowie
- Zeit

ab. Durch die gute Skalierbarkeit lassen sich unter Inkaufnahme eines hohen Datenaufwandes Ergebnisse mit einer Genauigkeit erzielen, die mit der von mikroskopischen Modellen vergleichbar ist.

#### **4.3.2.1 Infrastruktur**

Die Anzahl und Länge der Kanten, in die ein Streckenabschnitt eingeteilt wird, haben einen deutlichen Einfluss auf die erzielbare Genauigkeit. Nachteilig an der Verwendung vieler kurzer Kanten ist die Addition der Rundungsfehler für die Rundung der Fahrzeiten auf ganze Zeiteinheiten, die bei Anwendungsfällen mit mathematischer Optimierung (siehe Kapitel 3) erforderlich sind, da dabei die Zeiten grundsätzlich aufgerundet werden. Insbesondere in Abzweigstellen kann sich dies bei Verwendung der teilweise gleisgenauen Modellierung (siehe Kapitel 2.2.2.1) deutlich bemerkbar machen.

Dadurch kann beispielsweise bei Verwendung von Zeiteinheiten von einer Minute bei einem Zuglauf über eine Abzweigstelle, die im günstigsten Fall statt durch einen langen Streckenabschnitt durch drei kürzere Streckenabschnitte abgebildet werden kann, der mittlere Rundungsfehler von 30 Sekunden auf drei mal 30 Sekunden ansteigen. In der Summe für eine Zugfahrt sind die Rundungsfehler aber üblicherweise größer, als im obigen Beispiel dargestellt, da:

- bei den sehr kurzen Streckenabschnitten im Abzweigungsbereich der mittlere Rundungsfehler größer als 30 Sekunden (beispielsweise benötigt ein ICE für einen Abschnitt von 100 m bei 250 km/h nur 1,44 s und selbst ein Güterzug bei 100 km/h nur 3,6 s) sein wird (siehe auch Kapitel 4.2.4),
- sich in der Praxis Abzweigstellen teilweise komplizierter darstellen und mehr als drei Kanten erfordern sowie
- während einer Zugfahrt zwischen zwei Haltebahnhöfen mehr als ein Abzweig vorkommen kann und deshalb üblicherweise mehr als die angenommenen drei Streckenabschnitte innerhalb des Fahrtverlaufes eines Zuges berücksichtigt werden müssen.

Aus diesen Gründen ist die Nutzung von Zeiteinheiten, die deutlich kleiner als

eine Minute sind, wie z.B. die in der Fahrplanung üblichen Angaben in Zehntelminuten (also 6 Sekunden) erforderlich, um die Rundungsfehler auf ein vertretbares Maß zu reduzieren. Allerdings können die Auswirkungen der Rundungsfehler auch durch eine geschickte Aufteilung der einzelnen Fahrzeiteile vor der Rundung verringert werden – z.B. durch die Abrundung der Fahrzeit für einzelne Kanten einer Teilstrecke auf die nächstkleinere ganze Zeiteinheit und Beaufschlagung der Fahrzeiten einer anderen Kante mit dem Unterschiedsbetrag. Dabei muss darauf geachtet werden, dass Fahrzeiten der Kanten, die in unterschiedlichen Fahrtverläufen enthalten sind, jeweils auf dieselbe Weise angepasst werden.

Wie die Untersuchungen zu den Auswirkungen der Fahrstraßenausschlüsse (siehe Kapitel 4.2.3) zeigen, ist die Angabe von Haltekapazitäten zur Abbildung der Einschränkungen von Fahrstraßenausschlüssen nur bei Bahnhöfen ohne Knotenfunktion (d.h. ohne Abzweigungen von Strecken im Bahnhof) bzw. bei Knotenbahnhöfen mit einer flexiblen Betriebsabwicklung durch sehr viele vorhandene Gleisverbindungen, wie z.B. im Bahnhof Celle (siehe Abbildung 39 links), ausreichend. Für Knotenbahnhöfe ist die Berücksichtigung von planerischen Zugfolgezeiten zwischen den verschiedenen von diesem Knoten ausgehenden Kanten ratsam. Dazu sind ggf. Zugfolgezeiten zwischen Zügen, die den Bahnhof auf verschiedenen Strecken erreichen bzw. verlassen, erforderlich. Dies kann durch eine weitere Unterteilung des Bahnhofs in Bahnhofsteile ermöglicht werden.

#### **4.3.2.2 Zugtypen**

Die für eine rationelle Datenhaltung erforderliche Zuordnung der Züge zu Zugtypen hat einen erheblichen Einfluss auf die Genauigkeit der ermittelten Fahr- und Zugfolgezeiten, die wiederum wesentlich die Fahrbarkeit der damit ermittelten Fahrpläne und die verfügbaren Kapazitäten beeinflussen. Je homogener die Züge eines Zugtyps sind, desto geringer sind die Fahrzeit- und Zugfolgezeitunterschiede der Züge innerhalb eines Zugtypen. Diese Unterschiede müssen für die Festlegung der Größe von Fahrzeitreserven und Pufferzeiten für planerische Zugfolgezeiten berücksichtigt werden (siehe Kapitel 4.2.1.1).

Für die Fahrplanung sind Vorgaben zur Fahrweise möglich, wodurch sich die Unterschiede zwischen den Fahr- und Zugfolgezeiten zwischen den verschiedenen Zügen nivellieren. Die schnelleren Züge passen sich den langsameren Zügen an und haben dadurch höhere Reservezeiten, die zum Aufholen von Verspätungen oder auch zum Energiesparen genutzt werden

können. Allerdings werden dadurch die Möglichkeiten zur Erzielung kürzerer Fahrzeiten durch schnellere Fahrzeuge nicht ausgeschöpft. Wenn die kürzere Fahrzeit für einzelne Züge ein wichtiges Kriterium der Trassenwahl ist, dann sollten diese Züge jeweils einen eigenständigen Zugtyp bilden. Diese separate Einteilung sollte aber bei streckenabschnittsabhängiger Einteilung der Zugtypen nur für die Streckenabschnitte erfolgen, in denen relevante Unterschiede auftreten.

Für Betriebsuntersuchungen ist die Verwendung dieser Vorgaben zu Fahrweisen nicht möglich. Deshalb ist dabei nur die Zusammenfassung sehr ähnlicher Züge realisierbar. Bei Anwendungsfällen ohne mathematische Optimierung liegt aber keine Beschränkung der Zugtypen-Anzahl vor. Dort können demzufolge die unterschiedlichen Züge auch individuell betrachtet werden.

#### **4.3.2.3 Zeit**

Die durch die mathematische Optimierung bedingte Verwendung ganzzahliger Zeiteinheiten und deren jeweilige Größe hat erwartungsgemäß einen deutlichen Einfluss auf die erzielbare Genauigkeit der Ergebnisse. Dies trifft in gleicher Weise auf Fahr- und Zugfolgezeiten zu. Die Abweichungen ergeben sich durch die Rundung der Fahr- und Zugfolgezeiten auf ganze Zeiteinheiten. Je nach der Höhe des jeweils ermittelten Wertes im Verhältnis zur verwendeten Zeiteinheit ist diese Rundungsdifferenz unterschiedlich groß und kann bis an die Größe der Zeiteinheit heranreichen. Da die Werte immer auf ganze Zeiteinheiten aufgerundet werden, führt dies zu Verlängerungen der Fahr- und Zugfolgezeiten.

Bei der Verwendung von kürzeren Kanten mit ihren kürzeren Fahrzeiten würde die durch die Zeitdiskretisierung verursachte Abweichung den Durchschnittswert von einer halben Zeiteinheit schon deutlich übersteigen. Bei Betrachtung der Auswirkungen auf eine komplette Zugfahrt ist zu erkennen dass sich die Rundungsfehler aufsummieren und damit diese Tendenz deutlich verstärken. Daher ist zur akzeptablen Abbildung des Eisenbahnbetriebs für die Fahrplanerstellung mittels der Modellierung mit planerischen Zugfolgezeiten im Zusammenhang mit der mathematischen Optimierung die Verwendung von Zeiteinheiten von einer Minute oder weniger zu fordern.

Alle drei Aspekte der Diskretisierung sollten dabei möglichst gut miteinander in Einklang gebracht werden, um einerseits unnötigen Mehraufwand bei der Bestimmung der Parameter und andererseits inakzeptable Ungenauigkeiten zu

vermeiden. Beispielsweise nutzt eine zeitliche Diskretisierung mit Zeiteinheiten von einer Sekunde nichts, wenn man die Züge in nur wenige, sehr abstrakte Zugtypen einteilt. Durch die Vielzahl unterschiedlicher Züge, die ein Zugtyp dann repräsentiert, entstehen Ungenauigkeiten, die deutlich größer als die verwendete Zeiteinheit von einer Sekunde sind.

Die Größe der verwendeten Zeiteinheit hat aber neben ihren Auswirkungen auf die erreichbare Genauigkeit der Ergebnisse bei Anwendungsfällen mit mathematischer Optimierung (siehe Kapitel 3) auch einen sehr großen Einfluss auf die Problemgröße des mathematischen Optimierungsproblems. Je größer die Zeiteinheit gewählt wird, desto kleiner wird der Rechenaufwand für das mathematische Optimierungsproblem, da weniger zeitliche Variationen möglich sind. Andererseits vergrößern sich bei der Verwendung größerer Zeiteinheiten auch die Rundungsfehler, was sich negativ auf die erreichbare Genauigkeit auswirkt. Diese Zusammenhänge müssen für jede Problemstellung individuell gegeneinander abgewogen und mit den anderen Diskretisierungsaspekten abgestimmt werden.

#### 4.3.3 Bewertung und Vergleich

Die Genauigkeit der Ergebnisse hängt von der verwendeten zeitlichen, räumlichen und Zugtyp-Diskretisierung ab. Die Modellierung mit planerischen Zugfolgezeiten bietet eine sehr gute Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche Modellgrößen durch Variation der Diskretisierung. Dies hat aber deutliche Auswirkungen auf die erzielbare Genauigkeit der Ergebnisse. Für eine sehr feine Diskretisierung ist ein sehr hoher Datenaufwand erforderlich, da alle theoretisch auftretenden Konfliktfälle bei der Bestimmung der Modellparameter berücksichtigt werden müssen.

Erst ab einer größeren Aggregationsstufe ergeben sich gegenüber mikroskopischen Verfahren Vorteile im Datenaufwand, die aber mit Genauigkeitseinbußen erkaufte werden müssen. Beispielsweise können mitunter nicht alle Besonderheiten einzelner Züge bei einer stärkeren Zusammenfassung in Zugtypen immer berücksichtigt werden. Auch ist es z.B. nicht möglich, den Zügen in den Bahnhöfen einzelne Fahrstraßen zuzuordnen, wenn Bahnhöfe durch einen einzelnen oder einige wenige Knoten modelliert werden. Auch die zeitliche Auflösung kann bei einer größeren Diskretisierung geringer sein, als sie von mikroskopischen Verfahren üblicherweise verwendet werden.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass für die Modellierung mit planerischen Zugfolgezeiten exakte Eingangsdaten notwendig sind für:

- fahrdynamische Daten der betrachteten Züge
- Steigungen
- Positions- bzw. Längenangaben
- Erreichbarkeitsausschlüsse in Bahnhöfen
- zulässige Geschwindigkeiten
- Art der Leit- und Sicherungstechnik

Abweichungen an der Genauigkeit der Eingangsdaten können akzeptiert werden bei:

- Signalstandorten
- Angaben zu Gefälleabschnitten bzw. den Streckenneigungen im Flachland
- Weichenabzweiggeschwindigkeiten
- Gleislage / -position

Die dabei entstehenden Abweichungen können durch Puffer- und Reservezeiten ausgeglichen werden.

Nur geringe Auswirkungen auf die erzielbare Genauigkeit der Ergebnisse haben dagegen Angaben zu Radien.

Tabelle 6 stellt eine Übersicht über die verschiedenen Zeithorizonte und Planungsphasen sowie die jeweils geeigneten Untersuchungsverfahren dar. Dabei wurden die in Kapitel 3 vorgestellten Anwendungsmöglichkeiten der Modellierung mit planerischen Zugfolgezeiten berücksichtigt.

Im Trassenmanagement bietet die Modellierung mit planerischen Zugfolgezeiten im Verbund mit der mathematischen Optimierung Vorteile durch die simultane Trassenoptimierung. Für die Bestimmung der Modellparameter ist aber ein hoher Datenaufwand für die notwendigen Eingangsdaten erforderlich, der vergleichbar mit dem mikroskopischer Verfahren ist. Trotzdem sind aufgrund der durch die mathematische Optimierung bedingten Beschränkungen, wie z.B. die Zusammenfassung unterschiedlicher Züge zu

Zugtypen, die Verwendung ganzzahliger Zeiteinheiten sowie die wegen der Zahl der mit der mathematischen Optimierung verarbeitbaren Parameter nötigen Abwägungen zwischen Untersuchungsraumgröße und Modellierungstiefe, Genauigkeitseinschränkungen der Ergebnisse hinzunehmen. Ob die simultane makroskopische Trassenoptimierung mit ihren Genauigkeitseinbußen allerdings bessere Ergebnisse erzielen kann, als sequentielle mikroskopische Trassenoptimierungsverfahren, ist noch nicht nachgewiesen.

Für die weiteren Planungsphasen kann die Modellierung mit planerischen Zugfolgezeiten ihre Vorteile in der guten Anpassungsfähigkeit an unterschiedlich große Untersuchungsräume und im gegenüber mikroskopischen Verfahren geringeren Datenaufwand ausspielen. Allerdings ist der zu treibende Datenaufwand hier aber noch größer als der für andere makroskopische Verfahren, wie z.B. das makroskopische Netzevaluationsmodell NEMO (siehe [Sewcyk 2004]), erforderliche Datenaufwand.

Tabelle 6: Auswahl geeigneter Verfahren für Fahrplan-, Betriebsprogramm- und Infrastrukturuntersuchungen

Zeit-horizont	Planungs-phase	Genauigkeit der Fahrplandaten	Genauigkeit der Infrastrukturdaten	Untersuchungsverfahren
< 1 Jahr	unterjährige Fahrplanung	konkreter Jahresfahrplan	konkrete Infrastruktur incl. Baumaßnahmen	Trassenmanagementsystem mit automatischer Trassen-suche (z.B. Fahrplan-managementserver mit Trassenbörse [Mitusch 2007] sowie Kapitel 3.1)
1 – 2 Jahre	Jahres-fahrplanung	konkretes Betriebs-programm	konkrete Infrastruktur incl. Baumaßnahmen	Trassenmanagementsystem (z.B. RUT [Brünger 2000], FBS [iRFP 2008], Trassenbörse [Mitusch 2007] u. Kapitel 3.1)
3 – 5 Jahre	mittelfristige Betriebs-programm-planung	Verkehrsprognosen und Betriebs-programmvarianten	konkrete Infrastruktur	Simulation mit unscharfen Eingangsdaten (meso-skopische Simulations-verfahren mit RailSys [Radtke 2005] sowie Verfahren nach Kapitel 3.2)  Fahrplanstudien
5 – 10 Jahre	langfristige Betriebs-programm-planung	Verkehrprognosen	Infrastrukturvarianten	Variantenuntersuchung mit vereinfachten Verfahren (z.B. Makro-Simulation NEMO [Radtke 2005] sowie Verfahren nach Kapitel 3.2 und 3.3)  analytische Verfahren
> 10 Jahre	Infrastruktur-planung	Verkehrsprognosen	Infrastrukturvarianten	Variantenuntersuchung mit vereinfachten Verfahren (z.B. Makro-Simulation NEMO [Radtke 2005] sowie Verfahren nach Kapitel 3.2 und 3.3)  analytische Verfahren

## 5 Fazit

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte und im Forschungsprojekt „Trassenbörse“ verwendete Modellierung mit planerischen Zugfolgezeiten für die Abbildung der bahnbetrieblichen Einflüsse für eine Vermarktung von Fahrplantrassen grundsätzlich geeignet ist. Im Ergebnis des Projektes „Trassenbörse“ steht damit ein Instrumentarium für die marktorientierte Beurteilung von Zugangsbedingungen im Schienenverkehr zur Verfügung. Es wurden dafür Methoden der Betriebsabbildung im Schienenverkehr entwickelt, die den Fahrplanungsprozess rationalisieren und den Aufwand der Datenhaltung reduzieren können.

Der Kerngedanke des Projektes „Trassenbörse“ ist dabei die mathematische Optimierung der Nutzung verfügbarer Schienenverkehrstrassen in einem auktionenbasierten Zugtrassenvermarktungsverfahren. Dieses Trassenallokationsproblem lässt sich als ein kombinatorisches Optimierungsproblem auffassen, dass in jeder Auktionsrunde mit neuen Geboten neu gelöst werden muss. Die mathematische Optimierung im Projekt „Trassenbörse“ erfordert dabei eine vergrößerte Abbildung und Darstellung der Netzinfrastruktur, da die Komplexität einer mikroskopisch gleisgenauen Datengrundlage die Rechenzeiten unverhältnismäßig hoch ansteigen lassen würde. Dafür wurde die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Modellierung mit planerischen Zugfolgezeiten eingesetzt.

Der gewählte Ansatz der Methode der planerischen Zugfolgezeiten geht von den bei Betriebssimulationen gewonnenen Erkenntnissen aus und überträgt diese auf eine makroskopische Modellierung der Infrastruktur. Die Vielzahl der im täglichen Eisenbahnbetrieb auftretenden Variationen (individuelles Verhalten der Triebfahrzeugführer, Störungen des Betriebsablaufes, etc.) muss dabei wegen der für die mathematische Optimierung notwendigen Beschränkungen für Zwecke der Fahrplanung durch Standardisierung reduziert werden.

Die Nutzung der Modellierung mit planerischen Zugfolgezeiten im Zusammenhang mit der mathematischen Optimierung erfordert daher die Zusammenfassung der einzelnen Züge zu Zugtypen sowie die Verwendung von Standardfahrweisen als Annahmen für das typische Verhalten von Triebfahrzeugführern. Zur weiteren Standardisierung wird aufgrund der Erfordernisse der mathematischen Optimierung zudem eine abstrakte ganzzahlige Zeiteinheit verwendet, deren Größe an die Notwendigkeiten der jeweiligen Untersuchung angepasst werden kann.

Die Infrastruktur wird durch einen Netzgraphen aus Kanten und Knoten abgebildet. Dabei repräsentieren die Knoten Bahnhöfe oder sonstige Betriebsstellen im Netz, an denen sich die Zugreihenfolge ändern kann. Die Kanten stellen die Streckenabschnitte zwischen diesen Knoten dar. Kanten und Knoten werden durch Attribute zur Beschreibung ihrer wesentlichen Eigenschaften ergänzt. Damit wird das komplexe betriebliche Wissen auf wenige Kenngrößen verdichtet.

Positiv ist dabei die gute Anpassungsfähigkeit der Modellierung an unterschiedliche Modellgrößen hervorzuheben. Für unterschiedliche Untersuchungen und Anwendungsfälle ist zwischen notwendiger Modellgröße, entstehendem Datenumfang sowie erforderlicher Genauigkeit abzuwägen. Dadurch ist die Modellierung mit planerischen Zugfolgezeiten neben den Anwendungen im Trassenmanagement außerdem für strategische Betriebsuntersuchungen sowie analytische Kapazitätsbestimmung von Schieneninfrastruktur (siehe Kapitel 3) anwendbar.

Dabei sind sowohl Anwendungsfälle mit als auch ohne Verwendung der mathematischen Optimierung möglich. Je nach Planungsphase, Zeithorizont der Untersuchung und verfügbaren Daten kann zwischen Untersuchungen mit vorgegebenem Betriebsprogramm, mit bekanntem Verkehrsaufkommen ohne festgelegtes Betriebsprogramm sowie ohne Angaben zu Verkehrsaufkommen und Betriebsprogrammen unterschieden werden.

Bei Anwendung der Modellierung mit planerischen Zugfolgezeiten kann die Genauigkeit mikroskopischer Fahrplanungsprogramme erreicht werden. Durch die dafür notwendige sehr feine Diskretisierung ist eine große Anzahl an Parametern erforderlich, die die gegenwärtige Verarbeitungskapazität der mathematischen Optimierung für in der Praxis relevante Größen von Untersuchungsräumen übersteigen wird.

Durch Genauigkeitsabstriche, die durch die Verwendung von abgestimmten Puffer- und Reservezeiten ausgeglichen werden können, ist die Modellierung von Untersuchungsräumen sinnvoller Größenordnung möglich. Es ergeben sich aber erst ab einer größeren Aggregationsstufe Vorteile im Datenaufwand gegenüber mikroskopischen Verfahren, die dann mit Genauigkeitseinbußen erkauft werden müssen.

Die Einteilung der Züge in Zugtypen spielt eine wichtige Rolle für die erzielbare Genauigkeit. Wichtig ist deshalb eine flexible Zugtypeinteilung, die an die Bedingungen in den jeweiligen Streckenabschnitten angepasst ist. Damit können möglichst viele Besonderheiten abgebildet werden, ohne den dafür

erforderlichen Datenaufwand unnötig in die Höhe zu treiben.

Es konnte gezeigt werden, dass zur Erzielung verlässlicher Berechnungsergebnisse wichtige Eingangsparameter, wie z.B. fahrdynamische Fahrzeugdaten, Längenangaben, zulässige Geschwindigkeiten, etc. (siehe Kapitel 4.3.3), bekannt sein müssen. Für weitere Parameter, wie z.B. Signalstandorte, Weichenabzweiggeschwindigkeiten, etc. (siehe Kapitel 4.3.3), ist dagegen die Verwendung von Schätzwerten möglich.

Aufgrund der Vielzahl der vorhandenen Einflussgrößen dieser Untersuchung konnten aber nicht alle Aspekte detailliert untersucht werden. Daher sind weiterführende und vertiefende Untersuchungen zu folgenden Themen sinnvoll:

- Näher zu untersuchen sind die Auswirkungen der unterschiedlichen Modellierungsphilosophien hinsichtlich der Einteilung der Streckenabschnitte. Insbesondere sind auch Verfahren zur Verringerung der auftretenden Rundungsfehler für kurze Streckenabschnitte zu identifizieren und zu durchleuchten.
- Weiterhin ist die ausführlichere Untersuchung der Bahnhofskapazitäten aufbauend auf den Knotenuntersuchungen von Bendfeldt [Bendfeldt 2004b] zur Standardisierung von Bahnhofslayouts sinnvoll. Die Identifizierung bestimmender Einflussfaktoren und eine Systematisierung ihrer Auswirkungen auf die zur Verfügung stehenden Knotenkapazitäten sind dabei für künftige Untersuchungen in den Fokus zu rücken.
- Für die weitere Verringerung des Datenumfanges bietet sich eine streckenabschnittsabhängig flexible Einteilung der Zugtypen an. Die Umsetzung dieser variablen Zugtypeinteilung und ihre Auswirkungen auf die erforderliche Datenmenge und den Aufwand für die mathematische Optimierung sollten untersucht werden.
- Zur Erleichterung der Anpassung der Modellierung an unterschiedliche Untersuchungsräume kann die Entwicklung einer zumindest teilweise automatisierten Umsetzung von mikroskopischen Infrastrukturdaten in das notwendige Makro-Netz sinnvoll sein.
- Zudem ist eine weitere Ausarbeitung und Untersuchung der in Kapitel 3 skizzierten Anwendungsmöglichkeiten erforderlich.

Die Untersuchung des Zusammenspiels mit der mathematischen Optimierung war nicht Gegenstand dieser Arbeit. Auch dies muss vertiefend untersucht werden. Noch ist nicht nachgewiesen worden, ob die erzielbaren Ergebnisse von simultaner mathematischer Optimierung der Fahrplantrassen im Verbund

mit dafür notwendiger makroskopischer Abbildung besser als die Ergebnisse der bislang verwendeten sequentiellen mikroskopischen Trassenoptimierungsalgorithmen sind.

## Literaturverzeichnis

Kürzel	Quelle
Ackermann 2004	Ackermann, T.: Die Bewertung der Pünktlichkeit als Qualitätsparameter im Schienenpersonenverkehr auf Basis der direkten Nutzenmessung. <a href="http://www.uni-stuttgart.de/iev/forschung/puenktlichkeit.htm">http://www.uni-stuttgart.de/iev/forschung/puenktlichkeit.htm</a> , 17. 6. 2004
Alexandrescu 2000	Alexandrescu, C., Balan, D., Godziejewski, B.: Adaptive Algorithmen und Strukturen für die Datenübertragungssysteme der Bahnen. in Signal + Draht 92 (2000), Heft 5
Baars 1999	Baars, J., Brünger, O.: Von der Trassenbestellung zum Kursbuch. in Eisenbahntechnische Rundschau 48 (1999)
Baier 2000	Baier, T.: Pünktlichkeit und Energieeinsparung mit dem Siemens-METROMISER. in Signal + Draht 92 (2000), Heft 5
Bär 1998	Bär, M.: Planungs- und Dispositionssysteme für den Bahnbetrieb – Anforderungen an die weitere Entwicklung rechnergestützter Lösungen. in Eisenbahningenieur 49 (1998), Heft 3
Bendfeldt 1999	Bendfeldt, J.: Gestaltung und Bewertung von Fahrstraßenknoten. in Eisenbahningenieur 50 (1999), Heft 9
Bendfeldt 2004a	Bendfeldt, J., Warninghoff, C.: Infrastrukturbezogene Auswertung von Betriebssimulationen in der Eisenbahnbetriebswissenschaft. in Eisenbahntechnische Rundschau 53 (2004), Heft 6
Bendfeldt 2004b	Bendfeldt, J.: Möglichkeiten der Standardisierung in der Infrastrukturplanung von Eisenbahnknoten. Dissertation, Wissenschaftliche Arbeiten für den Schienenverkehr des Instituts für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und -betrieb der Uni Hannover Nr. 62, 2004
Berglehner 2002	Berglehner, R., Polz, J.: Simulation des Sperrzeitverhaltens von Bahnübergängen. in Signal + Draht 94 (2002), Heft 3
Bibergeil 2003	Bibergeil, W.: Internationaler Datenaustausch. in Signal + Draht 95 (2003), Heft 5
Bolln 2003	Bolln, N., Gál, I., Parádi, F.: Prüfung des Betriebsprogramms und der Kapazitätsausnutzung: Mikrosimulation. in Signal + Draht 95 (2003), Heft 11
Borndörfer 2006	Borndörfer, R., u.a.: An Auctioning Approach to Railway Slot Allocation. in Competition and Regulation in Network Industries, Volume 1 (2006), No. 2
Borndörfer 2007a	Borndörfer, R., Schlechte, T.: Models for railway track allocation. Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik, Berlin, 2007

Borndörfer 2007b	Borndörfer, R., Schlechte, T.: Solving railway track allocation problems. Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik, Berlin, 2007
Bouma 1994	Bouma, A., Oltrogge, C.: Linienplanung und Simulation für öffentliche Verkehrswege in Praxis und Theorie. in Eisenbahntechnische Rundschau 43 (1994), Heft 6
Brünger 1996	Brünger, O.: Konzeption einer Rechnerunterstützung für die Feinkonstruktion von Eisenbahnfahrplänen. Dissertation, Schriftenreihe des Verkehrswissenschaftlichen Instituts der RWTH Aachen, 1996
Brünger 2000	Brünger, O.: Fahrplanfeinkonstruktion mit Rechnerunterstützung – Grundlagen, Meilensteine und Visionen. in Edition Eisenbahntechnische Rundschau, Darmstadt, 2000
Bussieck 1997	Bussieck, M., Winter, T., Zimmermann, U.: Discrete Optimization in Public Rail Transport. in Mathematical Programming 79 (1997), Heft 1-3
Cordeau 1998	Cordeau, J., Toth, P., Vigo, D.: A Survey of Optimization Models for Train Routing and Scheduling. in Transportation Science 32 (1998), Heft 4
DB 2004	DB Richtlinie 402 – Trassenmanagement; Stand 2004.
DB 2008	DB Richtlinie 405 – Fahrwegkapazität; Stand 2008.
Duscheck 2000	Duscheck, J., Lölgen, T.: Der virtuelle Zug – Simulationsgestützte Bewertung und Optimierung von Zugkonzepten. in Eisenbahntechnische Rundschau 49 (2000), Heft 10
DVWG 2004	DVWG, .: Eisenbahnbetriebswissenschaft Methoden der Eisenbahnbetriebsplanung und –betriebssimulation. DVWG, Berlin, 2004
Fay 2000	Fay, A.: Wissensbasierte Dispositionsunterstützung. in Eisenbahntechnische Rundschau 49 (2000), Heft 11
Fengler 2003	Fengler, W., Haslinger, A., Klahn, V.: Kennzahlen zur Bewertung von Infrastruktur und Betrieb. in Eisenbahningenieur 54 (2003), Heft 10
Fenner 1998	Fenner, W., Naumann, P.: Verkehrssicherungstechnik – Steuern, Sichern und Überwachen von Fahrwegen und Fahrgeschwindigkeiten im Schienenverkehr. Publicis-MCD-Verlag, Erlangen, 1998
Ferchland 2004	Ferchland, C., Körner, T.: Analytische Verfahren der Eisenbahnbetriebswissenschaft. in Eisenbahntechnische Rundschau 53 (2004), Heft 7/8
Florio 2004	Florio, L., Mussone, L.: A new approach to the analytical formulation of the capacity of complex railway systems. mussone@polito.it, 7. 1. 2005

Frank 2003	Frank, M.: Erweiterung des LZB-Systems für die Strecke Köln-Rhein/Main. in Signal + Draht 95 (2003), Heft 10
Freiberger 2004	Freiberger, K., Bundschuh, M.: Einsatzmöglichkeiten von Optimierungsverfahren in der Fahrzeugumlaufplanung der Deutschen Bahn AG. in Eisenbahntechnische Rundschau 53 (2004), Heft 6
Fricke 1990	Fricke, K., Hertel, G.: Bedienungsprozesse im Transportwesen. transpress , Berlin, 1990
Fricke 2000	Fricke, E., Müller, G., Pohl, M.: „Netz21“ – Integrierte Netzoptimierung und Korridor-Vorplanungen. in Eisenbahntechnische Rundschau 49 (2000), Heft 7/8
Garstenauer 2004	Garstenauer, K.: Die Gestaltung des Infrastruktur-Benützungsentgelts der ÖBB. in Eisenbahntechnische Rundschau Austria (2004)
Geiß 2002a	Geiß, G.: CIR-ELKE im Betrieb. in Eisenbahningenieur 53 (2002), Heft 9
Geiß 2002b	Geiß, G.: CIR-ELKE-Pilot Offenburg – Basel. in Signal + Draht 94 (2002), Heft 2
Glowinski 2001	Glowinski, D.: Das Netz-Infrastrukturdatenmanagement bei der neu organisierten DB Netz AG. in Eisenbahningenieur 52 (2001), Heft 8
Greaves 2000	Greaves, T.: Dynamic train sceduling on a national scale. in Railway Gazette International (2000), Heft 06
Gröger 2002	Gröger, T.: Simulation der Fahrplanerstellung auf der Basis eines hierarchischen Trassenmanagements und Nachweis der Stabilität der Betriebsabwicklung. Dissertation, Veröffentlichung der RWTH Aachen, 2002
Hansen 2008	Hansen, I. u.a.: Railway Timetable & Traffic. Eurailpress DVV Rail Media, Hamburg, 2008
Happel 1959	Happel, O.: Sperrzeiten als Grundlage für die Fahrplankonstruktion. in Eisenbahntechnische Rundschau 8 (1959), Heft 2
Hauptmann 1999	Hauptmann, D., Kaminski, R., Radtke, A.: Integrierte Planung des Eisenbahnbetriebs mit Simu++. in Signal + Draht 91 (1999), Heft 7/8
Hauptmann 2000	Hauptmann, D.: Automatische und diskriminierungsfreie Ermittlung von Fahrplantrassen in beliebig großen Netzen spurgeführter Verkehrssysteme. Dissertation, Wissenschaftliche Arbeiten für den Schienenverkehr des Instituts für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und –betrieb der Uni Hannover Nr. 54, veröffentlicht im Hestra Verlag Hannover, 2000

Heller 2004	Heller, S., Schaer, T.: DisKon-Disposition und Konfliktmanagement bei der DB AG. in Eisenbahningenieur 55 (2004), Heft 9
Henkel 2007	Henkel, A. u.a.: Entwicklung eines Fahrplantrassenmanagement-Servers für einen börsenorientierten und internetbasierten Vertrieb von Fahrplantrassen des Schienenverkehrs im Verbundprojekt Trassenbörse Phase 2 – Schlussbericht. Rail Management Consultants GmbH (rmcon) und Institut für Verkehrswesen, Eisenbahnbau- u. betrieb (IVE) der Leibniz-Universität Hannover (LUH), Hannover, 2007
Hering 2003	Hering, M., Krevet, R., Liesch, M.: Verfügbarkeit der weltweit ersten ERTMS/ETCS-Linie mit Level 2. in Signal + Draht 95 (2003), Heft 9
Hertel 1992a	Hertel, G., Steckel, J.: Fahrzeitberechnung unter stochastischem Aspekt. in Eisenbahningenieur 43 (1992), Heft 5
Hertel 1992b	Hertel, G.: Die maximale Verkehrsleistung und die minimale Fahrplanempfindlichkeit. in Eisenbahntechnische Rundschau 41 (1992), Heft 10
Hertel 1994	Hertel, G.: Qualität als strategischer Erfolgsfaktor. in Eisenbahningenieur 45 (1994), Heft 3
Hertel 1995a	Hertel, G.: Betriebswissenschaftliche Bemessung von Gleisgruppen. in Eisenbahn Ingenieur Kalender, Hamburg, 1995
Hertel 1995b	Hertel, G.: Leistungsfähigkeit und Leistungsverhalten von Eisenbahnbetriebsanlagen – Modelle und Berechnungsmöglichkeiten. in 1. Eisenbahnbetriebswissenschaftliches Kolloquium, Schriftenreihe d. Inst. f. Verkehrssystemtheorie, Bahnverkehr Bd. 1, Dresden, 1995
Hertel 1997	Hertel, G., Ludwig, D.: Kundenorientierte Leistungsuntersuchungen im Netz der Eisenbahn. in Edition ETR: BahnReport '97, 1997
Huber 2000	Huber, T., Bleser, L.: Der Anwendungsmanager – Eine IT-Architektur auf den Fahrzeugen der DB AG. in Signal + Draht 92 (2000), Heft 6
Hürlimann 2001	Hürlimann, D.: Objektorientierte Modellierung von Infrastrukturelementen und Betriebsvorgängen im Eisenbahnwesen. Dissertation, Veröffentlichung der ETH Zürich, 2001
iRFP 2008	iRFP: Produkt-Webseite zum Programmpaket „FBS“. <a href="http://www.irfp.de/deutsch/fbs/index.html">http://www.irfp.de/deutsch/fbs/index.html</a> , 06.09.2008

Jacoby 2001	Jacoby, H.: Infrastrukturdatenmanagement für Planung, Bau und Instandhaltung. in Eisenbahningenieur 52 (2001), Heft 10
Jäger 1993	Jäger, U.: „Normierte Schnittstelle“ zwischen Fahrplananwendern. in Die Deutsche Bahn 69 (1993), Heft 11
Kaminsky 2001	Kaminsky, R.: Pufferzeiten in Netzen des spurgeführten Verkehrs in Abhängigkeit von Zugfolge und Infrastruktur. Dissertation, Wissenschaftliche Arbeiten für den Schienenverkehr des Instituts für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und -betrieb der Uni Hannover Nr. 56, veröffentlicht im Hestra Verlag Hannover, 2001
Kandels 2004	Kandels, C., Wittenberg, K.: Nutzungskriterien am Beispiel der Einführung von GSM-R bei der DB Netz AG. in Eisenbahntechnische Rundschau 53 (2004), Heft 7/8
Kannengießer 1987	Kannengießer, F., Wiche, B.: Einfluß der Fahrzeitzuschläge und Pufferzeiten auf die Pünktlichkeit. in Die Bundesbahn 63 (1987), Heft 11
Klemenz 2007	Klemenz, M., Schultz, S.: Modelling Aspects of a Railway Slot Allocation. Vortrag auf dem IAROR-Kongress RailHannover 2007, 2nd International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis, 28.03.-30.03.2007, Hannover, 2007
Knubel 2002	Knubel, R., Stalder, O., Trümpel, A.: Neue Technologien für mehr Schienenkapazität. in Eisenbahntechnische Rundschau 51 (2002), Heft 11
König 2001	König, H.: VirtuOS – Simulieren von Bahnbetrieb. in Eisenbahntechnische Rundschau 50 (2001), Heft ½
Kuhn 1996	Kuhn, C.: Rechnergestützte Vergabe von Fahrplantrassen bei Eisenbahn. Dissertation, Wissenschaftliche Arbeiten für den Schienenverkehr des Instituts für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und -betrieb der Uni Hannover Nr. 47, 1996
Kuntze 2000	Kuntze, P., Lauckhardt, M.: Das Strecken-GIS der DB Netz AG. in Eisenbahningenieur 51 (2000), Heft 10
Lademann 2004	Lademann, F.: Eingabedaten für Eisenbahnbetriebssimulation. in Eisenbahningenieur 55 (2004), Heft 04
Linder 2001	Linder, U., Schultz, S.: Anforderungen an Ortungssysteme bei Anwendung der Energiesparsamen Fahrweise. Projektbericht des Fachgebietes Schienenfahrwege und Bahnbetrieb der TU Berlin, nicht veröffentlicht
Lindner 2000	Lindner, T.: Train Schedule Optimization in Public Rail Transport. Dissertation, Veröffentlichung der TU Braunschweig, 2000

Lübbecke 2001	Lübbecke, J.: Neues Projektierungswerkzeug für Zugnummernmelde- und Zuglenksysteme. in Signal + Draht 93 (2001), Heft 1+2
Lukac 2005	Lukac, S., Borndörfer, R., Grötschel, M.: Das OPTRA-Modell. Zwischendokumentation der Projektarbeit des Partners ZIB im Kooperationsprojekt Trassenbörse, Stand 22.03.2005, Konrad-Zuse-Zentrum in Berlin, unveröffentlicht.
Martin 2001	Martin, U.: Über die Notwendigkeit einer umfassenden Verkehrssystembewertung. in Standort – Zeitschrift für Angewandte Geographie (2001), Heft 2
Maschek 2002	Maschek, U., Müske, M.: Datenbank und CAD – Datenmodellierung zur Planung von Stellwerken mit ProSig. in Signal + Draht 94 (2002), Heft 1+2
Mietzner 2000	Mietzner, B., Reschke, E.: Zuglaufverfolgung mittels automatischer Fahrzeugidentifizierung. in Signal + Draht 92 (2000), Heft 10
Mittmann 2000	Mittmann, W.: DB-Standards der Linienführung. in Eisenbahntechnische Rundschau 49 (2000), Heft 6
Mitusch 2005	Mitusch, K. u.a.: Trassenbörse – Endbericht für die Phase 1 des Forschungsprojektes, 1.12.2002 – 28.2.2004. Technische Universität Berlin, Berlin, 2005
Mitusch 2007	Mitusch, K. u.a.: Trassenbörse Phase II – Abschlussbericht. Technische Universität Berlin, Berlin, 2007
Nebelung 1975	Nebelung, H.: Festschrift Herrn Prof. Dr.-Ing. Hermann Nebelung zur Vollendung seines 65. Lebensjahres gewidmet von seinen Mitarbeitern. Schriftenreihe des Verkehrswissenschaftlichen Instituts der RWTH Aachen, Aachen, Bd. 21, 1975
Pachl 1998	Pachl, J.: Die verschränkte Dreigleisigkeit. in Eisenbahningenieur 49 (1998), Heft 3
Pachl 1999	Pachl, J.: Standardisierung der Infrastruktur kleiner Knoten. in Eisenbahningenieur 50 (1999), Heft 4
Pachl 2000	Pachl, J.: Safe disposition and scheduling in railway operation. in Signal + Draht 92 (2000), Heft 5
Pachl 2002	Pachl, J.: Systemtechnik des Schienenverkehrs. Teubner Verlag, Stuttgart/Leipzig/Wiesbaden, 3. Aufl., 2002
Pomp 1992	Pomp, R.: Die Anwendung der Datenverarbeitung in der Fahrplanarbeit aus Sicht der Deutschen Bahn . in Die Deutsche Bahn 68 (1992), Heft 9
Potthoff 1962	Potthoff, G.: Verkehrsströmungslehre. Transpress VEB Verlag für Verkehrswesen, Berlin, Bd. 1, 1962
Prinz 2001	Prinz, R., Sewcyk, B., Kettner, M.: NEMO – Netzevaluationsmodell bei den ÖBB. in Eisenbahntechnische Rundschau 50 (2001), Heft 3

Radtke 1995	Radtke, A.: Dispositionsmodell für den optimierten Betriebsmitteleinsatz der Eisenbahn. Dissertation, Wissenschaftliche Arbeiten für den Schienenverkehr des Instituts für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und –betrieb der Uni Hannover Nr. 43, 1995
Radtke 2004	Radtke, A.: Lösung von komplexen Planungsaufgaben mit Hilfe eisenbahnbetriebswissenschaftlicher Verfahren. in Eisenbahn Ingenieur Kalender, Hamburg, 2004
Radtke 2005	Radtke, A.: EDV-Verfahren zur Modellierung des Eisenbahnbetriebs. Habilitation, Wissenschaftliche Arbeiten für den Schienenverkehr des Instituts für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und –betrieb der Universität Hannover Nr. 64, 2005
Rauh 1998	Rauh, H.: Trassenmangement bei der DB AG. in Eisenbahntechnische Rundschau 47 (1998), Heft 10
Rudolph 2004	Rudolph, R.: Entwicklung von Strategien zur optimierten Anordnung von Zeitzuschlägen im Eisenbahnbetrieb. Dissertation, Wissenschaftliche Arbeiten für den Schienenverkehr des Instituts für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und –betrieb der Uni Hannover Nr. 59, 2004
Runge 1996	Runge, W.: Was kann sich die Bahn auf ihren Strecken wirklich leisten?. in Edition ETR: BahnReport '96, 1996
Sauer 1999	Sauer, W.: RUT – Rechnergestützte Trassenkonstruktion. in Eisenbahntechnische Rundschau 48 (1999), Heft 11
Schaer 2002a	Schaer, T.: Methoden, Verfahren und Werkzeuge der Eisenbahnbetriebswissenschaft: Fahrwegkapazitätsbetrachtungen durchführen (Teil1). in Deine Bahn 30 (2002), Heft 1
Schaer 2002b	Schaer, T.: Methoden, Verfahren und Werkzeuge der Eisenbahnbetriebswissenschaft: Fahrwegkapazität mathematisch-analytisch bestimmen (Teil2). in Deine Bahn 30 (2002), Heft 5
Schaer 2002c	Schaer, T.: Methoden, Verfahren und Werkzeuge der Eisenbahnbetriebswissenschaft: Fahrwegkapazität experimentell bestimmen (Teil3). in Deine Bahn 30 (2002), Heft 10
Schaer 2003	Schaer, T.: Der Einfluss von Betriebsführungskonzepten in großen Bahnnetzen. in Signal + Draht 95 (2003), Heft 9
Schaer 2004	Schaer, T.: Der Weg zu leistungsfähigen Netzknoten – eine Analyse unter Einbeziehung von ETCS. in Eisenbahntechnische Rundschau 53 (2004), Heft 4
Schaffarczyk 2001	Schaffarczyk, K.: Das neue flexible Führerraumanzeigesystem in Triebfahrzeugen der DB AG. in Signal + Draht 93 (2001), Heft 11

Schmidt 2000	Schmidt, M., Winter, J.: Anforderungen der GPS-basierten Ortung an den digitalen Streckenatlas. in Signal + Draht 92 (2000), Heft 4
Schmitt 2001	Schmitt, A., Winter, W.: Infrastrukturdaten im Intranet. in Eisenbahningenieur 52 (2001), Heft 9
Schultz 1999	Schultz, S.: Entwurf und Implementierung einer Strecken- und Infrastruktur-Datenbank für Schienenverkehrsnetze. Diplomarbeit 1999, Technische Universität Berlin, unveröffentlicht.
Schuster 1993	Schuster, E.: Anpassungsentwicklungen an die Block- und Stellwerkstechnik für CIR-ELKE. in Eisenbahningenieur 44 (1993), Heft 6
Schwanhäüßer 1974	Schwanhäüßer, W.: Die Bemessung der Pufferzeiten im Fahrplangefüge der Eisenbahn. Dissertation, Schriftenreihe des Verkehrswissenschaftlichen Instituts der RWTH Aachen, 1974
Schwarz 2004	Schwarz, H., Köckler, N.: Numerische Mathematik. B. G. Teubner Verlag, Wiesbaden, 5. Aufl., 2004
Seidel 2002	Seidel, B.: Dokumentation der Expertengespräche vom Gemeinsamen Workshop von DVWG und IVE am 17./18.10.2002 in Hannover über Eisenbahnmaßnahmenpakete der Europäischen Union: Leitbild und Forderungen der Praxis.
Sewcyk 2004	Sewcyk, B.: Makroskopische Abbildung des Eisenbahnbetriebs in Modellen zur langfristigen Infrastrukturplanung. Dissertation, Wissenschaftliche Arbeiten für den Schienenverkehr des Instituts für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und -betrieb der Uni Hannover Nr. 61, 2004
Six 1996	Six, J.: Abstandshaltung und Streckenleistungsfähigkeit. in Signal + Draht – Beilage 88 (1996), Heft 4
SNB 2008	DB Netz AG: Schienennetz-Benutzungsbedingungen der DB Netz AG. <a href="http://stredax.bahn.de/SNBViewer/public_html_de/index.html">http://stredax.bahn.de/SNBViewer/public_html_de/index.html</a> , 16.07.2008
Tschorn 2000	Tschorn, S.: Automatisierte Fahrplanabstimmung zwischen Netzbetreiber und Eisenbahnverkehrsunternehmen. in Eisenbahntechnische Rundschau 49 (2000), Heft 7/8
Tschorn 2001	Tschorn, S.: Trassenmanagement und -marketing für freien Netzzugang. in Signal + Draht 93 (2001), Heft 5
Uebel 1998	Uebel, H.: Durchsatz von Strecken und Stationen. in Signal und Draht 90 (1998), Heft 4
Uhlmann 2004	Uhlmann, M., Mutschink, K.: Bemessung komplexer Eisenbahninfrastruktur – Die konstruktive Methode. in Eisenbahntechnische Rundschau 53 (2004), Heft 7/8

VDI 1995	VDI, u.a.: VDI Bericht Nr. 1219: Simulation und Simulatoren für den Schienenverkehr. VDI Verlag, Düsseldorf, 1995
VIA 2005	VIA: Historische Entwicklung des VIA. <a href="http://www.via.rwth-aachen.de/historisches.htm">http://www.via.rwth-aachen.de/historisches.htm</a> , 2. 9. 2005
Voß 1998	Voß, G.: Bestimmung fahrdynamischer Daten. Bericht 4-98 im Auftrag der DB AG, 1998, Universität Hannover, unveröffentlicht
Warninghoff 2004	Warninghoff, C., Ferchland, C.: Nutzung von Simulationen zur Unterstützung der betrieblichen Infrastrukturplanung. in Eisenbahntechnische Rundschau 53 (2004), Heft 7/8
Weber 2004	Weber, G.: Der Fahrplan - Kernelement des Eisenbahnbetriebes. in Eisenbahntechnische Rundschau 53 (2004), Heft 6
Weigand 2004	Weigand, W., Kübert, K., Beschorner, C.: Stand der Planungen und Bewertung von Netzknoten - Gesamtdarstellung. in Eisenbahntechnische Rundschau 53 (2004), Heft 6
Weiger 1999	Weiger, U.: Großstadtbahnhöfe - Beurteilung von Großstadtbahnhöfen aus verkehrlicher, betrieblicher und stadtstruktureller Sicht. in Eisenbahningenieur 50 (1999), Heft 6
Weimann 1999	Weimann, M.: Software für Fahrplanerstellung und Zugplanung . in Rail International (1999), Heft 11
Wende 2003	Wende, D.: Fahrdynamik des Schienenverkehrs. B. G. Teubner Verlag, Wiesbaden, 1. Aufl., 2003
Wendler 1995	Wendler, E.: Weiterentwicklung der Sperrzeitentreppe für moderne Signalsysteme. in Signal + Draht 87 (1995), Heft 7/8
Wendler 2002	Wendler, E.: Bemessungsmethoden für große Eisenbahnknoten. in Eisenbahntechnische Rundschau 51 (2002), Heft 7/8
Wendler 2004	Wendler, E., Naehrig, M.: Statistische Auswertung von Verspätungsdaten. in Eisenbahn Ingenieur Kalender (2004)

## Begriffserläuterungen

<b>Bahnhof</b>	Betriebsstelle im Eisenbahnnetz mit mindestens einer Weiche, an der Züge beginnen, enden, ausweichen sowie wenden können
<b>Fahrplan</b>	vorausschauende Festlegung des Fahrtverlaufes von Zugfahrten
<b>Fahrplanstabilität</b>	Eignung des Fahrplans, Verspätungen zeitlich und räumlich zu begrenzen sowie abzubauen
<b>Fahrplantrasse</b>	im Fahrplan vorgesehene Inanspruchnahme der Infrastruktur durch eine Zugfahrt
<b>Fahrprofil</b>	Vorgabe für den Fahrtverlauf eines Zuges
<b>Fahrspiel</b>	Fahrtverlauf eines Zuges zwischen zwei planmäßigen Halten
<b>Fahrzeit</b>	vom Zug benötigte Zeit, um einen bestimmten Weg zurückzulegen
<b>Fahrzeitzuschlag</b>	Zeitzuschlag auf die Fahrzeit zum Ausgleich von Verspätungen
<b>Lineare Zugbeeinflussung</b>	Zugsicherungssystem mit kontinuierlicher Datenübertragung zur Überwachung des Zuglaufes
<b>Modellzug</b>	charakterisierender Zug eines Zugtyps
<b>planerische Zugfolgezeit</b>	Zugfolgezeit inklusive einer geplanten Pufferzeit bei vorgegebenen Fahrprofilen der beteiligten Züge
<b>Pufferzeit</b>	Zeitzuschlag auf die Mindestzugfolgezeit zur Verringerung der Verspätungsübertragung
<b>Punktförmige Zugbeeinflussung</b>	Zugsicherungssystem mit punktueller Datenübertragung zur Überwachung des Zuglaufes
<b>Streckenabschnitt</b>	Netzelement einer Schieneninfrastruktur zwischen zwei Betriebsstellen, auf der planmäßig Züge verkehren
<b>Zugfolgezeit</b>	zeitlicher Abstand zwischen zwei unmittelbar aufeinander folgenden Zügen
<b>Zugtyp</b>	Zusammenfassung von individuellen Zügen

## Abkürzungsverzeichnis

<b>LZB</b>	Lineare Zugbeeinflussung
<b>PZB</b>	Punktförmige Zugbeeinflussung
<b>pZZ</b>	planerische Zugfolgezeit
<b>SGFV</b>	Schienengüterfernverkehr
<b>SGNV</b>	Schienengüternahverkehr
<b>SGV</b>	Schienengüterverkehr
<b>SPFV</b>	Schienenpersonenfernverkehr
<b>SPNV</b>	Schienenpersonennahverkehr
<b>SPV</b>	Schienenpersonenverkehr
<b>ZT</b>	Zugtyp

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Kernmodule der Trassenbörse (nach [Mitusch 2007]) .....	10
Abbildung 2:	Beispiel für die Netzabbildung in InfraGen (Raum Hannover). 16	
Abbildung 3:	Beispiel-Gleisplan für eine Abzweigung auf der freien Strecke	17
Abbildung 4:	Schematische Darstellung der Modellierung mit langen Abschnitten für eine Abzweigung auf der freien Strecke.....	17
Abbildung 5:	Schematische Darstellung der Modellierung mit teilweise gleisgenauer Abbildung für eine Streckenabzweigung .....	17
Abbildung 6:	Beispiel für die Fahrzeiten für einen Streckenabschnitt .....	19
Abbildung 7:	Kräftegleichgewicht der Zugfahrt (nach [Wende 2003]) .....	20
Abbildung 8:	Fahrtverlauf eines ICE als Geschwindigkeits-Weg-Diagramm [Linder 2001].....	22
Abbildung 9:	Fahrtverlauf eines ICE als Zeit-Weg-Diagramm.....	23
Abbildung 10:	Sperrzeitentreppe und Zugfolgezeit (Quelle: [Borndörfer 2006]). .....	24
Abbildung 11:	Beispiel für Zugfolgezeiten eines Streckenabschnittes .....	25
Abbildung 12:	Bestandteile der Blocksperrzeit (Quelle: [DB 2008]) .....	27
Abbildung 13:	Notwendige Zugfolgezeiten für Zwei-Richtungsverkehr (Quelle: [Hansen 2008]) .....	28
Abbildung 14:	Schematische Darstellung der Konfliktsituation für Zwei-Richtungsverkehr bei eingleisigen Streckenabschnitten	29
Abbildung 15:	Schematische Darstellung der Konfliktsituation für Kreuzungskonflikte – kreuzender Zug „vorausfahrend“ .....	31
Abbildung 16:	Schematische Darstellung der Konfliktsituation für Kreuzungskonflikte – kreuzender Zug „nachfolgend“.....	31
Abbildung 17:	Spurplandarstellung für fiktiven Beispielbahnhof (eigene Darstellung).....	35
Abbildung 18:	Beispiel für eine Hierarchie der Zugtypen (siehe Tabellen A1 – A4 im Anhang) .....	41

Abbildung 19:	Übersichtsdarstellung der Bestandteile von InfraGen .....	49
Abbildung 20:	InfraGen – Ansicht der Auswahl für die zu berechnenden Streckenabschnitte .....	59
Abbildung 21:	InfraGen – Ansicht der Einstellungen.....	61
Abbildung 22:	Module der Trassenbörse (Quelle: [Henkel 2007]) .....	63
Abbildung 23:	Stilisierte Darstellung des ausgewählten Teilnetzes .....	69
Abbildung 24:	Absolute Fahrzeitunterschiede zwischen verschiedenen ICE auf der erweiterten Infrastruktur „A – B – Z“ bei einer Streckenhöchstgeschwindigkeit von 250 km/h (Geschwindigkeitsband S1Bx) .....	79
Abbildung 25:	Absolute Fahrzeitunterschiede zwischen verschiedenen ICE auf der erweiterten Infrastruktur „A – B – Z“ bei einer Streckenhöchstgeschwindigkeit von 160 km/h (Geschwindigkeitsband S3Bx) .....	80
Abbildung 26:	Absolute Fahrzeitunterschiede haltender und durchfahrender ICE auf der erweiterten Infrastruktur „A – B – Z“ bei einer Streckenhöchstgeschwindigkeit von 250 km/h (Geschwindigkeitsband S1Bx) .....	80
Abbildung 27:	Fahrzeiten haltender und durchfahrender ICE für Gleis 1 auf der erweiterten Infrastruktur „A – B – Z“ unterschieden nach den untersuchten ICE-Baureihen.....	81
Abbildung 28:	Zugfolgezeitunterschiede zwischen verschiedenen ICE bei unterschiedlichen Zugtypeinteilungen.....	82
Abbildung 29:	Zugfolgezeitunterschiede für ICE zwischen einer ebenen Strecke und einer Strecke mit realem Steigungsprofil .....	84
Abbildung 30:	Fahrzeitunterschiede für ICE zwischen einer ebenen Strecke und einer Strecke mit gleichmäßiger Steigung (12,5 ‰) bei unterschiedlichen Streckenhöchstgeschwindigkeiten .....	85
Abbildung 31:	Zugfolgezeitunterschiede für ICE zwischen einer ebenen Strecke und einer Strecke mit gleichmäßiger Steigung (15 ‰) bei unterschiedlichen Streckenhöchstgeschwindigkeiten.....	86
Abbildung 32:	Fahrzeitunterschiede für ICE zwischen einer ebenen Strecke	

	und einer Strecke mit gleichmäßigem Gefälle (-12,5 ‰) bei unterschiedlichen Streckenhöchstgeschwindigkeiten .....	87
Abbildung 33:	Zugfolgezeitunterschiede für ICE zwischen einer ebenen Strecke und einer Strecke mit gleichmäßigem Gefälle (-12,5 ‰) bei unterschiedlichen Streckenhöchstgeschwindigkeiten.....	88
Abbildung 34:	Absolute Fahrzeitunterschiede einzelner ICE bei unterschiedlichen Streckenhöchstgeschwindigkeiten (160 km/h und 250 km/h) im durchgehenden Hauptgleis (Gleis 6) auf der erweiterten Infrastruktur „A – B – Z“ .....	90
Abbildung 35:	Zugfolgezeitunterschiede für ICE zwischen einem realen Höchstgeschwindigkeitsprofil und der Verwendung einer geschätzten gleichmäßigen Höchstgeschwindigkeit .....	92
Abbildung 36:	Zugfolgezeitunterschiede für unterschiedliche ICE bei geschätzten Signalpositionen .....	93
Abbildung 37:	Zugfolgezeitunterschiede für unterschiedliche RE bei geschätzten Signalpositionen unter Verwendung von LZB.....	93
Abbildung 38:	Zugfolgezeitunterschiede für unterschiedliche RE bei geschätzten Signalpositionen unter Verwendung von PZB.....	94
Abbildung 39:	Schematisches Bahnhofslayout der Bahnhöfe Celle (links) und Nordstemmen (rechts) nach [SNB 2008] .....	96
Abbildung 40:	Zugfolgezeitunterschiede für ICE bei unterschiedlichen Weichenabzweiggeschwindigkeiten im Bahnhof.....	98
Abbildung 41:	Absolute Fahrzeitunterschiede einzelner ICE zwischen verschiedenen Gleisen (nur Geschwindigkeitsband S3Bx) auf der erweiterten Infrastruktur „A – B – Z“ .....	100
Abbildung 42:	Absolute Fahrzeitunterschiede einzelner ICE zwischen den abzweigenden Gleisen 1-4 (nur Geschwindigkeitsband S3Bx) auf der erweiterten Infrastruktur „A – B – Z“ .....	100
Abbildung 43:	Fahrzeitunterschiede bei Verwendung unterschiedlicher Zeiteinheiten .....	101
Abbildung 44:	Zugfolgezeitunterschiede bei Verwendung unterschiedlicher Zeiteinheiten .....	102

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Beispiel für richtungsbezogene Kapazitätsparameter.....	36
Tabelle 2:	Auswirkungen beispielhafter Belegungen auf die Kapazitätsbetrachtung.....	37
Tabelle 3:	Vergleich von fahrdynamischen Parametern zwischen Zugtypen innerhalb der Zugtypen-Hierarchie.....	41
Tabelle 4:	Übersicht der untersuchten Geschwindigkeitsprofile der Strecke	73
Tabelle 5:	Übersicht der untersuchten Geschwindigkeitsprofile im Bahnhof	73
Tabelle 6:	Auswahl geeigneter Verfahren für Fahrplan-, Betriebsprogramm- und Infrastrukturuntersuchungen .....	113

## Anhang

Tabelle A1: Übersicht fahrdynamischer Zugdaten für ICE

<b>Merkmal</b>	<b>ICE-1</b>	<b>ICE-2</b>	<b>ICE-2H</b>	<b>ICE-3</b>	<b>ICE-T</b>
Baureihe	401	402	402	403	411
Wagenanzahl	12	14	7	16	14
zul. Höchstgeschwindigkeit [km/h]	280	280	280	330	230
Zuglänge [m]	359	410	206	400	368
Gesamtmasse [t]	816	824	440	880	805
Anfahrzugkraft [kN]	400	400	200	600	400
max. Bremskraft [kN]	804	804	502	1100	931
Rotationsfaktor	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08

Tabelle A2: Übersicht fahrdynamischer Zugdaten für RE

<b>Merkmal</b>	<b>RE1124</b>	<b>RE1126</b>	<b>RE143</b>	<b>RE218</b>	<b>RE612</b>
Baureihe	112	112	143	218	612
Wagenanzahl	4	6	4	4	1
zul. Höchstgeschwindigkeit [km/h]	160	160	120	140	160
Zuglänge [m]	124,5	178,3	123,8	124,3	51,0
Gesamtmasse [t]	311,8	426,5	295,5	266,0	116,0
Anfahrzugkraft [kN]	209,7	209,7	246,9	165,0	128,0
max. Bremskraft [kN]	323,0	437,0	323,0	285,0	127,5
Rotationsfaktor	1,097	1,090	1,099	1,071	1,060

Tabelle A3: Übersicht fahrdynamischer Zugdaten für RB

<b>Merkmal</b>	<b>RB111</b>	<b>RB143</b>	<b>RB628</b>	<b>RB643</b>	<b>RB646</b>
Baureihe	111	143	628.2	643	646
Wagenanzahl	5	3	1	1	1
zul. Höchst- geschwindigkeit [km/h]	120	120	120	120	120
Zuglänge [m]	149,0	97,1	46,4	48,0	39,0
Gesamtmasse [t]	318,0	242,3	80,0	73,0	70,0
Anfahrzugkraft [kN]	250,0	246,9	53,0	90,0	60,0
max. Bremskraft [kN]	299,3	264,6	75,0	75,0	75,0
Rotationsfaktor	1,101	1,105	1,033	1,060	1,060

Tabelle A4: Übersicht fahrdynamischer Zugdaten für SB

<b>Merkmal</b>	<b>SB111</b>	<b>SB143</b>	<b>SB420</b>	<b>SB424</b>	<b>SB644</b>
Baureihe	111	143	420	424	644
Wagenanzahl	4	3	3	1	1
zul. Höchst- geschwindigkeit [km/h]	140	120	120	140	120
Zuglänge [m]	122,6	96,2	67,0	67,0	52,0
Gesamtmasse [t]	271,0	223,5	138,0	113,0	86,0
Anfahrzugkraft [kN]	250,0	246,9	250,0	150,0	115,0
max. Bremskraft [kN]	247,0	243,0	242,5	120,0	90,0
Rotationsfaktor	1,1042	1,1121	1,060	1,060	1,060

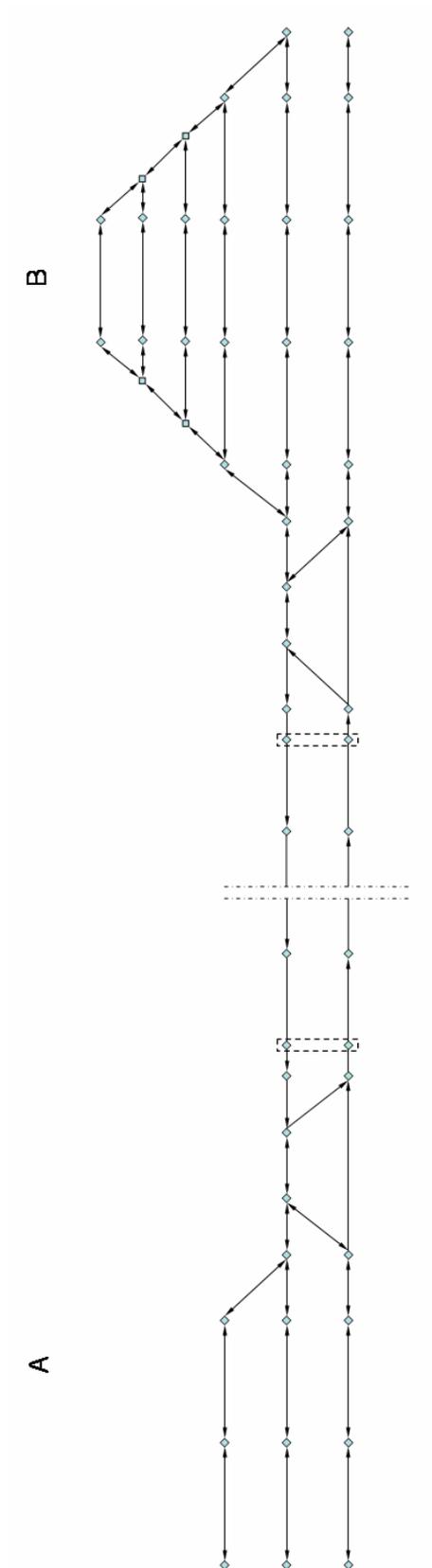


Abbildung A1: Schematische Darstellung einer idealisierten Infrastruktur für Untersuchungen von Fahr- und Zugfolgezeiten mit InfraGen

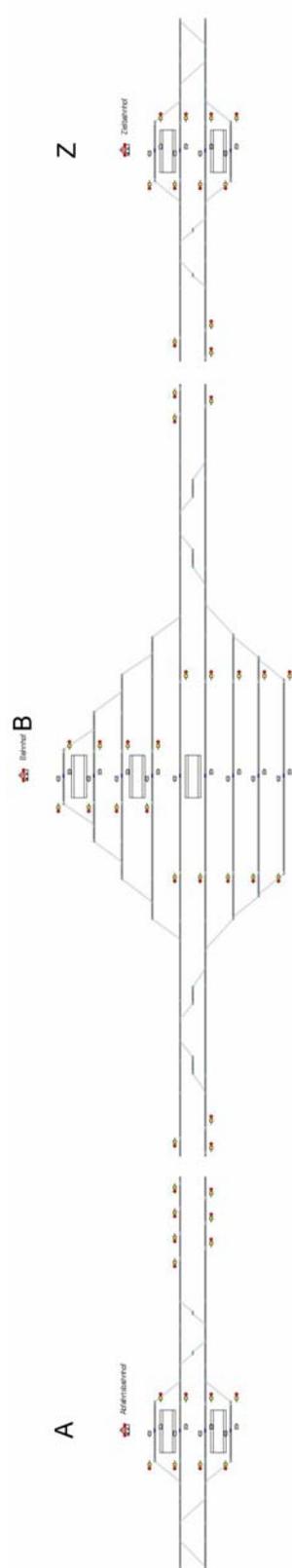


Abbildung A2: Schematische Darstellung der erweiterten Infrastruktur  
„A – B – Z“ in der Infrastrukturansicht von OpenTrack