

KOMBINATORISCHE AUKTIONEN UND IHRE ANWENDUNGEN IM SCHIENENVERKEHR

Diplomarbeit
bei Prof. Dr. Martin Grötschel

vorgelegt von Anke Reuter
am Institut für Mathematik der Fakultät II der
Technischen Universität Berlin

Berlin, 24. März 2005

Die selbständige und eigenhändige Anfertigung versichere ich an Eides statt.

Berlin, den 24. März 2005

Anke Reuter

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Bestehende Situation in Deutschland	2
1.2	Ziel der Diplomarbeit	5
2	Kombinatorische Auktionen	6
2.1	Das Kombinatorische-Auktions-Problem CAP	6
2.2	Auktionsdesign einer Kombinatorischen Auktion	9
2.3	Vorstellung einiger Verfahren	10
2.3.1	Single-Round-Auktionen	10
2.3.2	Iterative Kombinatorische Auktionen	11
3	Trassenbörse als Anwendung einer Kombinatorischen Auktion	14
3.1	Mathematische Modellierung – OPTRA-Modell	14
3.1.1	Modellierung des Bahnnetzes und des Bahnbetriebs	15
3.1.2	Das Gut der Trassenbörse	19
3.1.3	Das ganzzahlige Programm	20
3.2	Literaturüberblick	24
3.3	Der Auktionsrahmen	25
3.3.1	Der implementierte Auktionsmechanismus	26
4	Implementation eines Trassengenerators	29
4.1	Verwendete Daten	31
4.2	Einteilung des verwendeten Bahnnetzes	33
4.2.1	Einteilungen für den Verkehr innerhalb des Netzes	33
4.2.2	Modellierung des Teilnetzumlandes	36
4.3	Einordnung der Verkehrsträger	37
4.4	Nachfrageberechnung	37
4.4.1	Nachfragebestimmung im SPV	38
4.4.2	Nachfragebestimmung im SGV	46
4.4.3	Nachfragebestimmung für das Umland – SNOW-Knoten	48
4.4.4	Einsatz der Nachfragematrizen	49
4.5	Verfahren zur Liniengenerierung	49
4.5.1	Liniengenerierung unter Verwendung eines minimal aufspannenden Baumes	49
4.5.2	Liniengenerierung unter Verwendung eines maximal aufspannenden Baumes	51

Inhaltsverzeichnis

4.5.3	Greedy-Verfahren	52
4.5.4	Point-to-Point-Verfahren	53
4.5.5	Liniengenerierung für Trassen, deren Start- und Zielorte außerhalb des Untersuchungsnetzes liegen	53
4.5.6	Liniengenerierung für den SGV innerhalb des Bahnnetzes	54
4.6	Gebotsmodelle	54
4.7	Anwendung des Trassengenerators	60
5	Generierung von Testszenarien unter verschiedenen verkehrstechni- schen Aspekten	63
5.1	Aktueller Fahrplan – Status quo	63
5.2	Generierung der Testszenarien	68
6	Resultate der Auktionsrechnungen in den verkehrstechnischen Sze- narien	70
6.1	Ergebnisse der Auktionssimulationen	70
6.2	Interpretation der Auktionsresultate	86
7	Zusammenfassung und Ausblick	95
A	Anhang	96

1 Einleitung

Die Mobilität erreicht in der heutigen Gesellschaft einen sehr hohen Stellenwert. In vielen wirtschaftlichen Bereichen und im persönlichen Leben gilt es, Menschen oder Güter möglichst schnell von einem Ort zu einem anderen zu transportieren. Deshalb hat sich der Verkehr in der heutigen Zeit zu einem facettenreichen Phänomen entwickelt. Die meisten Menschen werden damit täglich konfrontiert, sei es durch ihre aktive Teilnahme am Verkehr oder durch die damit zusammenhängenden Auswirkungen. In den vergangenen Jahren stieg das Verkehrsaufkommen drastisch an und einige Verkehrsträger wie Auto und Flugzeug erlangten immer höhere Bedeutung. Der Eisenbahnsektor konnte dabei jedoch nicht mithalten. Der Anteil der Schiene am Gesamtverkehrsmarkt ist stagnierend bis rückläufig [1], [2].

Zur Wiederbelebung des Eisenbahnsektors arbeitete die EU Kommission einige Richtlinien aus, mit dem Ziel, Verkehrsüberlastung und Umweltverschmutzung zu bekämpfen und eine bessere Integration des gesamten europäischen Verkehrssystems zu fördern. Im Weissbuch [3] fordert die EU Kommission die Öffnung des Eisenbahnmarktes:

„Wir brauchen neue Eisenbahnunternehmen. Dies sollten in erster Linie Unternehmen mit einer unabhängigen Geschäftsführung sein, die Geschäftsmöglichkeiten ungehindert nutzen, die Folgen von Fehlentscheidungen aber auch selbst tragen müssen.“

„Die Kommission ist der Ansicht, dass der wirkungsvollste Weg zur Schaffung einer gegenüber anderen Verkehrsträgern wettbewerbsfähigen Eisenbahn darin besteht, den Marktkräften einen größeren Spielraum einzuräumen.“

Der Eisenbahnsektor soll durch mehr Wettbewerb unabhängiger Eisenbahnunternehmen gestärkt werden und außerdem durch die eigenständigen Unternehmen wirtschaftlicher und kostengünstiger werden. Hierbei muss gewährleistet sein, dass alle Eisenbahnverkehrsunternehmen gleiche Zutrittsmöglichkeiten zur Infrastruktur haben. Es soll für sie möglich sein, die von ihnen gewünschten Trassen, spezifiziert durch Fahrweg und Zeit, zu erwerben. Um das zu erreichen, muss der Infrastrukturbetreiber ein unabhängiges und vom Verkehrsbetrieb getrenntes Unternehmen sein.

1.1 Bestehende Situation in Deutschland

In vielen europäischen Ländern ist dieser Reformprozess bereits im Gange. Wie sieht jedoch die Situation in Deutschland aus und wie weit sind die Reformen dort voran geschritten? Die Deutsche Bahn AG (DB AG) entstand im Zuge der Bahnreform von 1994 aus der Zusammenführung der Deutschen Reichsbahn und der Deutschen Bundesbahn. 1999 spalteten sich unter anderem die Tochtergesellschaften DB Regio AG und DB Reise & Touristik AG ab, die für den Schienenpersonennahverkehr und den Schienenpersonenfernverkehr zuständig sind. Außerdem entstanden die Tochtergesellschaften DB Railion GmbH und DB Cargo AG. Sie sind für den Schienengüterverkehr verantwortlich. Obwohl der diskriminierungsfreie Zugang zur Infrastruktur gesetzlich geregelt ist, hat sich der Wettbewerb auf der Schiene nicht merklich erhöht. Die Deutsche Bahn ist in allen Bereichen Marktführer. Nach Angaben des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen beträgt der Anteil Dritter im Nahverkehr 7%. Die Konkurrenz der Deutschen Bahn nimmt im Güterverkehr ebenfalls nur einen kleinen Teil von 13% ein [4]. Im Fernverkehr ist jedoch "noch kein nennenswerter Wettbewerb entstanden", was auf die relativ hohen Investitionen zurückzuführen ist.

Der Infrastrukturbetreiber DB Netz AG ist ebenfalls ein Tochterunternehmen der Deutschen Bahn und keinesfalls unabhängig. Infolge des dadurch gegebenen Diskriminierungspotentials fordern die Fachleute die institutionelle Trennung von Netz und Betreiber. Prof. Hans-Jürgen Ewers (ehem. Infrastrukturpolitik TU Berlin) hat 1991 formuliert, der DB-Konzern dürfe nicht Spieler und Schiedsrichter zu gleich sein [2].

Die DB Netz AG hat ein Preissystem für den Zugang zum Infrastrukturnetz entwickelt, das ihren Angaben zu Folge transparent, kostendeckend und wettbewerbsneutral ist. Am 12.12.2004 bekam das neue Trassenpreissystem TPS 2005 Gültigkeit. Laut einer Pressemitteilung des Eisenbahn-Bundesamtes¹ (EBA) vom 05.11.2004 fühlen sich aber verschiedene Eisenbahnunternehmen unter anderem durch die Sonderzuschläge bei Anmeldung einer Sondertrasse im Preissystem benachteiligt. Das Trassenpreissystem von 1995 ist sogar aufgrund „unanständiger Großkundenrabatte“, wovon nur die DB-Transporttöchter profitierten, vom Kartellamt verboten worden. Dazu heißt es in [1] weiter, dass es kein Trassenpreissystem geben kann das wettbewerbsneutral ist, solange DB Netz zum Konzern der Deutschen Bahn gehört. Bei einer Erhöhung der Trassenpreise decken sich die Mehrausgaben der DB-Transportunternehmen mit denen von DB Netz und die Wettbewerber steigern den Erlös des DB-Konzerns.

Theoretisch ist der freie Zugang zum Schienennetz geregelt. Der entstandene Wettbewerb ist jedoch noch sehr gering. Die Politik drückt sich davor, einen fairen und effizienten Wettbewerbsrahmen durchzusetzen. Die DB AG wird bei einem Umsatz von 16 Mrd. € mit 11 Mrd. € aus öffentlichen Kassen subventioniert [2]. Die Gesamtausgaben der öffentlichen Hand für Verkehrszwecke im Jahr 2000 beliefen sich auf 92 Mrd. DM. Davon

¹Die Aufgabe des Eisenbahn-Bundesamtes besteht darin, für die Sicherheit der Fahrgäste zu sorgen, indem der Zustand des Eisenbahnbetriebes und der Eisenbahnbetriebsanlagen überwacht wird. Desweiteren garantiert es einen diskriminierungsfreien Netzzugang, um mehr Wettbewerb zu fördern.

entfielen fast 42% auf den Eisenbahnsektor. Die Eisenbahn bekam damit 4-mal so viel wie bei einer Ausgabenaufteilung, entsprechend dem Anteil an der Verkehrsleistung im Jahre 2000, angemessen wäre. Dabei beträgt der Anteil des Eisenbahnverkehrs am Personenverkehr 3,2% und im Güterverkehr 14,5%, vergleichend dazu die Anteile des Straßenverkehrs 96,6% und 69,6%. [5]

Trotz hoher Zuschüsse verzeichnet der DB-Konzern gemessen am steigenden Verkehrsvolumen in Deutschland einen schrumpfenden Anteil im Personenfernverkehr und im Güterverkehr [2]. Die Gründe für diese Finanzierungsschwierigkeiten sind vielschichtig. Beispielsweise stehen die Kosten für neue Hochgeschwindigkeitsstrecken in keinem Verhältnis zu den Trassenpreisen für den ICE. Die Hochgeschwindigkeitsstrecke Köln-Frankfurt kostet etwa 30 Mio. € pro Kilometer – „ebenso viel, als hätte man alle 10 m eine 300.000 € teure Villa gebaut“ [2].

Es zeigt sich, dass in Deutschland dringender Handlungsbedarf besteht, den Eisenbahnsektor marktfähiger, kostengünstiger und unabhängig zu gestalten. Mit dem Ziel, ein wettbewerbsfähiges Verfahren zur Trassenvergabe zu untersuchen, wird ein kurzer Überblick über das derzeitige Vergabeverfahren der DB Netz AG gegeben. In der Fahrplanerstellung werden die Anmeldungen der Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVUs) anhand von Konstruktionsprioritäten behandelt. Diese beinhalten beispielsweise die Bevorteilung von vertraglich gebundenen Trassen gegenüber Neuanmeldungen. Treten Nutzungskonflikte auf, schlägt die DB Netz AG Lösungsmöglichkeiten vor. Wie in einem solchen Fall seitens der DB Netz AG vorgegangen wird, kann anhand eines Konstruktionsauftrages mitverfolgt werden (Abbildung 1.1). Falls die Suche nach Lösungsmöglichkeiten erfolglos bleibt, wird in Konfliktlösungsgesprächen mit allen betroffenen Parteien nach einvernehmlichen Lösungen gesucht. Gelingt dies nicht, wird ein Höchstpreisverfahren angesetzt. Hierbei bekommt derjenige die Nutzung zugesprochen, der bereit ist, den höchsten Preis zu zahlen. [7]

Zu einem solchen Fall kam es erstmals Ende 2002 zwischen der privaten Nordwestbahn und der DB Reise und Touristik AG. Das vom EBA angesetzte Höchstpreisverfahren, bei dem die Nordwestbahn gewann, wurde vom Kölner Verwaltungsgericht zugunsten des DB Fernverkehrs aufgehoben. [8] Das derzeitige Vergabeverfahren ist weder wirtschaftlich effizient noch fördert es den Wettbewerb auf der Schiene.

Für die Analyse eines Trassenvergabeverfahrens, das auf einer kombinatorischen Auktion basiert, hat das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) das Projekt *Trassenbörse* initiiert. Dieses Projekt soll die Möglichkeiten und Anforderungen eines Marktes für Schienenkapazitäten untersuchen. Hierbei soll es den Eisenbahnverkehrsunternehmen ermöglicht werden, die gewünschten Trassen in einer *kombinatorischen Auktion*, die von einem unabhängigen Infrastrukturbetreiber geleitet wird, zu erwerben. Mittels mathematischer Optimierungsverfahren wird eine konfliktfreie, optimale Allokation der Trassen berechnet, die wirtschaftlich effizient ist. Das bedeutet, dass derjenige Verkehrsanbieter den Zuschlag erhält, der die höchste Zahlungsbereitschaft hat.

1 Einleitung

Konstruktionsauftrag										EVU	
Jahresfahrplan:		2001/02		gültig ab:		04.02.02		ZA:		Kd-Nr	
Bestellung Nr.:		vom:		Z-Nr.:		Status:		Studio:		Name	
ZugNr 84075		nach:		Z-Nr.:		X		Bestellung		Tel.:	
RLB		KDO						Abbestellung		Fax:	
Startflügelpl zu		Doppelflpl zu						Ankerung		E-Mail	
Zielflügelpl zu		Zug-Nr.:									
ab Bahnhof		Zug		VTS		Verkehrstage		Verkehrszeitraum		Zuständiger N-X-V1/2	
RLB		DFG		124 04		W(Sa)				N-N-V1 Ploen Tel: 930/1875	
										N-N-V2 Lau Intern: 935 48237	
VTS		ab Bahnhof		LZB		Ttz		Laer		Dauer-Lü KLV	
		C-E						Gl verB/H		P/G	
124 04		RLB		135		1199		75-95		P 700 100	
										P/C 53 P-964 C 383	
										NL Mitte He 11.01.02	
Fahrplan			Bestellung EVU			Angebot Gb Netz			Laer		
Bohls/Vsp von			bis			BR			ab		
Abic.		Bahnhof		an		Min-halt		ab		an ab Bemerkungen	
<p>120 50 Mie nach Ankunft 84079 in RLB Zwischen Lu-BASF und Lu-Oggersheim nächstmögliche Trasse rd 3 Std nach Anknf 84079. We 14.01.2002</p>											
R-B		Ludwigshafen BASF								16:42	
R-L		Ludwigshafen BASF								14:47	
R-O		Lu-hafen Oggersheim						16:53		17:15 Koptzsachen	
R-O		Lu-hafen Oggersheim						14:58		15:21 Koptzsachen	
FWOR		Worms Hbf								17:29 We 14.01.2002	
FWOR		Worms Hbf								15:36 We 06.02.02 (in Tr. 54059 8e)	
FMZ		Mainz-Hbf								18:28	
B-Uls								15:45		15:47 Ra 07.02.02	
FKBWG		Kaiserbrücke Ost								16:33 Ra 17.01.02	
RDKWB		Kaiserbrücke Ost								16:52	
		Oberrhein Gbf								19:49	
KOL G		Oberrhein Gbf								20:36 He 17.01.02	
		Linz (Rh)									
KLI		Linz (Rh)									
FMG		16:56/17:10									
FKOS		Ahrw. Kostheim								17:20	
KOL G		Oberrhein Gbf								18:57	
KLI		Linz (Rh)								19:39 He 11.02.02	
KJN		Unkel						19:49		19:48	
KGG		Grensb. Gbf								20:27 An 19.2.02	
KDO		Dormagen				19:00					

Bemerkungen Kunde

BR 185 mit 5,6 MW

Preisgünstigster Weg gewünscht.

Hinweise aus der Konstruktion:

Mbr NL West:
 Mbr NL Mitte: 70 P
 Mbr NL Südwest:

Bitte mit früherer Abfahrt von Ludwigshafen einen neuen Versuch starten. Lau 6.2.2002

Über KLI nicht fahrbar, neuer Anlauf über KRE. NL West, Ah, 19.02.
 Über KRE auch nicht fahrbar. NL Mitte, He 19.02.

Die TA ist in der NL West nicht zu trassieren. Z. Z. keine freien Kapazitäten in der Regelzugplanung. Lau

Kein Platz auf der Schiene: Die Trassenkonstruktion zeigt, dass es auf dem DB-Netz Flaschenhalse gibt. Noch nicht berücksichtigt ist hier die Entlastung durch die Neubaustrecke Köln-Frankfurt. Grafik: DB Netz

Abbildung 1.1: Konstruktionsauftrag der DB Netz AG [6]

1.2 Ziel der Diplomarbeit

Das Ziel dieser Diplomarbeit besteht darin eine kombinatorische Auktion als Mehr-Runden Auktion für die Vergabe von Trassenwünschen zu untersuchen. Dabei wird die Fahrplanallokation in jeder Runde der Auktion von dem OPTRA-Modul, das im Rahmen der Trassenbörse am Zuse-Institut Berlin entwickelt wurde und auf der Standardsoftware ILOG CPLEX basiert, übernommen. Zur Untersuchung der kombinatorischen Auktion soll ein Beispielgenerator implementiert werden, um realistische Trassenwünsche zu erzeugen, die von Eisenbahnverkehrsunternehmen in einer Auktion zur Trassenvergabe abgegeben werden könnten. Mit einem automatischen Auktionsmechanismus werden die Gewinner der eingereichten Trassenwünsche anhand ihrer Gebote beziehungsweise Zahlungsbereitschaften ermittelt. Es werden verschiedene Trassenszenarien entwickelt, um den Einfluss von bestimmten Schienenverkehrsträgern genauer untersuchen zu können. Die Auktionsergebnisse sollen nach Gesichtspunkten wie beispielsweise Einnahmen des Auktionators (Infrastrukturunternehmen), zu zahlende Kilometerpreise der Verkehrsträger und die Anzahl der allozierten Trassen analysiert und beurteilt werden.

Der Begriff der kombinatorischen Auktion und die damit zusammenhängende Gewinnerbestimmung wird in Kapitel 2 erläutert. Das mathematische Modell, die OPTRA-Allokation, und das darauf basierende Trassenvergabeverfahren des Projektes Trassenbörse ist Thema des 3. Kapitels. Für das Vergabeverfahren wird ein iterativer Auktionsmechanismus verwendet, der auf diskreten Runden basiert. Um das Auktionsverfahren zu automatisieren, wird ein bestimmtes Bieterverhalten vorausgesetzt. Die Objekte der Auktion sind die von den Eisenbahnverkehrsunternehmen eingereichten Trassenspezifikationen. Für die Generierung dieser Testszenarien wird ein modular implementiertes Tool verwendet, der Trassengenerator. Dieser Generator, der potentielle Trassenwünsche erzeugt, ist sehr flexibel gestaltet und bietet unter anderem vier verschiedene Verfahren für die Bestimmung der Trassenlinie. Der Entwicklung dieses Tools widmet sich Kapitel 4. Die Testszenarienerstellung ist auf verschiedene verkehrstechnische Aspekte ausgerichtet. Für die Untersuchung dieser Szenarien wurde der aktuelle Fahrplan als Referenzfahrplan gewählt. Dieser als Statusquo bezeichnete Fahrplan wird in Kapitel 5 zusammen mit der Generierung der Testszenarien behandelt. Die Testbeispiele definieren die Objektmenge der Auktion und enthalten außerdem die maximalen Zahlungsbereitschaften zu den eingereichten Trassen der Verkehrsanbieter. In Kapitel 6 werden die Ergebnisse der Szenarien im Umfeld der auktionbasierten Trassenvergabe tabellarisch wiedergegeben. Desweiteren wird versucht die Resultate zu interpretieren und mögliche Erklärungen für bestimmte Verhaltensweisen einiger Trassenarten anzugeben. Bei den Auktionssimulationen stellte sich unter anderem heraus, dass sich Trassen, die in der Planung sehr flexibel sind, leicht in einen bestehenden Fahrplan integrieren lassen (beispielsweise Gütertransporttrassen). Eine Zusammenfassung der Ergebnisse und ihre Einordnung in den Kontext einer kombinatorischen Auktion als Trassenvergabeverfahren schließt die Untersuchungen ab (Kapitel 7).

2 Kombinatorische Auktionen

Auktionsverfahren wurden in der vergangenen Zeit sehr populär. Im Internet entstanden zahlreiche Auktionshäuser wie Ebay und hood, die die verschiedensten Konsumartikel versteigern und sich großer Beliebtheit erfreuen. Auch in anderen Bereichen bedient man sich einer Auktion, wie beispielsweise bei der Versorgung mit Elektrizität, Gas oder Wasser. Flughafen-Landrechte und Telekommunikationsfrequenzen wurden ebenfalls auf diese Weise verkauft.

Auktionen basieren auf den abgegebenen Geboten, die abgesehen von Gebotsverzerrungen die Präferenzen der Bieter widerspiegeln. Die Gebote bestimmen maßgeblich die Allokation der Güter und die dafür zu zahlenden Preise am Auktionsende. Mit einem Auktionsverfahren können verschiedene Ziele verfolgt werden. Zum einen kann es hohe Einnahmen erzielen, zum anderen die wirtschaftliche Effizienz steigern, indem knappe Ressourcen an den Meistbietenden verkauft werden, der im Allgemeinen den höchsten Nutzen von dem Gut hat.

In [11] wird eine Kombinatorische Auktion als ein Verfahren beschrieben, bei dem gleichzeitig mehrere heterogene Objekte versteigert werden und die Käufer mit einem „alles oder nichts“-Gebot auf Objektbündel bieten können. Solche Kombinationsgebote sind sehr wichtig für Bieter, die ein Objektbündel höher bewerten als die Summe ihrer Bewertungen für die einzelnen Objekte, hierbei spricht man von Komplementaritäten. In einem solchen Fall können Gebotskombinationen die wirtschaftliche Effizienz der Auktion erhöhen. Angenommen, Gebote auf Objektbündel wären nicht erlaubt und es gibt einen Bieter, dessen Bewertung für das gesamte Bündel größer ist als die Summe der Einzelobjektbewertungen. Der Bieter müßte versuchen, jedes Objekt einzeln zu erwerben und würde Gefahr laufen, nicht alle Objekte zu bekommen oder höher als die eigene maximale Zahlungsbereitschaft für das Bündel zu bieten. Komplementaritäten treten beispielsweise in einer Auktion für Telekommunikationsfrequenzen bei benachbarten Gebieten auf. Genauso wie Komplementaritäten kann es in einer Auktion auch Substitutionalitäten geben. Dabei werden verschiedene Objekte als vollkommen ersetzbar betrachtet. Substitutionalitäten treten häufig bei Budget- oder Kapazitätsbeschränkungen auf.

2.1 Das Kombinatorische-Auktions-Problem CAP

Die Schwierigkeit einer Kombinatorischen Auktion besteht in der Bestimmung der gewinnenden Gebote. In einer nichtkombinatorischen Auktion wird für jedes Objekt das höchste abgegebene Gebot gewählt und der entsprechende Bieter erhält den Zuschlag für das

2.1 Das Kombinatorische-Auktions-Problem CAP

Objekt. In einer Kombinatorischen Auktion, in der die Summe der gewinnenden Gebote maximal sein soll, kann dieses einfache Verfahren nicht angewendet werden. Dazu ein Beispiel aus [11]. Die Objekte a, b und c stehen zum Verkauf und die höchsten Gebote für die Kombinationen $\{a\}, \{b\}, \{c\}, \{a, b\}, \{a, c\}, \{b, c\}, \{a, b, c\}$ sind entsprechend 1, 3, 2, 5, 5, 4, 6 Euro. Die Auktionseinnahmen sind maximal, wenn $\{b\}$ für 3 und $\{a, c\}$ für 5 Euro verkauft werden. Die höchsten Gebote der anderen Kombinationen können somit nicht gewinnen.

Diese Aufgabe der Gewinnerermittlung wird von de Vries und Vohra in [9] als Kombinatorisches-Auktions-Problem bezeichnet und untersucht.

Problem 1. Das Kombinatorische Auktionsproblem CAP.

Sei N die Menge der Bieter und M die Menge der m verschiedenen Objekte. Für jede Teilmenge $S \subseteq M$ bezeichnet $b^j(S)$ das Gebot von Bieter $j \in N$ für S und $b(S) = \max_{j \in N} b^j(S)$. Dann ist das Kombinatorische Auktionsproblem CAP durch folgendes IP definiert:

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{S \subseteq M} b(S)x_S & (2.1) \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{S \ni i} x_S \leq 1 & \forall i \in M \\ & x_S \in \{0, 1\} & \forall S \subseteq M \end{aligned}$$

Ist die Variable $x_S = 1$ bedeutet das, dass für die Menge S das höchste Gebot akzeptiert wird, während $x_S = 0$ aussagt, dass kein Gebot zugelassen wird. Die Ungleichung in 2.1 gewährleistet, dass kein Objekt aus M mehr als einmal vergeben werden kann.

Diese Formulierung beschreibt das CAP nur exakt, wenn die Objekte als Komplementaritäten betrachtet werden und die Gebotsfunktionen demzufolge superadditiv sind. Das heißt $b^j(A) + b^j(B) \leq b^j(A \cup B)$ für alle Bieter $j \in N$ und $A, B \subseteq M$, so dass $A \cap B = \emptyset$. Werden Güter als Substitutionalitäten betrachtet, gilt für mindestens einen Bieter $j \in N$ und $A, B \subseteq M$ $b^j(A) + b^j(B) > b^j(A \cup B)$. In diesem Fall kann eine optimale Lösung von 2.1 dem Bieter j die beiden Mengen A und B zuteilen und dafür fälschlicherweise die Einnahmen $b^j(A) + b^j(B)$ statt $b^j(A \cup B)$ verzeichnen. Eine Verwendung von sogenannten dummy-Gütern d kann dieses Problem umgehen. Die Objektmenge M wird um d erweitert zu $M \cup d$. Der Bieter muss seine Gebote entsprechend anpassen, $b^j(A)$, $b^j(B)$ und $b^j(A \cup B)$ werden ersetzt durch $b^j(A \cup d)$, $b^j(B \cup d)$ und $b^j(A \cup B)$. Da jedes Objekt nur höchstens einmal zugeteilt wird, so auch d , kann für Bieter j nur höchstens eins dieser Gebote realisiert werden. Eine weitere Möglichkeit, den Fall der Substitutionalität exakt wiederzugeben, ist eine andere Formulierung für das CAP zu wählen. Dazu sei $y(S, j)$ eine Binärvariable, die den Wert 1 annimmt, falls Bieter j die Teilmenge $S \subseteq M$ zugeteilt wird. Anderenfalls ist $y(S, j) = 0$. Diese Formulierung erhält die Bezeichnung CAP2 und ist durch das folgende IP gegeben.

2 Kombinatorische Auktionen

$$\begin{aligned}
 \max \quad & \sum_{j \in N} \sum_{S \subseteq M} b^j(S) y(S, j) & (2.2) \\
 \text{s.t.} \quad & \sum_{S \ni i} \sum_{j \in N} y(S, j) \leq 1 & \forall i \in M \\
 & \sum_{S \subseteq M} y(S, j) \leq 1 & \forall j \in N \\
 & y(S, j) \in \{0, 1\} & \forall S \subseteq M, j \in N
 \end{aligned}$$

CAP2 ist ebenso wie die erste Formulierung eine Instanz des Set-Packing-Problems (SPP). Das IP des SPP ist vielfach untersucht.

Problem 2. Set-Packing-Problem.

Sei M eine Menge von Elementen und V eine Menge von Teilmengen von M mit nicht negativen Gewichten. Finde die Teilmenge von V , die maximales Gewicht hat und deren Elemente paarweise disjunkt sind.

Für die IP-Formulierung sei c_j das Gewicht der j -ten Teilmenge in V . Die Binärvariable a_{ij} nimmt den Wert 1 an, falls das i -te Element von M in der j -ten Teilmenge von V enthalten ist. Die Variable $x_j = 1$ gibt an, dass die j -te Teilmenge ausgewählt ist, andernfalls ist $x_j = 0$. Damit kann das IP beschrieben werden mit

$$\begin{aligned}
 \max \quad & \sum_{j \in V} c_j x_j & (2.3) \\
 \text{s.t.} \quad & \sum_{j \in V} a_{ij} x_j \leq 1 & \forall i \in M \\
 & x_j \in \{0, 1\} & \forall j \in V.
 \end{aligned}$$

Wird als M die Menge der verschiedenen Objekte gewählt und ist V die Menge aller Teilmengen von M , stellt das CAP eine Instanz des SPP dar.

Lösen des CAP

Direkte Lösungsverfahren der Gewinnerbestimmung scannen im worst case jedes eingereichte Gebot. Die Anzahl dieser Gebote kann exponentiell in $|M|$ sein. Erfolgreiche Lösungsverfahren des CAP sind zum einen davon abhängig, dass die Anzahl der verschiedenen eingereichten Gebote nicht sehr groß oder geeignet strukturiert sind. Zum anderen muss das zugehörige SPP relativ schnell zu lösen sein. Das Set-Packing-Problem ist NP-schwer, das heißt, dass das zugehörige Entscheidungsproblem NP-vollständig ist. Für Probleme dieser Kategorie sind bisher keine effizienten Algorithmen bekannt. Dabei ist ein Algorithmus effizient, wenn die Anzahl der elementaren Operationen für alle Instanzen des Problems durch ein Polynom in der Kodierungslänge der Inputgrößen des Problems beschränkt werden kann. Der Algorithmus wird dann als polynomial bezeichnet. Trotzdem gibt es bestimmte Instanzen des SPP, die besondere Eigenschaften besitzen und in polynomialer Zeit gelöst werden können, beispielsweise wenn die zugehörige Matrix vollständig

unimodular ist. Weitere Fälle werden in [9] dargestellt. Allgemein können zur Lösung des SPP exakte Methoden wie die Lagrange-Relaxierung, Branch and Bound oder Schnittebenenverfahren herangezogen werden. Ein anderer Ansatz wäre, approximative Methoden zu benutzen.

Im Falle des Trassenvergabeverfahrens ist M die Menge der eingereichten Trassenwünsche der Eisenbahnverkehrsunternehmen und ist im Allgemeinen sehr groß. In der Literatur gibt es dazu verschiedene Versionen des CAP. Die in dieser Arbeit verwendete Formulierung des CAP wird in Kapitel 3.1.3 vorgestellt. Die Lösung dieses Problems basiert auf dem „Branch and CUT“-Verfahren der Standardsoftware ILOG CPLEX. In [10] wird ein Verfahren zur Lösung der Fahrplanerstellung beschrieben, das Lagrange-Relaxierung und Subgradientenverfahren verbindet. Die Autoren liefern ebenfalls den Beweis dafür, dass dieses Problem NP-schwer ist. Dazu wird das Max-Independent-Set-Problem polynomial auf das Problem der Fahrplanerstellung transformiert.

2.2 Auktionsdesign einer Kombinatorischen Auktion

Der Begriff Kombinatorische Auktion wird in [11] als ein Auktionsmechanismus erklärt, der den gleichzeitigen Verkauf mehrerer Objekte erzielt und „alles oder nichts“-Gebote zulässt. Das Design einer solchen Auktion wird zum einen von der Komplexität der Gewinnerbestimmung und zum anderen von Kooperationsmöglichkeiten zwischen den teilnehmenden Bietern beeinflusst [11]. Diese beiden Charakteristika unterscheiden eine Kombinatorische Auktion von anderen Auktionsmodellen. Die Komplexität der Gewinnerbestimmung ist in Kapitel 2.1 vorgestellt worden. Einen Anreiz zu kooperativem Handeln bietet die Kombinatorische Auktion aufgrund der verschiedenen Aufteilungen der Objekte in zulässige Allokationen. Bieter, die für eine beliebige Kombination von Objekten (außer der von allen Objekten) bieten, ziehen aus den hohen Geboten anderer Bieter für komplementäre Objektbündel Vorteile. Diese Kooperationsfähigkeit liegt in der Art der Gewinnerbestimmung begründet und trifft auf Nicht-Kombinatorische Auktionen nicht zu.

Allgemein müssen beim Design eines Auktionsmechanismus die Ziele der Bieter identifiziert und bestehende wirtschaftliche Aspekte, die das Bieterverhalten beeinflussen können, untersucht werden. Desweiteren liegt der Focus auf der Beantwortung folgender Fragen: Wer kann Gebote einreichen? Welche Gebote sind zugelassen (Art, Anzahlbeschränkungen)? Welches Auktionsverfahren soll genutzt werden? Wann terminiert die Auktion? Werden die Gebote verdeckt oder öffentlich eingereicht? Speziell für den hier zu behandelnden Kontext stellt sich außerdem die Frage, ob eine „use it or lose it“-Regel eingeführt werden sollte, um Monopolbildungen zu vermeiden, oder ob eine Möglichkeit zum Zurückziehen von Geboten zu gewährleisten ist.

Um die Probleme bei der Entwicklung eines Mechanismus zu einer Kombinatorischen Auktion in den Griff zu bekommen, muss oft ein Kompromiss aus den folgenden positiven Eigenschaften eines Auktionsverfahrens gefunden werden. Die folgenden Ausführungen sind [11] entnommen.

Erstrebenswerte Eigenschaften eines Auktionsmechanismus

Ein wünschenswertes Ziel beim Auktionsdesign ist die allokativen Effizienz, die erreicht wird, wenn die Allokation am Auktionsende der Zuteilung entspricht, die auf den maximalen Zahlungsbereitschaften der Bieter basiert. Da es bei einer Kombinatorischen Auktion schwierig ist, allokativen Effizienz zu erreichen, gibt es das Konzept der Gesamtwirtschaftlichen Effizienz. Hierbei werden die Auswirkungen der Auktionseinnahmen auf die wirtschaftliche Effizienz berücksichtigt. (Müssen beispielsweise fehlende Einnahmen durch Steuern kompensiert werden?) Desweiteren sind ein schneller Auktionsablauf und geringe Transaktionskosten, sowohl für die teilnehmenden Bieter als auch für den Auktionator, Ziele bei der Entwicklung eines Auktionsmechanismus. Außerdem sollte Transparenz, Gleichbehandlung und Sabotagesicherheit garantiert werden. Die Qualität der Allokation ist ebenfalls ein wichtiger Entscheidungspunkt. Aus Komplexitätsgründen kann es sinnvoll sein, ein Ergebnis zu akzeptieren, das nur leicht vom Optimum abweicht. Abschließend sei die Anreizkompatibilität erwähnt, die in der Literatur eine wichtige Rolle spielt. Bei dieser Eigenschaft handelt es sich um einen Auktionsmechanismus, der die Bieter dazu veranlasst, ihre wahren maximalen Zahlungsbereitschaften zu offenbaren [9].

2.3 Vorstellung einiger Verfahren

In der Literatur der Auktionstheorie werden verschiedene Auktionsverfahren untersucht und analysiert. Die wesentlichen Aspekte, anhand derer die einzelnen Verfahren untereinander verglichen werden, sind die Auktionseinnahmen und die Bieterstrategien. Mit Kombinatorischen Auktionen befasste sich die Fachliteratur erst seit ca. 20 Jahren und mit stetig wachsendem Interesse. Einige Verfahren für Kombinatorische Auktionen aus [11] werden im folgenden vorgestellt.

2.3.1 Single-Round-Auktionen

First Price (Sealed Bid) - Auktion

Es wird nur eine Runde durchgeführt. Alle Bieter müssen ihre Gebote bis zu einem festen Termin einreichen. Bei der Sealed-Bid-Variante werden diese verdeckt abgegeben. Basierend auf den Geboten werden die Gewinner bestimmt, die die Preise in Höhe ihrer Gebote für die erstandenen Objekte beziehungsweise Objektbündel zahlen.

Dieses Verfahren ist resistent gegenüber abgekarteten Verschwörungen, weil Verletzungen solcher Absprachen erst zu spät erkannt werden können. Zudem können Sealed-Bid-Auktionen die Bieterbeteiligung steigern. Beispielsweise könnte ein Bieter B_1 in dem Wissen, dass ein anderer in jedem Fall höher bietet, das Interesse an der Teilnahme verlieren. Der andere Bieter B_2 könnte jedoch in einer Sealed-Bid-Auktion sein Gebot aus Gier so niedrig ansetzen, dass er von Bieter B_1 überboten werden könnte, was die Teilnahme

wieder attraktiv macht. First-Price-Auktionen besitzen außerdem eine strategische Komplexität. Das bedeutet, dass ein Bieter, der seine wahre Zahlungsbereitschaft bietet, diese Information auch der Konkurrenz liefert. Transparenz wird gewährleistet, indem die Preise den abgegebenen Geboten entsprechen.

Vickrey-Clarke-Groves Mechanismus

Der Vickrey-Clarke-Groves Mechanismus ist die Verallgemeinerung der Vickrey-Auktion (1961) für die Versteigerung von Einzelobjekten. Der Ablauf dieses Verfahrens ist gleich dem der Single-Round-First-Price-Auktion. Jedoch bezahlen die Bieter hier nicht Preise in Höhe ihrer Gebote. Die sogenannten Vickrey-Preise ergeben sich für einen Gewinner aus seinem abgegebenen Gebot abzüglich des Wertes um den sich die Gesamteinnahmen der Auktion durch Abgabe der Gebote des Gewinners erhöht haben. Dies sei hier an einem Beispiel verdeutlicht. Versteigert werden die Objekte a und b . Die abgegebenen Gebote von Bieter 1 sind $\{a\}$: 10, $\{b\}$: 5, $\{a, b\}$: 15 und von Bieter 2 $\{a\}$: 1, $\{b\}$: 6, $\{a, b\}$: 12. Die Einnahmen werden maximiert, wenn Bieter 1 $\{a\}$ und Bieter 2 $\{b\}$ erhält. Der erste Bieter hat einen Betrag von 10 abzüglich 4 zu zahlen, da die Einnahmen ohne die Gebote von Bieter 1 einen Wert von 12 annehmen. Demzufolge zahlt Bieter 2 einen Betrag von $6 - 1 = 5$.

Begründet durch die Vickrey-Preise ergibt sich bei diesem Verfahren eine dominante Bieterstrategie, die wahren maximalen Zahlungsbereitschaften zu bieten. Dadurch wird in der Auktion allokativer Effizienz erreicht. Dieses Modell kommt in der Praxis nicht oft zur Anwendung. Für eine korrekte Berechnung der Vickrey-Preise muss jeder Bieter alle Objektkombinationen bewerten. Bei n Objekten gibt es $2^n - 1$ verschiedene Kombinationen.¹ Zum anderen kann die Aufdeckung der wahren Zahlungsbereitschaften geheime Wettbewerbsinformationen preisgeben. Außerdem muss zur Berechnung der Vickrey-Preise für jeden Bieter ein ganzzahliges Programm gelöst werden, das der Gewinnerbestimmung entspricht, ohne die Gebote des jeweiligen Bieters zu berücksichtigen. Ein weiteres Problem, das in der Literatur diskutiert wird, liegt in der Möglichkeit zu betrügen und damit die Vickrey-Preise zu beeinflussen. [11], [9]

2.3.2 Iterative Kombinatorische Auktionen

Dieses Auktionsformat ist das populärste in der Praxis. Es ist dadurch charakterisiert, dass die Bieter Gebote auf Objektkombinationen abgeben und in den nächsten Runden auf Gebote anderer Bieter reagieren können. Die Auktionseinnahmen sind monoton steigend. Die Auktion ist im Allgemeinen beendet, wenn keine neuen (höheren) Gebote abgegeben werden. Die wissenschaftliche Forschung liefert verschiedene Auktionsdesigns, entwickelt für verschiedene praktische Anwendungen, für theoretische Analyse oder als Verbesserungen

¹Werden einige Objektbündel nicht bewertet, kann dies Einfluss auf die Vickrey-Preise haben. Natürlich brauchen Bieter Kombinationen, die sie mit 0 bewerten, nicht einzureichen.

2 Kombinatorische Auktionen

oder Verallgemeinerungen bekannter Verfahren. Es werden kontinuierliche Verfahren und Verfahren, die auf diskrete Runden basieren, unterschieden. Dazu soll im folgenden je ein Vertreter beschrieben werden.

Adaptive User Selection Mechanismus – AUSM

Ein Verfahren ist der *Adaptive User Selection Mechanismus – AUSM*. In diesem kontinuierlichen Verfahren können die Bieter jederzeit Gebote einreichen. Die Berechnungsschwierigkeiten der Kombinatorischen Auktion liegen hier auf der Seite der Bieter. Sie entscheiden aufgrund ihrer Analysen und möglicher nicht erfolgreicher Gebote für komplementäre Objektbündel anderer Bieter über neu einzureichende Gebote und deren Höhe. Neue Gebote werden vom Auktionator akzeptiert, solange sich die Einnahmen vergrößern. Das Auktionsende wird vorab definiert. [12]

iBundle

Von Parkes wurde 1999 ein weiteres Verfahren, *iBundle*, entwickelt, das auf nichtlineare Preise (Bündelpreis \neq Summe der Einzelobjektpreise) basiert. Die Bieter können in jeder Runde auf Objektbündel bieten und Exklusive-ODER-Gebote abgeben. Der Auktionator bestimmt in jeder Runde eine vorläufige Allokation, indem das CAP gelöst wird und gibt Minimalpreise für Objektbündel an, deren Gebote nicht gewonnen haben. Zulässige neue Gebote müssen diese Minimalpreise übersteigen oder einmalig geringfügig kleiner sein². In der nächsten Runde behält der Auktionator die Preise der Objektbündel bei oder passt sie an, falls es Bieter gibt, die in der aktuellen Allokation keine Gewinner sind und ein zulässiges Gebot für das Bündel abgegeben haben. Der neue Preis ergibt sich aus dem Mindestinkrement und dem höchsten verlorenen Gebot des Objektbündels. Die Auktion terminiert, wenn in zwei aufeinanderfolgenden Runden dieselben Gebote abgegeben werden oder jeder Bieter ein Objektbündel gewinnt. Die zu zahlenden Preise am Auktionsende sind Gleichgewichtspreise. Die Allokation am Auktionsende ist effizient, falls alle Bieter die kurzfristige Best-Antwort-Bieterstrategie verfolgen und auf Objektbündel bieten, die ihren Nutzen zu den gegebenen Preisen maximieren. [9], [13]

Iterative Kombinatorische Auktionsverfahren mit nicht zu hohen Transaktionskosten für die Bieter sollten folgende wichtige Aspekte berücksichtigen: Exposure-Problem (Ineffizienzen bei Komplementaritäten und Substitutionalitäten, falls keine Paketgebote zulässig sind), Gebotssprache (Modellierung Kombinatorischer Gebote), Threshold-Problem (konkurrierendes Bieten von zwei Bietparteien bezüglich des selben Objektbündels³) und die damit zusammenhängende Bestimmung der minimalen Gebotsinkremente. Eine weitere Schwierigkeit besteht in der Komplexität der Kommunikation, die in der hohen Anzahl

²Die Gebote können einmalig zwischen Minimalpreis–Mindestinkrement und Minimalpreis liegen. Sie dürfen in den folgenden Runden jedoch nicht weiter erhöht werden.

³In der damit zusammenhängenden gemeinsamen Absprache, mit dem Ziel zu überbieten, ist auch das Trittbrettfahrerproblem zu finden

2.3 Vorstellung einiger Verfahren

an möglichen Kombinationen begründet ist. Seitens der Bieter müssen aus dieser Menge geeignete Objektpakete gewählt, bewertet und eingereicht werden. Der Auktionator muss alle Gebote bearbeiten und die Gewinner bekannt geben.

3 Das Projekt Trassenbörse als Anwendung einer Kombinatorischen Auktion im Schienenverkehr

Das Projekt Trassenbörse wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF 19M2019) gefördert und lief vom Dezember 2002 bis Februar 2004. Neben dem Zuse-Institut Berlin waren unter anderem das Fachgebiet für Wirtschafts- und Infrastrukturpolitik (WIP) der TU Berlin und das Institut für Land- und Seeverkehr, Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb der TU Berlin an dem Projekt beteiligt. Die Aufgabe bestand darin, mittels mathematischer Optimierung die Allokation von Bahntrassen bei Gleichbehandlung aller Anbieter von Personen- und Güterverkehr zu untersuchen. In einem Auktionsverfahren soll über die Gebote der Eisenbahnverkehrsunternehmen ein konfliktfreier und effizienter Fahrplan gewonnen werden, der die Einnahmen des Netzbetreibers maximiert. Die Schwierigkeit liegt hauptsächlich in der Größe des Problems, da es deutschlandweit täglich über 35.000 Zugfahrten gibt. Außerdem bestehen zwischen den Trassenanfragen sehr starke Abhängigkeiten, begründet durch die hohen Sicherheitsanforderungen im Eisenbahnverkehr.

Das Ziel dieses Projektes besteht darin, den Wettbewerb auf der Schiene zu erhöhen und allen Eisenbahnverkehrsunternehmen gleichen Zutritt zum Infrastrukturnetz zu ermöglichen. Nicht zuletzt soll eine wirtschaftlichere Verteilung der Trassen auf die EVUs erreicht werden. Die Trassenallokation soll in einer effizienten Weise erfolgen, die die Wohlfahrt¹ maximiert. Das bedeutet, dass in einem Konfliktfall derjenige Bieter den Zuschlag für seinen Trassenwunsch erhalten soll, der den höchsten Nutzen davon hat. Unter der Annahme, dass sich die Nutzenniveaus der Bieter in den Zahlungsbereitschaften widerspiegeln, kann die Maximierung der Wohlfahrt durch ein Auktionsverfahren (beispielsweise Vickrey-Clarke-Groves-Mechanismus) erreicht werden, in dem die Konflikte infolge von Gebotserhöhungen gelöst werden.

3.1 Mathematische Modellierung – OPTRA-Modell

Während der Projektpartner WIP die Aufgabe übernimmt, einen geeigneten Auktionsmechanismus zu erstellen, wurde am Zuse-Institut das OPTRA(Optimal Track Allocation)-Modell entwickelt. Basierend auf den abgegebenen Geboten der Eisenbahnverkehrsun-

¹Wohlfahrt ist ein Begriff aus der Volkswirtschaftslehre. Die Wohlfahrtsfunktion ist eine reelle Funktion, die positiv von den Nutzenniveaus der beteiligten Gesellschaftsmitglieder abhängt. Siehe auch [16].

ternehmen erstellt dieses Modul ein ganzzahliges Programm und berechnet die Allokation der Trassenwünsche in jeder Auktionsrunde. Die Optimierung basiert zur Zeit auf der Standardsoftware ILOG CPLEX. Angewendet auf die im Allgemeinen geheimen maximalen Zahlungsbereitschaften der Verkehrsanbieter liefert die OPTRA-Allokation den ökonomisch optimalen Fahrplan. Zu beachten ist, dass die Objekte in der Auktion nicht von vornherein feststehen, sondern erst durch die Abgabe der Trassenwünsche durch die EVUs konkretisiert werden. Die Entwicklung des OPTRA-Moduls hatte drei Aufgaben zu erfüllen: Erstens die Modellierung des Eisenbahnnetzes und des Bahnbetriebs, zweitens die Modellierung des Gutes der Trassenbörse, um drittens ein ganzzahliges Programm mit dem Ziel der Einnahmenmaximierung zu formulieren. Die beiden ersten Aspekte werden gemäß [15] im Folgenden beschrieben. Die Formulierung des ganzzahligen Programms stützt sich nur begrenzt auf die Beschreibungen in [15]. Im Rahmen dieser Diplomarbeit wird die OPTRA-Version 62 verwendet. Die Ausführungen in [15] beziehen sich auf eine neuere Version von OPTRA. Die folgenden Beschreibungen werden an den gegebenen Stellen auf die verwendete OPTRA-Version angepasst.

3.1.1 Modellierung des Bahnnetzes und des Bahnbetriebs

Bei der Modellierung des gesamten Bahnnetzes und Bahnbetriebs wird man mit einer Vielfalt an Informationen konfrontiert. Aus bahntechnischer Sicht müssen Komponenten wie Zugtypen, Geschwindigkeiten der Züge, Geschwindigkeitsbeschränkungen auf den Gleisen, Sicherheitsabstände et cetera berücksichtigt und detailgenau modelliert werden. Für die Anwendung eines mathematischen Optimierungsverfahrens wird jedoch ein einfaches Modell benötigt. Werden bestimmte Aspekte allerdings zu stark vereinfacht, leidet die Qualität des Ergebnisses. Folglich wurden in das Modell vorerst nur die wesentlichen Komponenten integriert und Möglichkeiten für Erweiterungen offengehalten.

Das Bahnnetz wird als gerichteter Graph $G = (V, E)$ repräsentiert. Dabei entsprechen die Knoten den Bahnhöfen und die Kanten den Gleisen mit Fahrtrichtung. Das bedeutet, dass ein Gleisabschnitt zwischen zwei benachbarten Bahnhöfen, der in beiden Richtungen befahren werden kann, im Graphen zwei entgegengesetzt gerichteten Kanten entspricht. Ein Gleisabschnitt, der nur in einer Richtung befahrbar ist, erzeugt im Graphen demzufolge nur eine Kante, die in Fahrtrichtung zeigt. Die Knotenmenge von G sei mit V und die Kantenmenge mit E bezeichnet. Im Rahmen der Modellierung wurde das Bahnnetz auf ein Teilnetz beschränkt, das sich von Hannover-Braunschweig bis Fulda erstreckt (Abbildung 3.1). Dieses Netz ist allgemeingültig und enthält außerdem wesentliche Besonderheiten wie den Zwei-Richtungsbetrieb auf eingleisigen Streckenabschnitten. Für die Modellierung des Bahnbetriebs wurde ein diskretes Zeitmodell gewählt, wobei eine Zeiteinheit der Dauer von einer Minute entspricht.

Als Zugtypen sind sechs verschiedene Arten vorgesehen, der Intercityexpress: ICE, der Intercity: IC, der Regionalexpress: RE, die Regionalbahn: RB, die S-Bahn: SB und der Intercargo: ICG. Jeder Zugtyp ist durch eine konkrete Zugbaureihe und ein Weg-Zeit-Diagramm für jede Kante des Graphen G charakterisiert. Das Weg-Zeit-Diagramm eines

3 Trassenbörse als Anwendung einer Kombinatorischen Auktion

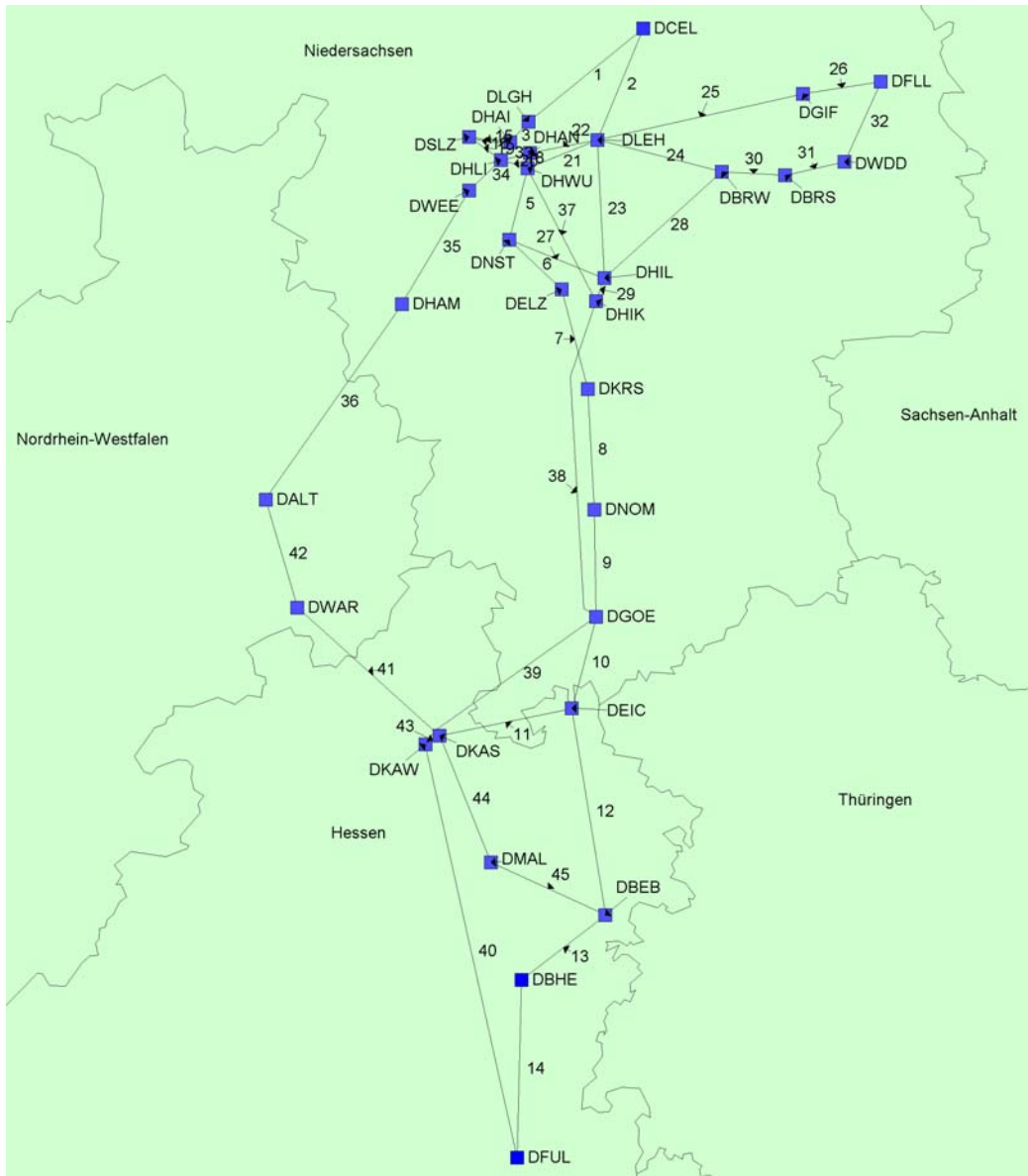


Abbildung 3.1: Bahnnetz Hannover-Braunschweig-Fulda.

bestimmten Zugtyps zu einer Kante $e \in E$ beschreibt die Fahrt von Zügen diesen Typs auf dieser Kante. Dabei wird in den Diagrammen an den Kantenendpunkten von stehenden Zügen ausgegangen. Auf mögliche Durchfahrten der Bahnhöfe wurde aufgrund der angestrebten Komplexitätsreduktion verzichtet, denn dadurch würde die Anzahl der Weg-Zeit-Diagramme pro Kante um das vierfache steigen. Für jeden der beiden Kantenendpunkte gäbe es dann die Möglichkeit Stand und Durchfahrt. Die sicherheitsbedingten Zugfolgezeiten würden für jede Kante sogar um das sechzehnfache vergrößert werden, denn statt sechs verschiedenen Fahrweisen (Zugtypen), müssten 24 verschiedene Fahrweisen miteinander kombiniert werden. Die Menge der Zugtypen wird mit Y bezeichnet. Basierend auf den Zugbaureihen läßt sich eine Hierarchie von Zugtypen erstellen. Ein Zugtyp y_1 ist *größer gleich* einem Zugtyp y_2 , wenn sich die dem Zugtyp y_1 zugrundeliegende Zugbaureihe wie die dem Zugtyp y_2 zugrundeliegende Zugbaureihe verhalten kann. Zum Beispiel kann ein ICE seine Geschwindigkeit reduzieren und wie der Zugtyp IC fahren, folglich ist ein ICE größer gleich einem IC. Desweiteren ist in der Hierarchie festgelegt, dass der Regionalexpress größer gleich der Regional- und S-Bahn ist.

Für die Modellierung des Bahnbetriebs werden Kantenattribute für jede Kante von G verwendet. Dazu gehört zum einen die Fahrzeit für jeden Zugtyp und zum anderen die Zugfolgezeiten für jedes Paar an Zugtypen. Darüber hinaus werden auch Zugfolgezeiten für verschiedene Kanten von G definiert. Dies ist notwendig für den Zwei-Richtungsbetrieb auf eingleisigen Strecken und für das höhengleiche Kreuzen des Gegengleises wie es bei der Hildesheimer Kurve vorkommt. Die Fahrzeit eines Zuges vom Typ $y \in Y$ durch das Gleis $e \in E$ wird mit $Fz(e, y)$ bezeichnet. Die Zugfolgezeit $Zz(e, y_1, y_2)$ für Zugtypen $y_1, y_2 \in Y$ auf dem Gleis $e \in E$ gibt die zeitliche Differenz an, die ein Zug vom Typ y_2 , der nach einem Zug vom Typ y_1 in die Kante e einfährt, mindestens zu diesem einhalten muss. Sie setzt sich zusammen aus der betrieblichen Mindestzugfolgezeit und einem planerischen Puffer, der zur Stabilisierung des Bahnbetriebs bei zufällig auftretenden Verspätungen beiträgt. Für jede Kante werden die Fahrzeiten in einem Vektor, der mit den Zugtypen indiziert ist, und die Zugfolgezeiten in einer Matrix, deren Zeilen und Spalten ebenfalls mit den Zugtypen indiziert sind, dargestellt. Außerdem werden die Besonderheiten der Hildesheimer Kurve (der Hochgeschwindigkeitsstrecke Göttingen-Hannover) und der Zwei-Richtungsbetrieb auf eingleisigen Streckenabschnitten berücksichtigt. Die beschriebenen Daten, wie den Graphen $G = (V, E)$, die Menge der Zugtypen Y , die Fahr- und Zugfolgezeiten lieferte der Projektpartner FG Schienenfahrwege und Bahnbetrieb der TU Berlin.

Um auch das Halten eines Zuges an einem Bahnhof zu berücksichtigen, wurde der Graph $G = (V, E)$ durch eine Schlinge an jedem Knoten $v \in V$ erweitert. Die Fahrzeiten dieser zusätzlichen Kanten betragen eine Zeiteinheit und die Zugfolgezeiten zu allen Paaren von Zugtypen erhalten entsprechend den Wert null. Das Durchfahren einer solchen Kante ist gleichzusetzen mit dem Halten am zugehörigen Bahnhof für eine Zeiteinheit. Der so entstandene Graph wird mit $G' = (V, E')$ bezeichnet. Damit kann der azyklische, zeitexpandierte Zustandsgraph $H = (V_H, E_H)$ definiert werden.

3 Trassenbörse als Anwendung einer Kombinatorischen Auktion

Definition 3.1. Zustandsgraph $H = (V_H, E_H)$.

Die Knotenmenge des Zustandsgraphen V_H ergibt sich aus dem Kartesischen Produkt von V und der Zeitachse \mathbb{Z}

$$V_H = V \times \mathbb{Z}.$$

Die Kantenmenge E_H besteht aus gerichteten, gefärbten Kanten. Dabei entsprechen die Farben den unterschiedlichen Zugtypen. Zwischen zwei beliebigen Knoten (v_1, t_1) und (v_2, t_2) von H , mit $t_1 \leq t_2$, existiert genau dann eine Kante der Färbung $y \in Y$, wenn

$$e = (v_1, v_2) \in E' \quad \text{und} \quad t_2 - t_1 = Fz(e, y).$$

Die Kante ist entlang der Zeitachse von (v_1, t_1) nach (v_2, t_2) gerichtet.

Anhand des Zustandsgraphen H kann der Begriff *Trasse* definiert werden.

Definition 3.2. Trasse.

Eine Trasse des Zugtyps y ist ein Pfad im Zustandsgraphen H , auf dem jede Kante die Färbung des Zugtyps y oder gemäß der Hierarchie eines Zugtyps, der kleiner gleich y ist, besitzt. Der Pfad einer Trasse sei mit $P = (e_1, \dots, e_n)$ bezeichnet, wobei $e_i \in E_H$ für alle $i = 1, \dots, n$.

Die Untersuchung, ob zwei Trassen im Zustandsgraphen H bezüglich der sicherheitsbedingten Zugfolgezeiten miteinander in Konflikt stehen, ist bahntechnisch für die Erstellung eines Fahrplans bedeutend. Dazu wird im Folgenden ein Konflikt zwischen Kanten im Zustandsgraphen H definiert.

Definition 3.3. Konflikt.

Zu zwei Kanten $e = ((v_1, s_1), (v_2, s_2)) \in E_H$ und $f = ((w_1, t_1), (w_2, t_2)) \in H$, deren Färbungen den Zugtypen $y_e, y_f \in Y$ entsprechen, seien die zugehörigen Kanten im zugrundeliegenden Graphen G' mit g_e und g_f bezeichnet. Dann stehen e und f genau dann miteinander in Konflikt, wenn

- $g_e = g_f$ und $-Zz(g_e, y_f, y_e) + 1 \leq t_1 - s_1 \leq Zz(g_e, y_e, y_f) - 1$, oder
- g_e und g_f die entgegengesetzt gerichteten Kanten eines eingleisigen Streckenabschnittes im Zwei-Richtungsverkehr beschreiben und die zugehörigen Zugfolgezeiten verletzt sind, oder
- g_e und g_f vom höhengleichen Kreuzen des Gegengleises betroffene Kanten sind und die zugehörigen Zugfolgezeiten verletzt sind.

Mit der Definition eines Konfliktes zwischen zwei Kanten im Zustandsgraphen H , kann ein Konflikt zwischen zwei Trassen erklärt werden.

Definition 3.4. Trassenkonflikt.

Zwei Trassen im Zustandsgraphen H mit den Zugtypen y_1, y_2 und den zugehörigen Pfaden P_1 und P_2 stehen genau dann miteinander in Konflikt, wenn es mindestens ein Paar Kanten e, f mit $e \in P_1$ und $f \in P_2$ gibt, dass einen Konflikt bildet.

Mit diesen Definitionen kann das Problem der optimalen Fahrplanerstellung formuliert werden.

Definition 3.5. Fahrplan.

Ein Fahrplan ist eine Menge von Trassen, die paarweise konfliktfrei sind.

Problem 3. Optimal-Track-Allocation-Problem (OPTRA).

Sei H der Zustandsgraph zu einem unterliegenden Bahnnetz. Gegeben ist eine Menge T von Trassen in H mit Bewertungen $p : T \rightarrow \mathbb{R}$. Finde einen Fahrplan mit maximalem Wert.

Im weiteren wird statt der diskreten Zeitachse \mathbb{Z} ein diskretes Zeitintervall betrachtet. Die OPTRA-Modellierung beschränkt sich vorerst nur auf die wesentlichen Aspekte im Bahnverkehr. Weitere bahntechnische Faktoren, die in das Modell integriert werden könnten, wären beispielsweise die Kapazitäten der Bahnhöfe und betriebliche Kenngrößen.

3.1.2 Das Gut der Trassenbörse

In der im Rahmen der Trassenbörse durchzuführenden Auktion bestimmen die EVUs die Objekte der Auktion durch Abgabe von Trassenwünschen. Zu klären bleibt die Modellierung dieser Trassengebote beziehungsweise Trassenwünsche. Zum einen soll es den Eisenbahnverkehrsunternehmen ermöglicht werden, in ihrem Trassenwunsch sovieler wirtschaftlich relevante Details zu integrieren wie möglich. Auf der anderen Seite muss die Spezifikation eines Trassengebots jedoch auch einfach und leicht zu generieren sein, ohne wirklich jede „Weiche“ genau angeben zu müssen. Die Angabe von zu detailgenauen und umfangreichen Geboten würde die EVUs eher abschrecken. [17]

Ein Trassengebot wird demzufolge spezifiziert durch

- Zugtyp und eindeutige Zugnummer
- Start- und Endbahnhof
- gewünschte Abfahrtszeit und geschätzte Fahrtdauer
- Basisgebot

Ein Trassenwunsch könnte beispielsweise lauten: Ein ICE mit der Zugnummer 10001 fährt von Hannover nach Fulda, startet um 10:00 Uhr und benötigt 80 Minuten. Als Basisgebot wird ein Wert von 1000 € gewählt. Eine derart spezifizierte Trasse kann im Zustandsgraphen H mehreren verschiedenen Pfaden entsprechen. Für eine genauere Eingrenzung dieser Pfade gibt es die Möglichkeit, Zwischenhalte zu formulieren. Diese müssen charakterisiert werden durch die Zugnummer, den Haltebahnhof, die Haltanfangs- und Haltendzeit, etwa der Zug mit der Nummer 10001 hält in Göttingen von 10:35 Uhr bis 10:37 Uhr.

3 Trassenbörse als Anwendung einer Kombinatorischen Auktion

Außerdem ist es den EVUs ermöglicht worden, mit dem Trassengebot eine zeitliche Flexibilität anzugeben. Diese Flexibilität identifiziert die spezifizierten Trassen im Zustandsgraphen H auch mit zeitlich (bezüglich der Abfahrtszeit oder den Zwischenhaltezeiten) nach hinten verschobenen Pfaden. Auf diese Weise kann bei der Abgabe eines Trassenwunsches die Gefahr eines Konfliktes mit anderen Zügen reduziert werden. Durch Angabe einer Gebotsabweichung können die gewünschten Zeiten wie Abfahrtszeit und Fahrtdauer innerhalb der Flexibilität beeinflusst werden. Das bedeutet, dass bei einer gegebenen Flexibilität eine gewisse Verschiebung der Abfahrtszeit in Kauf genommen wird, aber je größer diese Verschiebung ist, desto geringer wird der Gebotsbetrag. Pro Minute, die sich die Abfahrtszeit nach hinten verschiebt, wird ein Betrag in Höhe der angegebenen Gebotsabweichung vom Basisgebot abgezogen. Auf ähnliche Weise wird die Fahrtdauer beeinflusst. Das Basisgebot bekommt eine Erhöhung, falls die realisierte Fahrzeit kürzer ist als die geschätzte und anderenfalls einen Abzug, Genaueres in Kapitel 3.1.3. Der Gebotsbetrag, der sich aus dem Basisgebot unter Berücksichtigung von Verschiebung und Streckung der Trasse ergibt, kann als Bewertung der Trasse im Sinne der Formulierung des Trassenallokationsproblems (OPTRA) angesehen werden. Das Basisgebot und die Gebotsabweichung müssen nicht notwendigerweise positiv sein. Dies macht vorerst nur bei Kombinationsgeboten Sinn, da die Summe der Einnahmen des Infrastrukturbetreibers maximiert wird. Ein einzelnes Trassengebot mit negativem Basisgebot würde aufgrund der Maximierung nicht berücksichtigt werden. Außerdem könnten negative Gebote durch Subventionen erklärt werden, jedoch muss dieser Fall erst noch modelliert werden. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden ausschließlich nicht negative Gebote verwendet.

Aus auktionstechnischer Sicht kann der Bietprozess durch Kombinationsgebote vereinfacht werden. Dies ist im Falle von Komplementaritäten und Substitutionalitäten besonders wichtig. Dazu können mehrere Zugnummern zu einem Paket zusammengefasst werden. Für ein solches Paket kann ein *UND-Gebot* eingereicht werden. Es werden entweder alle Zugnummern aus dem Paket in den Fahrplan aufgenommen oder keine. Dadurch können zum Beispiel Taktverkehre formuliert werden. Weitere Kombinationsgebote sind denkbar, aber in der verwendeten OPTRA-Version noch nicht implementiert, beispielsweise *ODER-Gebote*. Hierbei darf höchstens eine Zugnummer aus dem Paket in den Fahrplan aufgenommen werden.

3.1.3 Das ganzzahlige Programm

An dieser Stelle wird das ganzzahlige Programm für die Erstellung eines Fahrplans mit maximalem Wert beschrieben, das auf der Menge der von den EVUs abgegebenen Trassenwünsche basiert. Es folgt zunächst eine Zusammenstellung der benötigten Größen. Mit R sei die Menge der Zugnummern aller Trassenwünsche bezeichnet. Mit Y wird die Menge der Zugtypen notiert. Weiter sei $G = (V, E)$ der gerichtete Graph, der das Bahnnetz repräsentiert und $G' = (V, E')$ der um die Schlingen an jedem Knoten erweiterte Graph. Der zeitliche Rahmen ist gegeben durch die diskreten Zeitpunkte $H = \{1, \dots, h\}$. Eine Zeiteinheit entspricht der Dauer von einer Minute. Es muss gewährleistet sein, dass die

Zeitpunkte der frühesten Abfahrt und der spätesten Ankunft aller Trassenwünsche in H enthalten sind.

Die eingereichte Trassenspezifizierung für einen Zug der Nummer $r \in R$ ist durch folgende Daten gegeben: Zugtyp y_r , Startbahnhof d_r , gewünschte Abfahrtszeit t_r , Endbahnhof a_r , Gebotsbetrag b_r , geschätzte Fahrtdauer z_r , Gebotsabweichung w_r , Flexibilität f_r und die Trassenlinie $L_r = \{l_1^r, \dots, l_{n_r}^r\}$. Diese Knotenmenge enthält die geordneten Bahnhöfe, an denen der Zug auf der Fahrt der Reihe nach halten soll. Folglich ist n_r die Anzahl der spezifizierten Halte im Trassenangebot. Für den ersten und letzten Bahnhof gilt $l_1^r = d_r$, $l_{n_r}^r = a_r$. Alle anderen Bahnhöfe der Trassenlinie werden als Zwischenhalte bezeichnet. Außerdem wird mit $Fz(e, y)$ die Fahrzeit eines Zuges vom Typ y auf der Kante e bezeichnet. Die maximale Abweichung von der Wunschstartzeit und die maximale Verlängerung der Fahrtdauer des Zuges r ist durch q_r gegeben, $q_r = \lceil \frac{f_r}{2} \rceil$.

Das ganzzahlige Programm wird als Mehrgüter-Flussproblem mit Set-Packing-Bedingungen formuliert, wobei die einzelnen Trassen den unterschiedlichen Gütern mit Bedarfswert eins entsprechen. Die Quelle und Senke eines Trassengebots sind durch den Start- und Endbahnhof gegeben. Die Schwierigkeit der Fahrplanallokation besteht darin, dass Trassen untereinander in Konflikt stehen können. Diese Konflikte verursachen die SPP-Bedingungen im IP. Folglich kann nur eine Teilmenge aller Trassenwünsche realisiert werden.

Zwei Binärvariablen beschreiben die Zugfahrt im Bahnnetz. Die Variable \bar{x} modelliert die Einfahrt in die Gleisabschnitte (Kantenmenge E) und die Variable \hat{x} repräsentiert das Halten in einem Bahnhof, beziehungsweise das einmalige Durchfahren der zugehörigen Schlinge. Diese Variablen entsprechen den Kanten im Zustandsgraphen H .

$$\bar{x}(r, y, e, t) = \begin{cases} 1 & : \text{ Der Zug mit der Nummer } r \text{ vom Typ } y \\ & \text{fährt zur Zeit } t \text{ in die Kante } e \text{ ein,} \\ 0 & : \text{ sonst.} \end{cases}$$

für alle $r \in R, y \in Y, e \in E, t \in H$.

$$\hat{x}(r, v, t) = \begin{cases} 1 & : \text{ Der Zug mit der Nummer } r \text{ hält im Bahnhof } v \\ & \text{zum Zeitpunkt } t \text{ für eine Zeiteinheit,} \\ 0 & : \text{ sonst.} \end{cases}$$

für alle $r \in R, v \in V, t \in H$.

Außerdem werden Variablen für die Abfahrt, die Ankunft und die Aufnahme in den Fahrplan benötigt. Sie sind ebenfalls Binärvariablen und im folgenden mit s , a und x bezeichnet.

$$s(r, t) = \begin{cases} 1 & : \text{ Der Zug mit der Nummer } r \text{ startet zum Zeitpunkt } t \text{ in } d_r, \\ 0 & : \text{ sonst.} \end{cases}$$

für alle $r \in R, t \in H$.

3 Trassenbörse als Anwendung einer Kombinatorischen Auktion

$$a(r, t) = \begin{cases} 1 & : \text{ Der Zug mit der Nummer } r \text{ beendet seine Fahrt zur Zeit } t \text{ in } a_r, \\ 0 & : \text{ sonst.} \end{cases}$$

für alle $r \in R, t \in H$.

$$x_r = \begin{cases} 1 & : \text{ Der Zug mit der Nummer } r \text{ wird in den Fahrplan aufgenommen,} \\ 0 & : \text{ sonst.} \end{cases}$$

für alle $r \in R$.

Die *Flusserhaltungsgleichungen* des Mehrgüter-Flussproblems ebenso die Bedingungen der Zwischenhalte lassen sich in den beschriebenen Variablen formulieren. Dabei sind die Ankunfts- und Abfahrtszeiten eines Zuges r für den Zwischenhalt $v \in L_r \setminus \{d_r, a_r\}$ mit $t_{v,1}^r$ und $t_{v,2}^r$ bezeichnet.

Für die EVUs besteht die Möglichkeit Kombinationsgebote abzugeben. Das heißt, sie können Gebote formulieren, indem sie mehrere Zugnummern zusammenfassen und entweder alle Züge dieser Gruppe gewinnen möchten oder keinen. Diese als UND-Gebot spezifizierten Bündel werden mit R_j bezeichnet, wobei $j = 1, \dots, T$ und T die Anzahl aller UND-Gebotsgruppen (Takte) ist.

Um einen reibungslosen Schienenverkehr zu ermöglichen, muss der generierte Fahrplan frei von Zugkonflikten sein. Dazu werden die einzelnen Konfliktmengen C betrachtet. Diese enthalten die Variablen $x[r_i, y_i, e_i, t_i]$ für $i = 1, \dots, |C|$, deren zugehörige Zugbewegungen paarweise in Konflikt stehen. Von allen Variablen in C kann nur höchstens eine den Wert eins annehmen. Die Menge der Konfliktmengen wird mit \mathcal{C} notiert. Zur Konflikterkennung gibt es mittels den Zugfolgezeit-Matrizen der Kanten, die die komplette Sicherungstechnik modellieren, ein einfaches Kriterium (siehe 3.3 auf Seite 18).

Wird eine Trasse in den Fahrplan aufgenommen, so ist der damit zusammenhängende Gebotsbetrag p_r verbindlich und muss vom zugehörigen Verkehrsanbieter an das Infrastrukturunternehmen entrichtet werden. Dieser Betrag setzt sich aus dem Basisgebot b_r , das bei der Trassenspezifikation eingereicht wird und der Anpassung bei möglicher Trassenverschiebung beziehungsweise Trassenstreckung zusammen.

$$p_r = b_r - w_r \nu_r - w_r \mu_r \tag{3.1}$$

Mit $\nu_r \geq 0$ ist die Verschiebung der Abfahrtszeit im Rahmen der angegebenen Flexibilität bezeichnet. Die Differenz von realisierter Fahrdauer und der geschätzten Fahrzeit in der Trassenspezifikation beschreibt μ_r . Für positive Werte von μ_r verringert sich der Gebotsbetrag, während er sich für negative Werte, bei denen die realisierte Fahrdauer kürzer ist als die geschätzte, erhöht. Mittels der Gebotsvariablen lassen sich die Einnahmen des Netzbetreibers (Auktionators) bestimmen und die Zielfunktion des ganzzahligen Programms formulieren. Das IP für die Allokation eines einnahmenmaximalen Fahrplans aus den eingereichten Trassenwünschen wird im folgenden dargestellt.

$$\max \sum_{r \in R} p_r x_r \quad (3.2)$$

subject to

$$\sum_{\substack{e \in \delta^+(v) \\ y \in Y}} \bar{x}(r, y, e, t) + \hat{x}(r, v, t) = \sum_{\substack{f \in \delta^-(v) \\ y \in Y}} \bar{x}(r, y, f, t - Fz(y, f)) + \hat{x}(r, v, t - 1) \\ \forall r \in R, v \in V \setminus \{d_r, a_r\}, t \in H \quad (3.3)$$

$$s(r, t) = \sum_{\substack{e \in \delta^+(d_r) \\ y \in Y}} \bar{x}(r, y, e, t) \\ \forall r \in R, t \in \{t_r, t_r + 1, \dots, t_r + q_r\} \quad (3.4)$$

$$a(r, t) = \sum_{\substack{f \in \delta^-(a_r) \\ y \in Y}} \bar{x}(r, y, f, t - Fz(y, f)) \\ \forall r \in R, t \in H_{Ank} \quad (3.5)$$

$$\sum_{t=t_{v,1}^r}^{t_{v,2}^r+q_r-1} \hat{x}(r, v, t) \geq (t_{v,2}^r - t_{v,1}^r) x_r \quad \forall r \in R, v \in L_r \setminus \{d_r, a_r\} \quad (3.6)$$

$$x_{r_1^j} = x_{r_i^j} \quad \forall j = 1, \dots, T \text{ und } i = 1, \dots, |R_j| \quad (3.7)$$

$$\sum_{i=1}^{|C|} \bar{x}(r_i, y_i, e_i, t_i) \leq 1 \quad \forall C \in \mathcal{C} \quad (3.8)$$

$$x_r \in \{0, 1\} \quad \forall r \in R \quad (3.9)$$

$$\bar{x}(r, y, e, t) \in \{0, 1\} \quad \forall r \in R, y \in Y, e \in E, t \in H \quad (3.10)$$

$$\hat{x}(r, v, t) \in \{0, 1\} \quad \forall r \in R, v \in V, t \in H \quad (3.11)$$

$$a(r, t) \in \{0, 1\} \quad \forall r \in R, t \in H \quad (3.12)$$

$$s(r, t) \in \{0, 1\} \quad \forall r \in R, t \in H \quad (3.13)$$

$$p_r \in \mathbb{Z} \quad \forall r \in R \quad (3.14)$$

3 Trassenbörse als Anwendung einer Kombinatorischen Auktion

Maximiert wird die Summe der Gebote der in den Fahrplan aufgenommenen Trassen. Die Flusserhaltungsgleichungen in allen Knoten des Graphen G beschreiben die Ungleichungen in (3.3) bis (3.5). Für einen beliebigen Zug mit der Nummer r und einen beliebigen Bahnhof $v \in V$ muss zu jedem Zeitpunkt $t \in H$ die Flusserhaltungsgleichung in v erfüllt sein, egal ob der Zugtyp von r der spezifizierte Typ oder ein der Hierarchie entsprechender Zugtyp ist. Falls v weder Abfahrts- noch Ankunftsbahnhof von r ist, muss folgender Zusammenhang gelten: Hält der Zug r zum Zeitpunkt t in v für eine Zeiteinheit oder verläßt er den Bahnhof über eine Kante $e \in \delta^+(v)$, dann muß er entweder eine Zeiteinheit zuvor in v gehalten haben oder gerade über ein Kante $f \in \delta^-(v)$ in v angekommen sein. Die Kantenmenge $\delta^+(v)$ enthält alle zu v inzidenten Kanten, deren Anfangsknoten v ist. Entsprechend umfasst $\delta^-(v)$ alle zu v inzidenten Kanten mit Endknoten v .

Die Bedingungen (3.4) und (3.5) geben die Flusserhaltungsgleichungen an der Quelle und Senke von r wieder. Dabei werden nur die gemäß der Spezifizierung zugehörigen Zeitfenster für die Abfahrt und die Ankunft berücksichtigt. Die frühest mögliche Abfahrt entspricht t_r . Über die Flexibilität kann die Abfahrt von r um q_r hinaus verzögert werden. Die spätest mögliche Ankunft ist gegeben durch $t_r + z_r + q_r$, während sich die frühest mögliche Ankunft ergibt, indem zu t_r die Mindesthaltezeiten aller spezifizierten Zwischenstops und die minimalen Fahrzeiten entlang der Trassenlinie L_r addiert werden. Dieses Zeitfenster ist in (3.5) mit H_{Ank} bezeichnet.

Die Haltebedingungen der Form: Der Zug r hält im Bahnhof v von $t_{v,1}^r$ bis $t_{v,2}^r$, werden auf die angegebene Flexibilität abgestimmt und gemäß (3.6) in das IP integriert. Dabei muss der Zug in v während der um q_r ausgedehnten Zeitspanne $t_{v,1}^r$ bis $t_{v,2}^r + q_r$ für mindestens $t_{v,2}^r - t_{v,1}^r$ Minuten halten.

Die Modellierung der UND-Gebote erfolgt in (3.7). Dadurch können „alles oder nichts“-Gebote für die Spezifizierung von Taktverkehren realisiert werden.

Die Ungleichungen in (3.8) sind die SPP-Bedingungen des IPs. Aus jeder der Konfliktmengen C kann nur höchstens eine Variable alloziert werden, um den reibungsfreien Ablauf des optimalen Fahrplans zu garantieren.

Dieses IP der Trassenallokation beziehungsweise der Gewinnerbestimmung wurde im Rahmen des Projektes Trassenbörse in der Modellierungssprache ZIMPL implementiert. Zur Lösung wird die Standardsoftware ILOG CPLEX herangezogen. Doch um auch große, der Realität entsprechende Beispielszenarien betrachten zu können, ist es sinnvoll einen Spezialalgorithmus für die Optimierung zu entwickeln.

3.2 Literaturüberblick

In [10] ist eine andere IP-Formulierung des Problems der Trassenallokation beschrieben. Da im Schienenverkehr oft bestimmte Linien sehr stark befahren sind, konzentrieren sich die Autoren auf einen einzelnen Pfad zwischen zwei großen Bahnhöfen, inklusive Zwischenbahnhöfe auf diesem Pfad. Dazu wird das Timetabling-Problem (Trassenallokation)

definiert und basierend auf dem Ansatz der Lagrange-Relaxierung in Kombination mit dem Subgradientenverfahren eine heuristische Lösung entwickelt. Anhand von Beispielen der italienischen Eisenbahngesellschaft wurde dieses Verfahren getestet. Der zeitliche Horizont ist auf einen Tag bezogen, während die Diskretisierung der Zeitachse in Minuten erfolgt. Für reale Testinstanzen lieferte das Verfahren Lösungen bei denen fast alle Trassen alloziert wurden. Bei diesen Instanzen nimmt der Optimalitätsgap kleine Werte an (in der Regel unter 2%). Außerdem wurden Beispiele getestet, die „hoch belastet“ waren. Von den Instanzen konnte das Verfahren folglich nur einen Teil der Trassen in den Fahrplan aufnehmen. Hier stiegen sowohl der Optimalitätsgap (ca. 10-20%) als auch die Lösungszeit stark an.

Die Theorie der Ganzzahligen Programmierung, sowie verschiedene Lösungsverfahren des Gewinnerbestimmungsproblems werden in [9] vorgestellt. Da das CAP eine Instanz des SPP ist, sind dort außerdem Instanzen des SPP angegeben, die aufgrund besonderer Eigenschaften wie vollständige Unimodularität, in polynomialer Zeit lösbar sind.

3.3 Der Auktionsrahmen

Zur Durchführung eines wettbewerbsfähigen Vergabeverfahrens für Trassen, das die Wohlfahrt maximiert und damit die Trassen entsprechend den Zahlungsbereitschaften verteilt, wird ein Auktionsmechanismus verwendet. Doch welches Auktionsverfahren ist in diesem Kontext am geeignetsten? Unter den Objekten der Auktion, die von den EVUs bestimmt werden, kann es, wie bereits erwähnt, Abhängigkeiten wie Komplementaritäten und Substitutionalitäten geben. Komplementaritäten treten beispielsweise bei der Realisierung von Taktverkehren oder Anschlusszügen eines Eisenbahnverkehrsunternehmens auf. Substitutionalitäten können durch Budgetbeschränkungen von EVUs entstehen. Außerdem kann es auch zwischen verschiedenen EVUs Abhängigkeiten geben. Diese könnten zum Beispiel folgendermaßen lauten: Falls Anbieter 1 die Trasse *A* bekommt, ist das Gebot von Anbieter 2 für Trasse *B* 800 €. Andersfalls bietet 2 für *B* nur 400 € [17]. Um die Trassenallokation so zu gestalten, dass diejenigen EVUs den Zuschlag für ihre Trassenwünsche erhalten, die die höchste Zahlungsbereitschaft besitzen, müssen kombinatorische Gebote zugelassen werden. Folglich wird für die Trassenbörsenauktion ein kombinatorisches Auktionsverfahren verwendet. Dabei erweist sich der Vickrey-Clarke-Groves-Mechanismus (Kapitel 2.3.1) aufgrund des hohen Rechenaufwandes als unpraktisch. Bei diesem Verfahren müssen nicht nur für die eigenen Trassenwünsche sondern auch für alle anderen möglichen Objektkombinationen Gebote eingereicht werden (außer sie werden mit null bewertet), um zu gewährleisten, dass die Vickrey-Preise richtig berechnet werden. Ein kontinuierliches, iteratives Verfahren wie der Adaptive User Selection Mechanismus (Kapitel 2.3.2) ist ebenfalls wenig geeignet. Bei diesem Verfahren liegt die rechentechnische Schwierigkeit der Gewinnerbestimmung auf der Seite der Bieter. Die Anzahl der eingereichten Trassenwünsche kann sehr hoch sein, was die Transaktionskosten der Bieter wachsen läßt. Zu untersuchen bleibt ein iteratives Auktionsverfahren, das auf diskreten Runden basiert, wie beispielsweise das von Parkes entwickelte iBundle (Kapitel 2.3.2).

3 Trassenbörse als Anwendung einer Kombinatorischen Auktion

Innerhalb des Projektes übernimmt der Projektpartner WIP die Aufgabe, einen geeigneten Auktionsmechanismus zu erstellen. In [18] werden Studien zum Auktionsdesign vorgestellt. Dabei wurden Auktionen simuliert, um den Einfluss von Grundpreisen und Mindestinkrementen zu untersuchen. Diese Größen sind in Abhängigkeit der Trassenkilometer bestimmt worden. Die Ergebnisse zeigen zum einen, dass mit Mindestinkrementen die Auktionsgeschwindigkeit beeinflusst werden kann und Grundpreisvariationen die Einnahmehöhe verändern. Zum anderen wird gezeigt, dass hohe Grundpreise eine ineffiziente Auslastung des Schienennetzes zur Folge haben.

Ziel dieser Arbeit ist die Simulation von Beispielszenarien in einer Trassenbörseauktion. Dazu wurde als Verfahren einer Kombinatorischen Auktion eine iterative Auktion mit diskreten Runden verwendet. Um den Ablauf der Trassenbörseauktion zu automatisieren, wurden bestimmte Regeln gewählt nach denen die Auktion durchgeführt wird. Außerdem ist für alle Bieter das selbe Bieterverhalten zugrunde gelegt worden. Einem kurzen Überblick der Inputdaten der Auktion (Trassenszenarien) folgen die Ausführungen des implementierten Auktionsmechanismus.

Die zu versteigernden Objekte in der Trassenbörseauktion werden allein durch die an der Auktion teilnehmenden Verkehrsanbieter bestimmt. Jedes Eisenbahnverkehrsunternehmen reicht zum Auktionsanfang seine Trassenwünsche ein und bietet im weiteren Verlauf nur auf die von ihm abgegebenen Trassenspezifikationen. Für die Simulation einer Kombinatorischen Auktion werden diese Objekte beziehungsweise Trassenwünsche mithilfe eines Generators erzeugt, der in Kapitel 4 vorgestellt wird. Die dadurch generierten Beispielszenarien sind den OPTRA-Einleseformaten angepasst und werden unter bestimmten verkehrstechnischen Gesichtspunkten erzeugt. Folglich berechnet der implementierte Auktionsmechanismus die Trassenallokation in jeder Runde über die OPTRA-Optimierung mit CPLEX. Als kombinatorische Gebote ist gemäß der verwendeten OPTRA-Version nur das UND-Gebot vorgesehen.

3.3.1 Der implementierte Auktionsmechanismus

Für die Automatisierung der kombinatorischen Auktion wurde ein einfaches iteratives Verfahren zu Grunde gelegt, das auf diskreten Runden basiert (Abbildung 3.2). Die Inputdaten und damit die Objekte der Auktion sind die eingereichten Trassenwünsche der Eisenbahnverkehrsunternehmen. Diese Trassenspezifikationen liegen in den OPTRA-Einleseformaten vor (siehe Tabelle 4.1, 4.2 und 4.3 auf Seite 29). Zu jedem Trassenwunsch gehört die im Allgemeinen in einer Auktion geheime maximale Zahlungsbereitschaft.

Am Anfang werden für alle Objekte der Auktion Mindestpreise, sogenannte Grundpreise, festgesetzt. Diese Grundpreise entsprechen den ersten eingereichten Geboten der EVUs, falls diese ihre maximale Zahlungsbereitschaft für die entsprechende Trasse nicht übersteigen. Im Falle von Paketgeboten (zum Beispiel Takte) bedeutet das, dass die Summe der Grundpreise aller Einzelobjekte des Pakets höchstens der Summe der maximalen Zahlungsbereitschaften der Einzelobjekte entsprechen darf. Der Paketgrundpreis wird anteilig

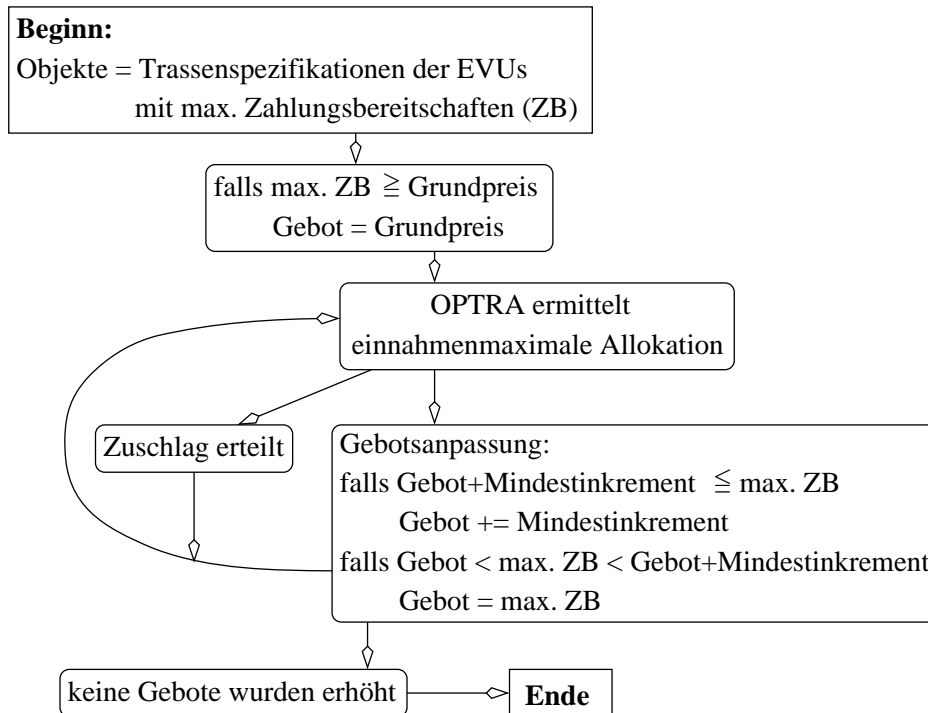


Abbildung 3.2: Schematischer Ablauf des verwendeten Auktionsmechanismus

an den maximalen Zahlungsbereitschaften auf die Einzelobjekte verteilt. Übersteigen die Grundpreise die maximalen Zahlungsbereitschaften, wird der Gebotswert 0 gesetzt. Die Gebote der Trassen nehmen während der gesamten Auktion nur Werte an, die höchstens so groß sind wie die zugehörigen maximalen Zahlungsbereitschaften.

In jeder Runde berechnet das OPTRA-Verfahren, basierend auf den bis dahin eingereichten Geboten, eine vorläufige Gewinnerzuteilung. Falls es nicht erfolgreiche Gebote gibt, deren jeweiliger Wert kleiner als die zugehörige maximale Zahlungsbereitschaft ist, werden die Gebotswerte erhöht. Das neue Gebot für jede Objektkombination berechnet sich aus der Summe der neuen Gebote für die zugehörigen Einzelobjekte. Für jedes dieser nicht erfolgreichen Einzelobjekte ergibt sich der neue Gebotswert aus dem Gebot der letzten Runde und einem Mindestinkrement. Der Wert des Mindestinkrements hat eine Höhe von 20% des zugehörigen Grundpreises. Folglich kann er von Trasse zu Trasse unterschiedlich sein. Die Gebote auf die Trassen beziehungsweise Pakete, die in der vorläufigen Allokation in den Fahrplan aufgenommen wurden, bleiben unverändert in der nächsten Runde erhalten. Sowohl für Einzeltrassen als auch für Trassenkombinationen gibt es (wie im iBundle-Modell) die Möglichkeit, die Gebote um weniger als das Mindestinkrement zu erhöhen. Dieser Fall kommt bei nicht erfolgreichen Trassen zum Tragen, falls das letzte Gebot zusammen mit dem Mindestinkrement die Zahlungsbereitschaft übersteigt. Das Gebot der Trasse wird auf den Wert der zugehörigen maximalen Zahlungsbereitschaft ge-

3 Trassenbörse als Anwendung einer Kombinatorischen Auktion

setzt. Diese Gebote werden in den nächsten Runden natürlich nicht mehr erhöht. Das Auktionsverfahren terminiert, falls in zwei aufeinanderfolgenden Runden die gleichen Gebote eingereicht werden (beziehungsweise kein Gebot erhöht wird). Die zu zahlenden Preise entsprechen den Geboten. Der Auktionsablauf

Der implementierte Auktionsmechanismus beinhaltet einige Eigenschaften des iBundle-Verfahrens. Dazu gehört zum einen die Verwendung von diskreten Runden und zum anderen der Gebrauch von Grundpreisen und Mindestinkrementen. Außerdem wird durch die Berechnung der Gebote gewährleistet, dass am Auktionsende die Allokation effizient ist.

4 Implementation eines Trassengenerators

Der im Rahmen dieser Diplomarbeit implementierte Trassengenerator hat die Aufgabe eine Reihe von Trassengeboten zu erzeugen. Diese Trassengebote beschreiben mögliche Trassenspezifikationen, die von EVUs in einer Trassenbörsenauktion eingereicht werden könnten. Ziel dieses Kapitels besteht darin, die unterschiedlichen Verfahren zur Erstellung von Trassengeboten darzustellen. Die zu generierenden Trassenwünsche sind den OPTRA-Einleseformaten anzupassen (Tabelle 4.1 bis 4.3). Zu den OPTRA-Formaten gehören drei

Tabelle 4.1: Format zur Formulierung von Trassengeboten

# ZugNr	Typ	StartBhf	Startzeit	EndBhf	Gebot	Fahrzeit	Gebotsabw	Flex
10021	ICE	DCEL	630	DKAW	1104	80	58	3
10022	ICE	DCEL	690	DKAW	1166	80	58	3

Tabelle 4.2:

Format zur Taktspezifizierung

# ZugNr	TaktNr
10021	1002
10022	1002

Tabelle 4.3:

Format für die Angabe der Zwischenhalte

# ZugNr	ZwHalt	von	bis
10021	DHAN	652	654
10021	DGOE	691	693
10022	DHAN	712	714
10022	DGOE	751	753

Dateien. Die Basisdaten, wie zeitliche und räumliche Spezifizierung der Trassen sowie die Gebotswerte, werden in einer Datei (Tabelle 4.1) festgehalten. Die optionalen Informationen der Zwischenhalte und die Formulierung der UND-Gebote bekommen jeweils ein Format (Tabelle 4.3 und 4.2). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden als Gebotskombinationen nur Taktspezifikationen betrachtet. Deshalb wird im weiteren Verlauf nicht mehr zwischen Paket- und Taktgeboten differenziert.

Die einzelnen Teile des Trassengenerators, wie die Netzeinteilung, die Einordnung der Verkehrsträger, die Nachfragebestimmung, die Liniengenerierung und das Gebotsmodell wurden modular programmiert. Dies erhielt einen hohen Stellenwert um Änderungen oder Verbesserungen einzelner Module leicht integrieren und Kritik oder Änderungswünsche auf einfache Weise behandeln zu können. Bei den einzelnen Modulen wurde versucht auf Realitätsnähe zu achten. Dies ist im Rahmen einer Diplomarbeit nur begrenzt möglich, deshalb ist die Flexibilität des Trassengenerators sehr wichtig. Einzelne Teile können leicht ausgetauscht und verbessert werden. Außerdem wurden zu einigen Modulen mehrere Verfahren entwickelt um die Flexibilität zu erhöhen. Die fünf Module werden im Fol-

4 Implementation eines Trassengenerators

genden erläutert. Durch Kombination von Elementen aus den einzelnen Modulen wird ein Marktteilnehmer simuliert, der durch einen oder mehrere Trassenwünsche definiert ist. Die Anzahl der Trassenwünsche ist beispielsweise davon abhängig, welches Verfahren zur Liniengenerierung verwendet wird, ob ein Takt generiert wird und wie groß der Takt ist, oder ob auch eine Trasse für die Rückfahrt erzeugt werden soll. Die Abhängigkeiten der einzelnen Module untereinander und ihre Einordnung innerhalb des Trassengenerators sind dem Schema in Abbildung 4.1 zu entnehmen.

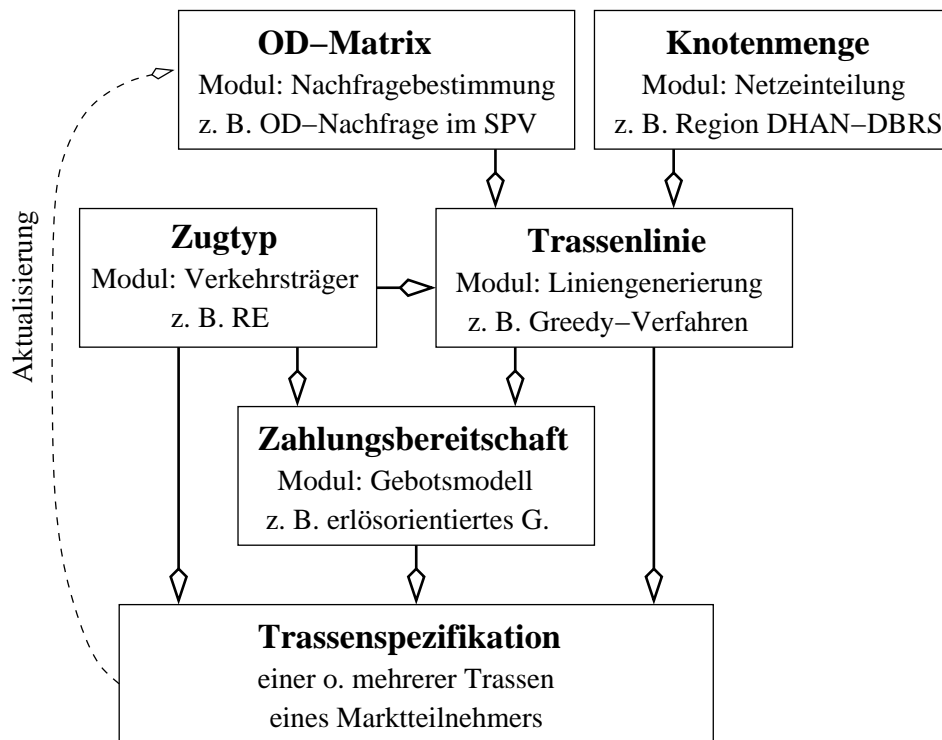


Abbildung 4.1: Position der Module im Trassengenerator

Für die Erstellung von Trassengeboten wird zwischen Schienenpersonenverkehr (SPV) und Schienengüterverkehr (SGV) unterschieden. Zum SPV gehören die drei Verkehrsarten Regionalverkehr, Interregionalverkehr und Fernverkehr. Im SGV wird nicht differenziert, sondern allgemein der Güterverkehr betrachtet. Für diese verschiedenen Verkehre können unterschiedliche Trassenwünsche generiert werden. Das Vorgehen soll im Folgenden erläutert werden. Dazu wird in Kapitel 4.1 die Datengrundlage für die Trassengenerierung dargelegt. Die Aufteilung des Bahnnetzes Hannover-Braunschweig-Fulda, entsprechend den verschiedenen Verkehren in Regionen und Großstädte, wird in Kapitel 4.2 vorgestellt. Über die Zuordnung der unterschiedlichen Verkehrsträger zu den Verkehrsarten gibt Kapitel 4.3 Auskunft. In Kapitel 4.4 wird die Nachfrageberechnung zwischen den Orten des Bahnnetzes beschrieben. Die Nachfrageberechnung liefert sowohl für den Schienenperso-

nenverkehr als auch für den Schienengüterverkehr eine OD(origin destination)-Matrix. Die Einträge dieser Matrizen geben die Anzahl der Personenfahrten zwischen zwei Orten an beziehungsweise die Menge der Güter (in Tonnen), die von einem Ort zu einem anderen zu befördern sind. Auf diesen OD-Nachfragematrizen basieren einige Verfahren der Liniengenerierung und ein Gebotsmodell. Zur Generierung von Trassenlinien werden kombinatorische Verfahren verwendet, die Kapitel 4.5 beschreibt. Kapitel 4.6 erläutert die beiden verwendeten Gebotsmodelle. Wie die einzelnen Elemente dieser fünf Module kombiniert werden, um Trassen zu erzeugen, wird in Kapitel 4.7 gezeigt.

4.1 Verwendete Daten

Die Datenbasis, die herangezogen wurde, um einzelne Generatormodule zu erstellen, soll hier beschrieben werden. Für das Modul der Nachfrageberechnung im Schienenpersonenverkehr sind die Einwohnerzahlen der Orte in dem Untersuchungsnetz zugrunde gelegt worden. Analog stützt sich die Berechnung im Schienengüterverkehr auf die Beschäftigtenzahlen der Orte im Bereich Verarbeitendes Gewerbe sowie Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden (Tabelle A.1 im Anhang). Da es zu den einzelnen Stadtteilen von Großstädten keine Beschäftigtenzahlen gibt, werden im Güterverkehr die Beschäftigten der Großstadt auch auf die Stadtteile anteilig an der Anzahl der Einwohner aufgeteilt, sofern der Stadtteil einen Güterbahnhof besitzt.

Außerdem standen folgende Informationen vom Projektpartner FG Schienenfahrwege und Bahnbetrieb der TU Berlin zur Verfügung. Dazu gehört das Status quo-Szenario im OPTRA-Einleseformat und der diesem Szenario zugrunde liegende Fahrplan aus dem Kursbuch 2004. Dieser Fahrplan umfasst alle Personenverkehrszüge aus dem Kursbuch, die das Trassenbörseteilnetz zwischen 10:00 Uhr und 14:00 Uhr durchfahren. Dabei beenden einige Züge ihre Fahrt auch nach 14:00 Uhr. Das Status quo-Szenario enthält 290 Personenverkehrstrassen abgestimmt auf das Untersuchungsnetz Hannover-Braunschweig-Fulda. Zusätzlich zu den SPV-Trassen beinhalten die Status quo-Dateien 30 vom Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb geschätzte Güterzüge, so dass insgesamt 320 Trassenwünsche zum Status quo gehören. Dieser Status quo kann jedoch nicht vollständig vom OPTRA-Modell wiedergegeben werden, das bedeutet, dass die OPTRA-Allokation nicht alle 320 Status quo-Trassen auswählt. In Kapitel 5 wird erläutert, wie die Status quo-Dateien angepasst werden, um dennoch einen konfliktfreien Fahrplan zu erhalten, der als Referenzfahrplan bei der Beispieltrassenerzeugung in Kapitel 6 verwendet wird.

Desweiteren lieferte der Projektpartner Prognosedaten für die offizielle Bundesverkehrswegeplanung (BVWP). Hierbei handelt es sich um prognostizierte Nachfragezahlen im Schienenpersonen- und Schienengüterverkehr für das Jahr 2015. Die Nachfragewerte im Schienenpersonenverkehr beziehen sich auf Verkehrsströme zwischen definierten Verkehrszellen. Ebenso gibt es im Schienengüterverkehr eine Matrix über das prognostizierte Transportaufkommen in Tonnen für 2015, räumlich basierend auf Zonen. Aufgrund der fehlenden Genauigkeit (statt einzelner Orte werden größere Zellen oder Zonen als Quelle

4 Implementation eines Trassengenerators

und Ziel verwendet), mußten die Zahlen aufbereitet werden, um die berechneten Nachfragewerten mit ihnen vergleichen zu können. Dadurch kommt es jedoch zu Qualitätseinbußen.

Im SPV beinhalten die Verkehrszellen, die das Untersuchungsnetz betreffen, bis zu acht Landkreise beziehungsweise kreisfreie Städte. Die Jahresnachfragewerte zwischen den Verkehrszellen werden auf einen Tag¹ skaliert. Um von diesen Nachfragedaten die gewünschten Werte zwischen den Knoten des Teilnetzes zu generieren, werden die Einwohnerzahlen der Verkehrszellen bestimmt. Um geeignete Nachfragewerte zwischen zwei Orten zu erhalten, wird aus der Nachfrage zwischen den zugehörigen Verkehrszellen der Anteil bestimmt, den die Summe beider Einwohnerzahlen an der Summe der Einwohner der zugrunde liegenden Verkehrszellen² hat. Vergleichend stützt sich die Nachfrageberechnung im Rahmen des Trassengenerators auf die aufbereiteten Werte der Bundesverkehrswegeplanung. Allerdings läßt der durch das Aufbereitungsverfahren entstandene Qualitätsverlust nur das Vergleichen der Größenordnungen zu. Einige Nachfragewerte sind aufgrund der hohen Einwohnerzahldifferenzen der beteiligten Orte bei der Aufbereitung sehr verfälscht worden, zum Beispiel die Nachfrage von Groß Gleidingen nach Braunschweig und Hannover. Groß Gleidingen besitzt 756 Einwohner, während es 2015 den aufbereiteten Werten entsprechend täglich 759 Personenfahrten von dort nach Braunschweig und 876 Personenfahrten von dort nach Hannover geben soll.

Im SGV wurden die Werte für das prognostizierte Transportaufkommen ebenfalls auf einen Tag umgerechnet. Das Transportaufkommen wird im SGV zwischen Verkehrszonen angegeben. Ein großer Nachteil ist jedoch, dass die Größe dieser Zonen unbekannt ist. Das bedeutet, dass in einer solchen Zone mehrere Güterbahnhöfe liegen können, aber wieviele und welche ist nicht in den Daten enthalten. Auch das Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb konnte hier nicht weiter helfen. Aus diesem Grund war eine genauere Aufbereitung der Daten nicht möglich. Infolgedessen erweist sich ein Vergleich dieser Daten mit den berechneten Werten als schwierig und nicht sehr aussagekräftig.

Desweiteren werden die Entfernungen der Orte voneinander für die Nachfrageberechnung und für die Liniengenerierung der Trassen benötigt. Auf dem zugrunde liegenden Graphen G wird die Kürzeste-Wege-Matrix $dist$ bestimmt. Dazu wurde der Floyd-Warshall-Algorithmus implementiert. Dieser Algorithmus löst das All-Pairs-Shortest-Path-Problem in $\mathcal{O}(n^3)$, wobei n der Anzahl der Knoten im zugrunde liegenden Graphen entspricht, siehe dazu auch [19]. Dieser Algorithmus berechnet die Werte der $dist$ -Matrix und eine Matrix, die die vorletzten Knoten der kürzesten Wege enthält. Mithilfe dieser Matrix lassen sich die verwendeten Kanten der kürzesten Wege im Graphen bestimmen.

Außerdem werden für die Aktualisierung der OD-Nachfrage-Matrizen im SPV und zur Gebotsberechnung von Trassenwünschen Angaben über die Sitzplatzanzahlen der verschiedenen Verkehrsträger im SPV benötigt (Tabelle 4.4). Dabei sind die Zahlen für den ICE und den IC nach Angaben der Deutschen Bahn Durchschnittswerte für die entspre-

¹Ein Jahr entspricht 365 Tagen.

²Die Einwohnerzahlen der Kreise und kreisfreien Städte basieren auf den Zahlen von www.meinestadt.de

Tabelle 4.4: Geschätzte durchschnittliche Anzahl der Sitzplätze aller Personenzugtypen

Zugtyp	Sitzplatzanzahl
ICE	400
IC	300
RE	300
RB	180
SB	206

chenden Zugtypen. Die Größe und somit die Sitzplatzanzahl von Zügen des Regionalverkehrs variieren sehr stark, deshalb konnte die Deutsche Bahn dazu keine Angaben machen. Mithilfe der Quelle [21] konnten die Werte für die anderen Zugtypen wie folgt ermittelt werden. Anhand eines Doppelstock-Mittelwagens (Bauart 758.5), der häufig bei Regionalexpresszügen verwendet wird und 107 Sitze hat, wurde die Sitzplatzanzahl für Regionalexpresszüge auf durchschnittlich 300 geschätzt. In [21] werden eine Reihe von Triebzügen dargestellt, die als Regionalbahnen in Frage kommen. Die Anzahl der Sitzplätze variiert dabei von 71 bis 161. Außerdem können diese Züge auch in Mehrfachtraktion gefahren werden, wodurch sich die Sitzplatzanzahl vervielfacht. Demzufolge wurde der durchschnittliche Wert für die Anzahl der Sitzplätze in einer Regionalbahn auf 180 geschätzt. Für den S-Bahnbetrieb wurde die Sitzplatzanzahl des Elektrotriebzugs mit der Baureihe 424 zugrunde gelegt. Dieser Zugtyp ist in seiner Ausstattung speziell auf das S-Bahnnetz im Großraum von Hannover ausgerichtet worden und kommt dort zum Einsatz.

4.2 Einteilung des verwendeten Bahnnetzes

Neben den unterschiedlichen Verkehrsarten innerhalb des Bahnnetzes soll auch der grenzüberschreitende Verkehr modelliert werden. Dazu werden oft nur bestimmte Teile des Netzes oder bestimmte Orte berücksichtigt. Diese Netzeinteilung soll für den Verkehr innerhalb des Netzes und für den grenzüberschreitenden Verkehr im Folgenden vorgenommen werden.

4.2.1 Einteilungen für den Verkehr innerhalb des Netzes

Das Untersuchungsnetz der Trassenbörse (Abbildung 3.1) wird entsprechend den Verkehrsarten zum einen in Regionen untergliedert und zum anderen werden bestimmte Großstädte ausgezeichnet. Bevor diese Einteilung vorgenommen wird, erfolgt eine grobe Abgrenzung der einzelnen Verkehrsarten.

Zur Beschreibung des Regionalverkehrs muss der Begriff der Region, innerhalb der der Verkehr aufgefasst werden soll, erläutert werden. In [20] sind dazu einige Sichtweisen vorgestellt, eine allgemeine ist die folgende. Eine Region ist eine räumliche Einheit, die der

4 Implementation eines Trassengenerators

örtlichen Ebene übergeordnet und der staatlichen untergeordnet ist. Die gesetzlich geregelte Verantwortung für den Nahverkehr liegt bei den Ländern. Folglich werden durch die Regionalplanung der Bundesländer die Regionen festgelegt. Für den Schienenpersonenfernverkehr und den Interregionalverkehr als Teil des Fernverkehrs ist der Bund zuständig. Im Regionalisierungsgesetz (§2) wird der Öffentliche Personennahverkehr als Personenbeförderung definiert, die „die Verkehrsnachfrage im Stadt-, Vorort- oder Regionalverkehr“ befriedigt. „Das ist im Zweifel der Fall, wenn in der Mehrzahl der Beförderungsfälle eines Verkehrsmittels die gesamte Reiseweite 50 Kilometer oder die gesamte Reisezeit eine Stunde nicht übersteigt.“, heißt es weiter. Demnach wird der Regionalverkehr als Teil des Nahverkehrs gesehen und ebenfalls durch eine Entfernung von 50 km begrenzt. Laut [20] ist diese Definition zu eng gewählt, da selbst in den formellen Planungsregionen der Länder größere Distanzen überschritten werden. Demnach wird in [20] der Regionalverkehr vorerst ähnlich offen aufgefasst wie der Regionsbegriff. Der Regionalverkehr wird als Verkehr mit bestimmten Entfernungen beschrieben, die über die kommunale Ebene hinausgehen. Zum Interregional- und Fernverkehr heißt es weiter, dass in der Fachliteratur selten vom Interregionalverkehr die Rede ist. Er wird im Allgemeinen dem Fernverkehr untergeordnet, während der Fernverkehr in der Regel als Personenbeförderung über Entfernungen angesetzt ist, die größer als die gesetzlich festgelegte Nahverkehrsgrenze von 50 km sind.

Im weiteren Verlauf stellt der Autor von [20] das *Konzept der zentralen Orte* vor und verfasst die Definitionen der Verkehrsarten in einem räumlich-funktionalen Kontext. Das Konzept der zentralen Orte basiert auf der Raumordnungstheorie von Walter Christaller. Er wies 1933 eine Regelmäßigkeit in der hierarchischen Anordnung der Städte und Gemeinden nach, die auf der zentralen Bedeutung der Orte basiert. Zentralität bedeutet dabei, dass die Orte gegenüber ihrer Umgebung mit zentralörtlichen Einrichtungen ausgestattet sind, wodurch sich hierarchisch abgestufte Einzugsbereiche ergeben. Differenziert werden Unter- oder Grundzentren, die die Grundversorgung für die eigene Bevölkerung liefern und einen sehr kleinen Einzugsbereich haben. Mittelzentren bieten außerdem die Deckung des gehobenen Bedarfs, während Oberzentren zusätzlich noch den spezialisierten höheren Bedarf bedienen.

Anhand dieses Konzeptes können die Aufgaben der unterschiedlichen Verkehrsarten, so wie sie im Rahmen dieser Arbeit zu verstehen sind, aufgefasst werden.³ Der Regionalverkehr verbindet Grundzentren und Ortsteile miteinander, um sie an die nächstgelegenen Mittel- oder Oberzentren anzuschließen. Die schnelle Verbindung von Mittelzentren und deren Anbindung an die Oberzentren steht beim Interregionalverkehr im Vordergrund. Es können aber auch größere Grundzentren mitbedient werden. Der Fernverkehr konzentriert sich hingegen darauf, lange Strecken zurückzulegen, und verbindet Großstädte und Oberzentren untereinander und mit größeren Agglomerationen. Im Fernverkehr kann aber durchaus auch in Mittelzentren gehalten werden. Durch relativ wenige Halte können hier sehr hohe Geschwindigkeiten erreicht werden. In dem Untersuchungsnetz wurden entsprechend dieser Definitionen verschiedene Regionen und Städte ausgewählt (Abbildung 4.2).

³Diese Ausführungen weichen leicht von denen in [20] ab, da dort nicht klar zwischen Regional- und Interregionalverkehr differenziert wird bzw. werden kann.

4.2 Einteilung des verwendeten Bahnnetzes

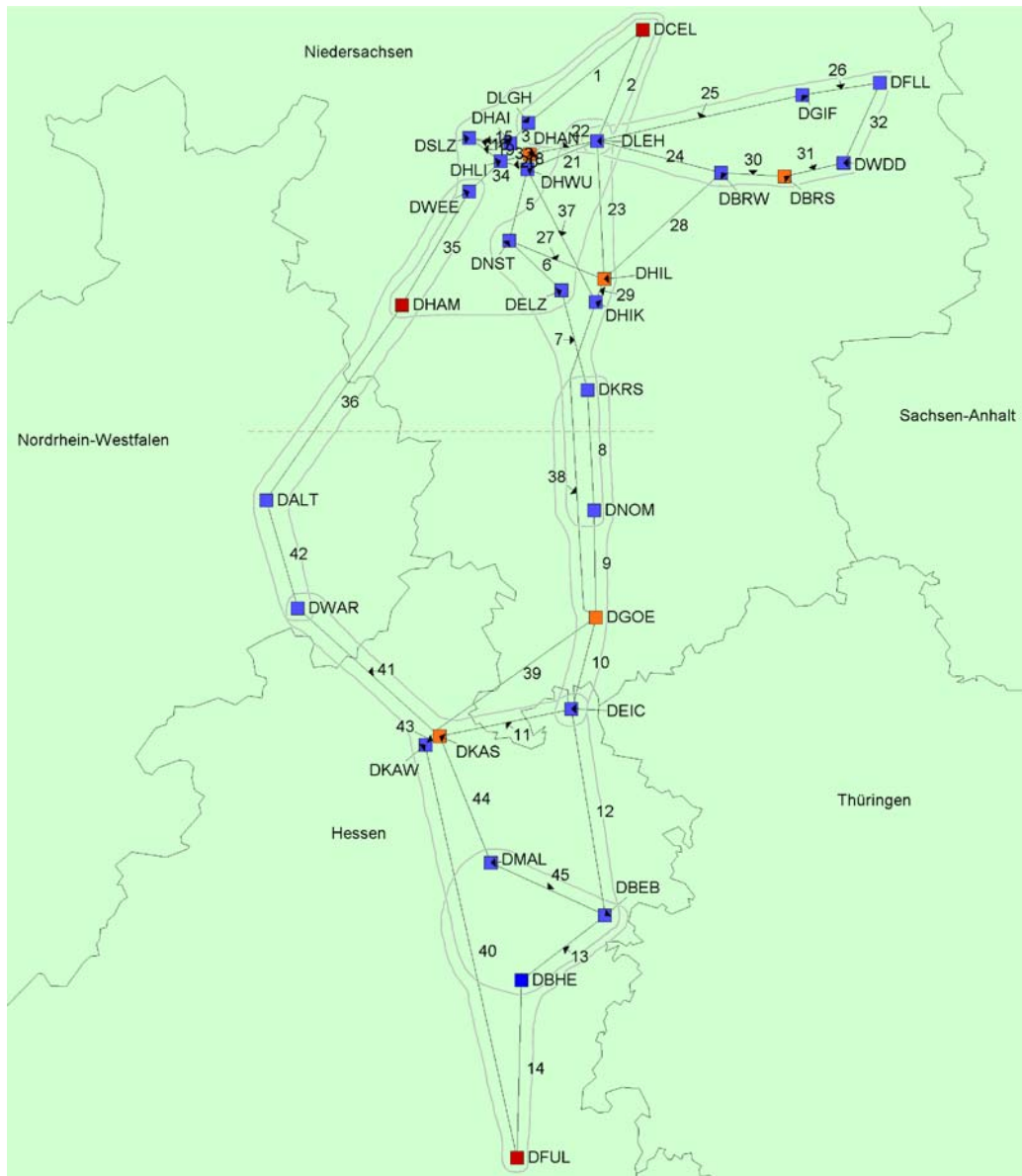


Abbildung 4.2:

Bahnnetz Hannover-Braunschweig-Fulda mit 8 Regionen, 2 Großregionen und gekennzeichneten Großstädten für den Interregionalverkehr und den Fernverkehr.

4 Implementation eines Trassengenerators

Für den Regionalverkehr wurde das Teilnetz in acht kleinere Regionen geteilt, die sich teilweise überschneiden. Jede dieser Regionen wurde als Einzugsgebiet eines Mittel- oder Oberzentrums gewählt und ist in der Abbildung grau umrandet. Abhängig von der Größe und Bedeutung der zentralen Stadt sind die Regionen unterschiedlich groß (in der Anzahl der Orte). Die Region Kassel ist beispielsweise größer als die Region Hameln. Die Größe einiger Regionen ist auch durch ihre Lage im Teilnetz beeinflusst worden. Solche Regionen sind zum Beispiel Fulda und Celle, da sie am oberen beziehungsweise unteren Rand des Teilnetzes liegen und sich ihr Einzugsgebiet eigentlich über das Untersuchungsnetz hinaus erstreckt. In der Regel beinhalten alle Regionen nur ein Mittel- oder Oberzentrum. Eine Ausnahme bildet die Region Hannover. Sie umfasst neben der Großstadt Hannover auch die Mittelzentren Celle und Hameln, die ebenfalls eigene Einzugsgebiete haben. Begründet liegt diese Ausnahme in der Größe des S-Bahnnetzes, das sich über Hannover hinaus bis nach Celle und Hameln erstreckt.

Zusätzlich zu den acht kleinen Regionen wurde das Untersuchungsnetz in zwei Großregionen unterteilt, die sowohl für den Regionalverkehr als auch für den Interregionalverkehr verwendet werden können. In Abbildung 4.2 wird die Lage der Großregionen durch die gestrichelte Linie verdeutlicht. Sie grenzt die Hannover-Braunschweig-Region von der Kassel-Fulda-Region ab. Desweiteren wurden für den Interregionalverkehr die acht zentralen Städte der kleineren Regionen ausgezeichnet. Dazu gehören die rot oder orange gefärbten Städte Celle, Braunschweig, Hameln, Hannover, Hildesheim, Fulda, Göttingen und Kassel in der Abbildung 4.2. Durch die Verbindung der Mittelzentren und deren Anbindung an die Großstädte erfolgt gleichzeitig die Vernetzung der Regionen.

Die Oberzentren Braunschweig, Göttingen, Hannover, Hildesheim und Kassel, mit Einwohnerzahlen über 100.000, sind für den Fernverkehr vorgesehen und in der Abbildung orange gefärbt. Dabei ist zu beachten, dass der Fernverkehrsbahnhof der Großstadt Kassel in dem drei km entfernten Kassel-Wilhelmshöhe liegt, weshalb im Fernverkehr bei der Auswahl der Trassenhalte (je nach Verfahren zur Liniengenerierung) die Größe (Einwohnerzahl) von Kassel verwendet wird, aber im Trassenwunsch der Fernverkehrsbahnhof Kassel-Wilhelmshöhe statt Kassel Hbf realisiert wird. Das bedeutet, dass nur die Zugtypen ICE und IC nicht in Kassel sondern in Kassel-Wilhelmshöhe halten.

4.2.2 Modellierung des Teilnetzumlandes

Nachdem das Bahnnetz bisher nur für Binnenverkehr vorgesehen ist, wird in diesem Unterkapitel auf die Modellierung der Gebiete außerhalb des Teilnetzes eingegangen, um auch Trassen zu berücksichtigen, deren Start- und Zielorte außerhalb des Untersuchungsnetzes liegen, deren Verlauf aber das Teilnetz durchquert. Dazu wurde das Umland zu vier Gebieten zusammengefasst. Diese Gebiete grenzen im Süden, Norden, Osten und Westen an das Bahnnetz. Folglich erzeugen sie im zugehörigen Graphen G vier Knoten. Entsprechend ihrer Lage im Süden, Norden, Osten und Westen werden sie als SNOW-Knoten bezeichnet. Jeder dieser Knoten ist über zwei entgegengesetzt gerichtete Kanten mit jedem Knoten des Graphen G verbunden, der sich am Rand des Teilnetzes in der entsprechenden Him-

melsrichtung befindet und zu Gleisabschnitten inzident ist, die sich nicht mehr im Untersuchungsnetz befinden. Diese Informationen wurden den Streckenkategorienkarten [24], [25] und [26] entnommen. Die Tabelle 4.5 gibt die genaue Verbindung der SNOW-Knoten mit dem Graphen G wieder.

Tabelle 4.5: Kanten zwischen den SNOW-Knoten und dem Graphen G

Umland	Knoten des Graphen G
S	DBEB, DEIC, DFUL, DGOE, DKAS, DKAW
N	DBRS, DCEL, DFLL, DGIF, DLGH, DSLZ, DWDD
O	DBEB, DEIC, DGOE, DHIL, DNOM
W	DALT, DHAM, DKAS, DKAW, DSLZ, DWAR, DWEE

4.3 Einordnung der Verkehrsträger

Für die Trassengenerierung werden sechs verschiedene Zugtypen verwendet, die bereits im OPTRA-Modul integriert waren. Im Personenverkehr gehören Intercityexpress (ICE), Intercity (IC), Regionalexpress (RE), Regionalbahn (RB) und S-Bahn (SB) dazu, während für den Güterverkehr nur der Zugtyp Intercargo (ICG) vorgesehen ist. Regional- und S-Bahn werden ausschließlich im Regionalverkehr verwendet. Der Regionalexpress wird nur im Interregionalverkehr eingesetzt. Der Intercity ist ebenfalls auf interregionalen Strecken vertreten, kann aber auch wie der Intercityexpress im Fernverkehr genutzt werden. Entsprechend den Verkehrsarten halten nicht alle Zugtypen an jedem Bahnhof. Während die Regionalbahn der einzige Zugtyp ist, der an allen Bahnhöfen hält, ist die S-Bahn auf das S-Bahnnetz Hannover beschränkt. Der Regionalexpress hat einige Halte weniger als die Regionalbahn. Während der IC hauptsächlich die Mittel- und Großzentren bedient, kann er aber auch an einigen größeren Grundzentren halten (vergleiche dazu die Beschreibung des Interregionalverkehrs in Kapitel 4.2). In gleicher Weise kann der Intercityexpress, neben den Großstädten auch an Mittelzentren halten. Die Entscheidungen über die Halteberechtigungen basieren zum einen auf der Netzaufteilung und der Eingrenzung der Verkehrsarten entsprechend dem Konzept der zentralen Orte und den vom Projektpartner FG Schienenfahrwege und Bahnbetrieb der TU Berlin übermittelten Informationen bezüglich des aktuellen Fahrplans aus dem Kursbuch, angepasst auf das Untersuchungsnetz. Außerdem wurden die aktuellen Abfahrtspläne der Deutschen Bahn herangezogen. Die Halteberechtigungen zu den einzelnen Bahnhöfen sind im Anhang zu finden (Tabelle A.3).

4.4 Nachfrageberechnung

Es ist schwierig, aktuelle Vergleichsstatistiken mit der gewünschten Genauigkeit (Nachfrage zwischen einzelnen Orten) für die Nachfrageberechnungen heranzuziehen. Entspre-

4 Implementation eines Trassengenerators

chende Statistiken waren weder im Internet zu finden noch wurden sie auf Anfragen an Dritte weitergegeben. Als einzige Vergleichsbasis stehen die aufbereiteten Daten der Bundesverkehrswegeplanung zur Verfügung. Demzufolge wurden Modelle entwickelt, um die durchschnittliche Nachfrage an Personenfahrten zwischen zwei Orten an einem Tag und die Menge der zu transportierenden Güter zwischen zwei Orten zu schätzen. Der Prozess der Nachfrageberechnung ist sehr komplex. Die Anzahl der Personenfahrten von einem Ort in einen anderen ist neben der Größe und Bedeutung des Start- und Zielortes auch von vielen äußeren Bedingungen, wie zum Beispiel dem Wochentag oder der Jahreszeit abhängig. Zur Vereinfachung des Modells wurden einige Annahmen getroffen. Die Berechnung stützt sich hauptsächlich auf die Größe (Einwohnerzahl) des Start- und Zielortes und ihre Entfernung. Die Gütertransportnachfrage ist ähnlich umfangreich. Hier kommt erschwerend hinzu, dass die Güterverkehrsströme von den zugehörigen Wirtschaftszweigen abhängig sind. Diese zu berücksichtigen, würde jedoch den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Das Berechnungsmodell im SGV basiert auf den Beschäftigtenzahlen im Bereich Verarbeitendes Gewerbe sowie Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden der Quell- und Zielorte.

4.4.1 Nachfragebestimmung im SPV

V sei die Menge der Orte im Untersuchungsnetz (Knotenmenge des Graphen G). Für das Berechnungsmodell wurden folgende Annahmen getroffen.

Annahme 4.1. *Die Nachfragewerte beziehen sich auf einen Werktag mit 24 Stunden.*

Es müssen folglich Pendler-, Geschäfts- und Reiseverkehr berücksichtigt werden. Die zeitliche Verteilung der Nachfrage auf den gesamten Tag wird auf Seite 44 diskutiert.

Annahme 4.2. *Jeder Reisende, der eine Zugfahrt unternimmt, hat genau einen Zielort.*

Das bedeutet, dass ein Fall, bei dem eine Person in $i \in V$ eine Reise nach $j \in V$ antritt, später von j eine neue Fahrt mit dem Ziel $k \in V$ startet und anschließend wieder nach i zurückfährt, ausgeschlossen ist. Der Grund für diese Vereinfachung liegt an der Berechnungsgrundlage. Diese ist unter anderem die Einwohnerzahl des Startortes. Die Person wird folglich nicht bei der Abfahrt aus j nach k berücksichtigt, da sie wohnhaft in i ist.

Annahme 4.3. *Die Nachfragewerte sind symmetrisch.*

Das bedeutet, dass jeder Reisende, der von Ort i nach Ort j fährt, entweder auch von j nach i zurück fährt oder stattdessen ein anderer die Rückreise antritt.

Unter Berücksichtigung der Annahmen wird eine Reise mit genau einem Startort $i \in V$ und genau einem Zielort $j \in V$ definiert als eine von einer Person unternommenen Hin- und Rückfahrt (Hinreise) von i nach j und einer Rückfahrt (Rückreise) vom Zielort j zum Startort i . Eine Personenfahrt kann sowohl eine Hin- als auch eine Rückfahrt bezeichnen.

Definition 4.4. Die Nachfrage von einem Ort $i \in V$ zu einem Ort $j \in V$ wird mit $B(i, j)$ bezeichnet und beschreibt die Anzahl der Personenfahrten von i nach j mit der Bahn an einem Tag.

Für je zwei Orte $i, j \in V$ wird in Abhängigkeit der Bevölkerung von i und j und der Entfernung beider Orte voneinander der Nachfragewert $B(i, j)$ bestimmt. Aus allen Werten ergibt sich damit die OD-Nachfragematrix B .

Die Einwohnerzahl eines Ortes i wird mit b_i notiert. Für die Berechnung der Nachfrage von $i \in V$ zu $j \in V$ kann aufgrund der Symmetrie ohne Beschränkung der Allgemeinheit $b_i \leq b_j$ angenommen werden. Die Entfernung der beiden Orte voneinander beschreibt $dist(i, j)$. Die Entfernungsmatrix $dist$ enthält die Längen der kürzesten Wege zwischen allen Paaren von Knoten im Graphen G .

Berechnung von $B(i, j)$

Die Anzahl aller Personenfahrten von i nach j mit $b_i \leq b_j$ setzt sich zum einen aus den Hinreisen von Personen aus i und den Rückreisen von Personen aus j zusammen. In Abbildung 4.3 sind die verschiedenen Personenfahrten zwischen den Orten i und j verdeutlicht. Für die Nachfrage von i nach j muss der erste und vierte Pfeil berücksichtigt werden beziehungsweise unter Symmetrieausnutzung die Pfeile der Hinfahrten (erster und dritter).

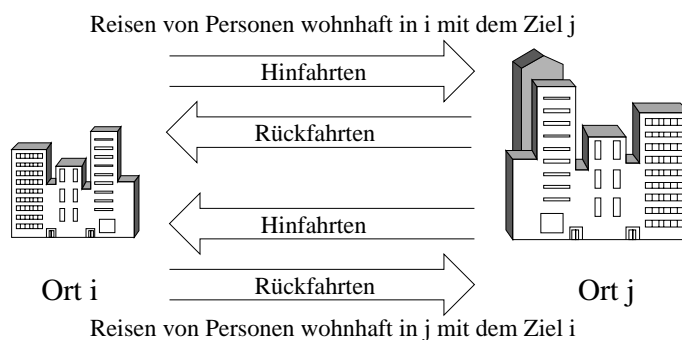


Abbildung 4.3: Personenfahrten zwischen i und j

Der Zusammenhang zwischen der Nachfrage von i nach j und der Einwohnerzahl b_i für verschiedene, aber feste b_j wird durch die Prognosewerte der BVWP verdeutlicht. Dazu werden in Abbildung 4.4 die Anzahl der zu berücksichtigenden Hin- und Rückreisen umliegender Orte von Großstädten in die Großstädte, wie Hildesheim, Kassel, Braunschweig und Hannover, prozentual bezüglich der Einwohnerzahl des kleineren Ortes dargestellt. Einige kleinere Orte, die eine sehr hohe Einwohnerzahldifferenz zu b_j aufweisen, wurden aufgrund der verzerrten Nachfragewerte ausgespart, zum Beispiel Groß Gleidingen.

4 Implementation eines Trassengenerators

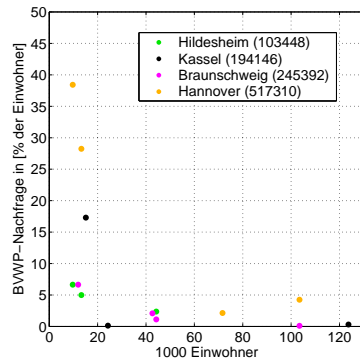


Abbildung 4.4:

BVWP-Nachfragemerkmale prozentual bezüglich der Einwohnerzahl des kleineren Ortes

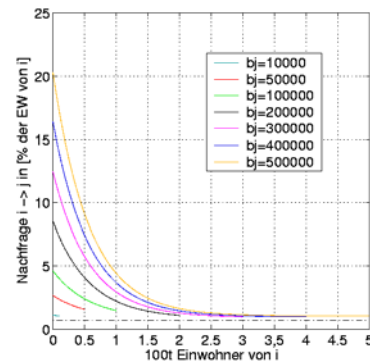


Abbildung 4.5:

Prozentualer Anteil der Personenhinfahrten und Rückfahrten an der Einwohnerzahl des kleineren Ortes

Vergleichend dazu zeigt Abbildung 4.5 die Nachfragemerkmale für den Trassengenerator, die die Summe der entsprechenden Hin- und Rückfahrten für unterschiedlich große b_j prozentual bezüglich b_i angeben, wobei die Entfernung der Orte $dist(i, j)$ auf 0 km gesetzt ist.

Die Anzahl der Hinfahrten nach j wird durch $b_i \cdot y_{ij}$ und die Anzahl der Rückfahrten nach j durch $b_i \cdot y_{ji}$ bestimmt, wobei die reelle Funktion y_{ij} von b_i und b_j und die reelle Funktion y_{ji} von b_j abhängt. In y_{ij} wird zusätzlich die Entfernung $dist(i, j)$ berücksichtigt. In der Regel ist der Anteil der Hinfahrten von Reisenden aus i größer als der Anteil der Rückfahrten von Reisenden aus j , denn große Städte erbringen eine hohe Versorgungsleistung, auch für das Umland (Pendleraufkommen in Großstädte). Aus dem Grunde bestimmt auch y_{ij} einen größeren Anteil an Personenfahrten als y_{ji} und die Funktion y_{ij} übernimmt den exponentiellen Zusammenhang aus Abbildung 4.5. Die Funktion y_{ji} bestimmt den Anteil der Personenrückfahrten nach j bezüglich der Einwohnerzahl von i . Da dieser Anteil der Personenfahrten relativ klein ist, wurde eine einfache Beschreibung von y_{ji} gewählt. Die Funktion y_{ji} ist nur von b_j abhängig und weist somit einen konstanten Verlauf auf.

Der prozentuale Anteil von $b_i \cdot y_{ij}$ und $b_i \cdot y_{ji}$ an der Einwohnerzahl des kleineren Ortes b_i ist in den Abbildungen 4.6 und 4.7 visualisiert, wobei die Entfernung zwischen allen Orten auf 0 km gesetzt ist. Hierbei werden folgende Zusammenhänge über die Personenhinfahrten- und Personenrückfahrtenanzahl verdeutlicht. Zum einen werden bei fester Größe des Zielortes und hypothetischer Entfernung von 0 km prozentual an b_j mehr Personenhinfahrten aus kleineren Orten als aus größeren Orten in eine noch größere Stadt mit b_j vielen Einwohnern unternommen (entlang einer Kurve in Abbildung 4.6). Zum anderen ist für einen festen Ort i an den unterschiedlichen Funktionskurven leicht zu sehen, dass es von i in eine große Stadt mehr Personenfahrten gibt, als in einen kleinen Ort, falls beide gleichweit von i entfernt liegen (in Abbildung 4.6 0 km). Das liegt unter anderem daran, dass eine große Stadt für das Umland eine größere Versorgungsfunktion übernimmt

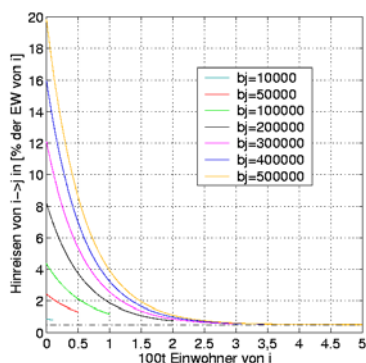


Abbildung 4.6:
Prozentualer Anteil der Personenhinfahrten an der Einwohnerzahl des Startortes

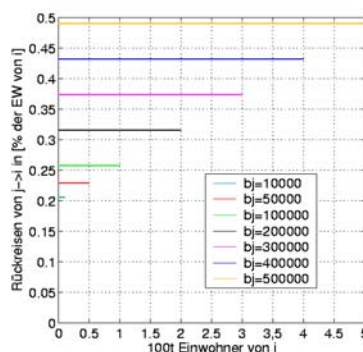


Abbildung 4.7:
Prozentualer Anteil der Personenrückfahrten an der Einwohnerzahl des Zielortes

als ein kleiner Ort. Je größer der Startort ist, desto geringer wird jedoch der prozentuale Mehranteil von Personenfahrten in größere Orte, denn die Bedeutung des Startortes wird ebenfalls größer und die entsprechenden Güter und Einrichtungen sind ohne die Bahn zu erreichen.

Ähnliche Zusammenhänge wie für die Funktion y_{ij} erläutert wurden, sind auch in die Funktion y_{ji} integriert. Die Rückfahrtenanzahl von i nach j der Personen aus j sind in Abbildung 4.7 prozentual bezüglich der Einwohnerzahl von i dargestellt. Aus Symmetriegründen ist die Anzahl der Rückfahrten von Personen aus j von i nach j gleich der Anzahl Hinfahrten von j nach i , siehe Abbildung 4.3. Ausgehend von einem Startort der Größe b_j gibt es verständlicherweise mehr Personenhinfahrten in größere Zielorte i als in kleinere. Um diesen Sachverhalt abzubilden, wurde für ein festes b_j ein konstanter prozentualer Anteil an Personenfahrten bezüglich b_i gewählt. Mit einem größeren Zielort i ändert sich der Bezugswert des prozentualen Anteils (b_i) und die absolute Anzahl an Personenfahrten steigt. Desweiteren ist für einen festen Zielort i und zwei unterschiedliche Startorte j_1 und j_2 mit $b_{j_1} < b_{j_2}$ erkennbar, dass es mehr Personenfahrten aus j_2 als aus j_1 nach i gibt, falls die Entfernungen zwischen den Start- und dem Zielort gleich sind (hier $dist(j_1, i) = dist(j_2, i) = 0$). Die Funktion ist so gewählt worden, dass bei der Einwohnerzahl von Hannover der Wert 0.5 erreicht wird.

Die Berechnungsgrundlage der Funktionen y_{ij} und y_{ji} wird im folgenden vorgestellt.

$$y_{dist} = \begin{cases} \frac{1}{50} \cos\left(\frac{dist(i, j) \cdot \pi}{150}\right) + \frac{1}{50} & : dist(i, j) < 150 \\ 0 & : dist(i, j) \geq 150 \end{cases} \quad (4.1)$$

$$y_{ij} = 5 \cdot \left(\frac{y_{dist}}{516554}\right) \cdot (b_j - 756) \cdot \exp\left(\frac{-\log(2)}{40000} b_i\right) + \frac{5}{1000} \quad (4.2)$$

$$y_{ji} = \frac{3}{516554000} \cdot b_j + \frac{2}{1000} \quad (4.3)$$

4 Implementation eines Trassengenerators

Die Funktion y_{dist} beeinflusst die maximale Steigung und die Anfangsauslenkung der Exponentialfunktion von y_{ij} und ist in Abbildung 4.8 zu sehen. Der Anteil der Personenhinfahrten (y_{ij}) wird mit der Entfernungskomponente y_{dist} gewichtet, so dass dieser bei Entfernungen, bei denen Pendler- und Geschäftsverkehr auftritt, gegenüber Entfernungen größer als 150 km verstärkt wird. Bei Orten, deren Entfernung von einander größer gleich 150 km ist, wird der exponentielle Anteil der Funktion y_{ij} mit 0 multipliziert und es bleibt ein gewisser Grundanteil von $\frac{5}{1000}$ an der Einwohnerzahl von i . Für den Verlauf der Funktion y_{dist} wurde für Entfernungen bis 150 km die \cos -Funktion im Intervall $[0, \pi]$ verwendet, um zu gewährleisten, dass es im Entfernungsintervall $[0, 150]$ bei sehr kleinen und sehr großen Entfernungen nur eine sehr geringe Änderung der berechneten Entfernungskomponente y_{dist} gibt. Im Mittelteil werden die Entfernungen annähernd linear gewichtet.

Aus der Summe über die Anzahl der Hinreisen und Rückreisen, multipliziert mit einer Gesamtentfernungsfunktion, ergibt sich die Anzahl aller Personenfahrten von Ort i nach Ort j .

$$B(i, j) = (b_i \cdot y_{ij} + b_j \cdot y_{ji}) \cdot \left(\frac{98}{100} \cdot \exp\left(\frac{-\log(2)}{50} \cdot dist(i, j)\right) + \frac{2}{100} \right) \quad (4.4)$$

Für alle Paare von Orten (i, j) mit $i \in V$ und $j \in V$ lässt sich somit die OD-Matrix mit Nachfragewerten für einen Tag mit 24 Stunden bestimmen. Die Gesamtentfernungsfunktion aus 4.4 ist in Abbildung 4.9 dargestellt. Um die Nachfragewerte mit geringen

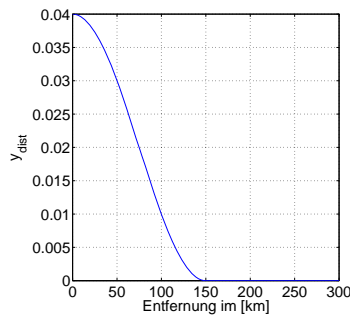


Abbildung 4.8:

Entfernungsfunktion für die Anzahl der Hinreisen

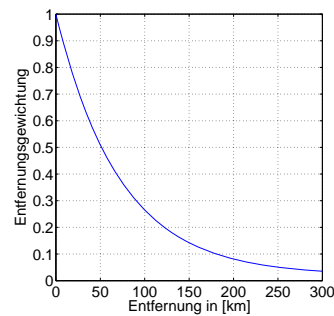


Abbildung 4.9:

Entfernungsfunktion für den Gesamttagbedarf

Entfernungen deutlich von denen mit hohen Entfernungen abzugrenzen, wurde eine Exponentialfunktion gewählt. Dadurch war es auch möglich, die Nachfragewerte ab einer Entfernung von 150 km relativ ähnlich zu gewichten, das heißt, dass die erste Ableitung der Entfernungsfunktion hier kleiner ist als bei Entfernungen unter 150km.

Vergleich der berechneten Nachfrage mit der BVWP-Nachfrage

Um festzustellen wie genau die Werte der berechnete OD-Nachfrage-Matrix die Realität widerspiegeln, werden sie mit den aufbereiteten Daten der Bundesverkehrswegeplanung

verglichen. Dafür wurden beide Matrizen in gleicher Weise als Punktraster visualisiert. Im Raster sind unterschiedlich großen Punkten unterschiedliche Nachfragewerte zugeordnet (Tabelle 4.6). Durch diese Art der Visualisierung wird nicht der exakte Wert, sondern

Tabelle 4.6: Zuordnung von Nachfrage und visualisiertem Punkt

Nachfragewerte	visualisierter Punkt	Pixelanzahl
1 - 49	.	3
50 - 149	.	5
150 - 349	.	7
350 - 749	▪	9
750 - 1549	▪	11
1550 - ...	▪	13

die Größenordnung des Nachfragewertes betont. Außerdem können dadurch einige Zahlen in der BVWP-Nachfrage, die sehr stark bei der Aufbereitung aufgrund hoher Einwohnerzahldifferenzen verzerrt wurden, etwas abgeschwächt werden. Die für den Trassengenerator berechnete Nachfragematrix wird in Abbildung 4.10 visualisiert, während die aufbereiteten Daten der Bundesverkehrswegeplanung in Abbildung 4.11 gezeigt werden. Die

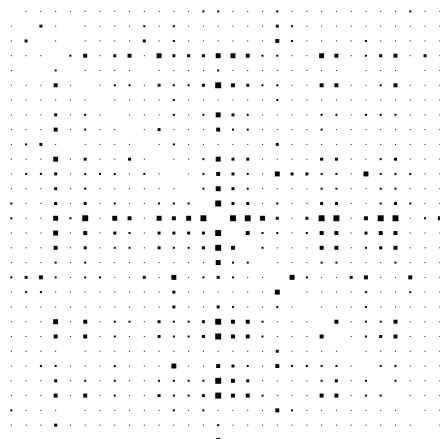


Abbildung 4.10:
Visualisierung der berechneten Nachfragewerte

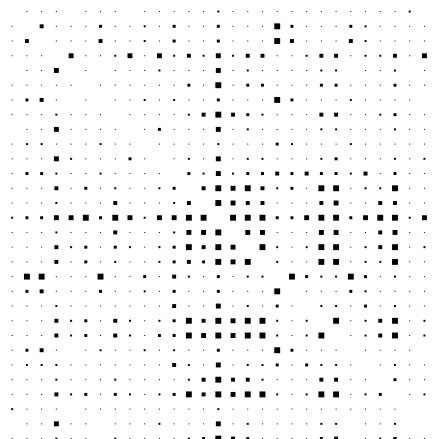


Abbildung 4.11:
Visualisierung der BVWP-Nachfragewerte

Zeilen und Spalten sind dabei in beiden Grafiken mit den alphabetisch geordneten Orten⁴ des Untersuchungsnetzes indiziert. Beide Abbildungen weisen eine ähnliche Struktur auf. Das mittig liegende Kreuz, hervorgerufen durch die Landeshauptstadt von Niedersachsen, Hannover, ist in beiden Rastern deutlich wiedergegeben. An den Häufungen der großen

⁴alphabetisch geordnet nach den Abkürzungen der Orte

4 Implementation eines Trassengenerators

Quadrate in der rechten unteren Ecke der BVWP-Nachfrage-Matrix ist zu erkennen, dass hier die Nachfrage größer ist, als mit dem entwickelten Nachfragemodell dargestellt. Hier von ist hauptsächlich das Umland von Hannover betroffen. Eine Erklärung wäre ein erhöhtes Nachfrageverhalten aufgrund der vorhandenen S-Bahn. Da es jedoch nicht in jeder Großstadt eine S-Bahn gibt, müssten gezielt für das S-Bahn-Netz die berechneten Nachfragewerte erhöht werden. Dies sollte jedoch vorher anhand von genaueren und exakteren Statistiken überprüft werden. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden die hier vorgestellten berechneten Nachfragewerte verwendet.

An dieser Stelle werden die Resultate des entwickelten Berechnungsmodells für verschiedene Entfernungskategorien visualisiert. Dazu werden Einwohnerzahlen gleichmäßig von 0 bis 500.000 in 5.000er Schritten gewählt. Die für diese Einwohnerzahlen berechneten Nachfragewerte ergeben ein gleichmäßiges Gebirge. Diese Werte sind für die unterschiedlichen Entfernungen von 20 km, 50 km, 75 km und 250 km dargestellt (Abbildungen 4.12 bis 4.15).

Nachfrage auf einen Tag verteilt

Das vorgestellte Nachfragemodell bezieht sich auf einen gesamten Tag (24 Stunden). Jedoch ist die Nachfrage tageszeitabhängig, besonders in Gebieten mit hohem Pendleraufkommen. Zwischen 6 Uhr und 9 Uhr ist der Berufsverkehr in die Großstädte gerichtet, während er am Nachmittag zwischen 15 Uhr und 18 Uhr auf die entgegengesetzte Richtung konzentriert ist. Um diese Tageszeitabhängigkeit zu integrieren, wurde die Nachfrage auf sechs gleichgroße Zeitbereiche aufgeteilt. Die Verteilung der Nachfragewerte auf die sechs Zeitbereiche ist aufgrund von fehlenden Statistiken geschätzt worden. Dabei wurde zwischen zwei verschiedenen Fällen differenziert, die Verteilung von Nachfragewerten zwischen Orten mit wenig oder gar keinem Pendlerverkehr und mit Pendlerverkehr. Der zweite Fall wird entsprechend der beteiligten Orte weiter aufgeteilt in Pendlerverkehr in eine Großstadt und Pendlerverkehr von einer Großstadt weg. Die Verteilung gemäß dieser drei Kategorien ist in Tabelle 4.7 angegeben.

Tabelle 4.7: Prozentuale Verteilung der Tagesnachfrage auf einen Tag mit sechs Zeitbereiche

Zeitbereiche in Minuten	wenig bzw kein Pendlerverkehr [%]	Pendlerverkehr zu Großstadt [%]	Pendlerverkehr von Großstadt [%]
0 - 239	5	5	5
240 - 479	25	40	15
480 - 719	20	20	10
720 - 959	15	15	20
960 - 1199	25	10	40
1200 - 1440	10	10	10

4.4 Nachfrageberechnung

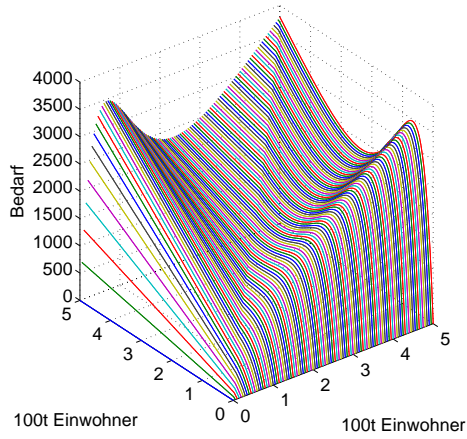


Abbildung 4.12:
Berechnete Bedarfswerte bei einer festen Entfernung von 20 km

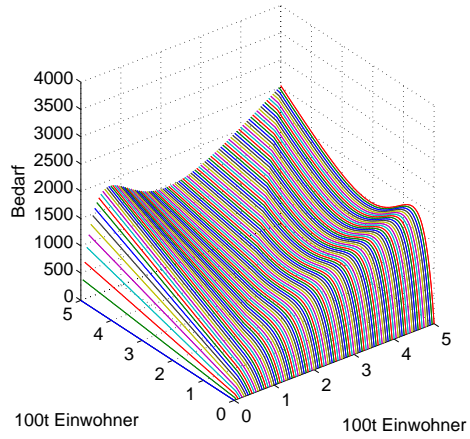


Abbildung 4.13:
Berechnete Bedarfswerte bei einer festen Entfernung von 50 km

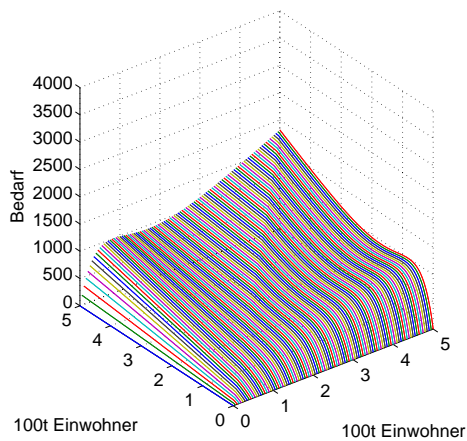


Abbildung 4.14:
Berechnete Bedarfswerte bei einer festen Entfernung von 75 km

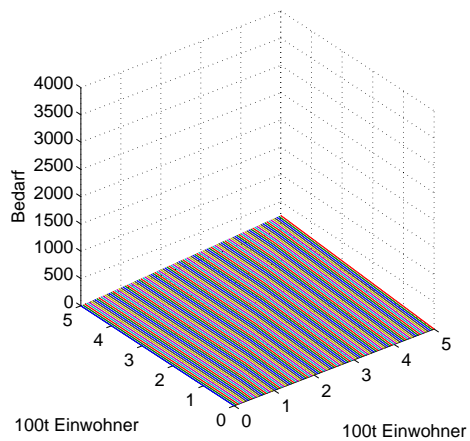


Abbildung 4.15:
Berechnete Bedarfswerte bei einer festen Entfernung von 250 km

4.4.2 Nachfragebestimmung im SGV

Wie bereits erwähnt, ist die Nachfragebestimmung im Schienengüterverkehr sehr komplex und es liegen keine Referenzdaten vor. Daher ist es wichtig, ein einfaches und überschaubares Berechnungsmodell zu entwickeln. Im Untersuchungsnetz gibt es 20 Orte, die für den Gütertransport per Schiene überhaupt in Frage kommen, da dort das Vorhandensein eines Güterbahnhofs gesichert ist.⁵ Diese Orte sind in der Tabelle A.3 im Anhang aufgelistet. Die Menge der Orte, die einen Güterbahnhof besitzen wird mit V_{Gbh} bezeichnet. Analog zu den Einwohnerzahlen im Schienenpersonenverkehr stützt sich im Schienengüterverkehr die Nachfrageberechnung auf die Beschäftigtenzahl im Bereich Verarbeitendes Gewerbe sowie Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden des entsprechenden Ortes. Die Beschäftigtenzahl eines Ortes $i \in V_{Gbh}$ wird im folgenden mit ind_i notiert.

Im Allgemeinen ist die Gütertransportnachfrage nicht symmetrisch. Werden beispielsweise Produkte in ein Fertigstellungswerk transportiert, gibt es dort nicht notwendigerweise Güter, die wieder zurücktransportiert werden müssen. Aus dem gleichen Grund muß bei der Nachfrageberechnung im SGV genauer zwischen Start- und Zielorten differenziert werden als im SPV, da auch kleine Orte mit wenig Beschäftigten als Startort für einen Gütertransport fungieren können. Als Zielorte kommen jedoch nur größere Orte in Frage, denn die transportierten Güter werden am Zielort zum Beispiel weiterverarbeitet, vertrieben oder weitertransportiert. Diese Möglichkeiten bieten sich vorwiegend in großen Städten. Aus diesem Grund werden zwei verschiedene Schwellwerte für die Beschäftigtenanzahl eingeführt, die die Orte mit Güterbahnhöfen als Start- beziehungsweise Zielbahnhof charakterisieren, $s_{start} = 2500$ und $s_{ziel} = 9500$. Ein Ort $i \in V_{Gbh}$ mit der Beschäftigtenzahl ind_i wird als Start- beziehungsweise Zielort verwendet, wenn die zugehörige Beschäftigtenzahl den entsprechenden Schwellwert übersteigt,

$$i \text{ ist Startort, falls } ind_i > s_{start} \quad (4.5)$$

$$i \text{ ist Zielort, falls } ind_i > s_{ziel}. \quad (4.6)$$

Für zwei beliebige Orte $i \in V_{Gbh}$ und $j \in V_{Gbh}$, deren zugehörige Beschäftigtenzahlen die Schwellwertbedingungen 4.5 und 4.6 erfüllen, so dass i der Start- und j der Zielbahnhof ist, wird die Gütertransportnachfrage mit $GB(i, j)$ bezeichnet und hat die Einheit Tonnen. $GB(i, j)$ beschreibt die Menge an Gütern, die innerhalb eines Tages (24 Stunden) von Ort i nach j mit einem Güterzug zu transportieren ist. Diese Nachfragewerte werden aus Gründen der Überschaubarkeit und Vereinfachung unabhängig von Wirtschaftszweigen betrachtet.

Berechnung

Für die Berechnung von $GB(i, j)$ wird zuerst die Menge an Gütern bestimmt, die in i zum Transport bereit steht. Sie sei mit $G(i)$ bezeichnet. Diese Gütermenge wird anschließend

⁵Das Vorhandensein von Güterbahnhöfen wurde auf der Webseite <http://diium.bahn-net.de/diium/index.jsp> überprüft.

auf alle Orte aus V_{Gbh} , die die Schwellwertbedingung für den Zielort erfüllen, anteilig bezüglich der zugehörigen Beschäftigtenzahl aufgeteilt. Die Gütermenge $G(i)$ im Startort i wird mit folgender Formel geschätzt.

$$G(i) = (5208 \cdot \ln(ind_i + 1000)) - 35649 \quad (4.7)$$

Mit dieser Funktion wird erreicht, dass die Ableitung für Orte mit größeren Beschäftigtenzahlen kleiner ist als eine lineare Funktion, die durch den Punkt (0,0) geht und bei der Beschäftigtenzahl von Hannover den Wert 20.000 annimmt. Dadurch liegen die Funktionswerte dichter zusammen. Diese für den Startort i berechneten Gütermengen werden anschließend auf alle anderen Orte, die die Schwellwertbedingung 4.6 erfüllen und somit als Zielort in Frage kommen, gemäß ihrer Beschäftigtenanzahl aufgeteilt.

$$GB(i, j) = \frac{G(i) \cdot ind_j}{\sum_{\substack{k \in \text{Zielorte} \\ k \neq i}} ind_k} \quad (4.8)$$

Die so berechneten Gütermengen als Nachfragewerte im Untersuchungsnetz sind in Abbildung 4.16 visualisiert.

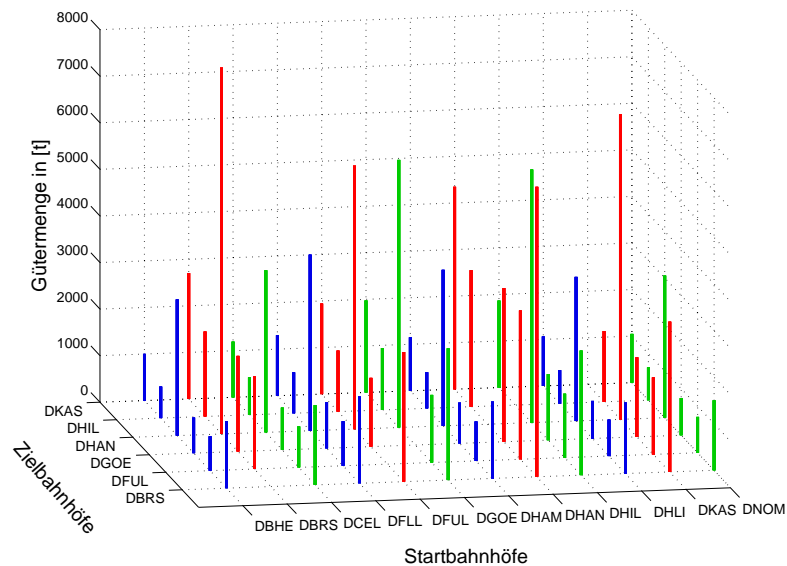


Abbildung 4.16: Berechnete Güternachfrage im SGV

Vergleich mit Gütertransportmengen der BVWP

In der Bundesverkehrswegeplanung werden Gütertransportmengen für die Zonen Braunschweig, Fulda, Göttingen, Hannover, Hildesheim und Kassel angegeben. Die Größe dieser Zonen ist leider nicht bekannt, auch der Lieferant dieser Daten (der Projektpartner FG

4 Implementation eines Trassengenerators

Schienenfahrwege und Bahnbetrieb der TU Berlin) konnte dabei nicht weiterhelfen. Demzufolge ist ein Vergleich dieser Werte mit denen des entwickelten Modells schwierig. Aus diesem Grund sind die Nachfragewerte an dieser Stelle zwar angegeben, aber es wird nicht näher darauf eingegangen. Die aufbereiteten Zahlen der BVWP sind in Tabelle 4.8 und die Gütertransportmengen des SGV-Nachfragemodells in Tabelle 4.9 angegeben.

Tabelle 4.8:

Tagesnachfrage der Gütertransportmengen der BVWP in Tonnen, bezogen auf die Verkehrszonen

	DBRS	DFUL	DGOE	DHAN	DHIL	DKAS
DBRS	172022	1240	3233	78045	6968	14166
DFUL	943	3096	1296	20141	12859	5860
DGOE	9267	89	6054	12585	6807	4024
DHAN	34164	100	1545	48714	15129	3649
DHIL	19093	0	37	1031	5072	116
DKAS	15663	4838	559	37603	13541	36938

Tabelle 4.9:

Berechnete Tagesnachfrage der Gütertransporte in Tonnen bezogen auf die Städte

	DBRS	DFUL	DGOE	DHAN	DHIL	DKAS
DBRS	0	1986	2053	7866	1823	2702
DFUL	2784	0	1476	5657	1311	1943
DGOE	2828	1451	0	5746	1332	1974
DHAN	6227	3194	3301	0	2932	4346
DHIL	2675	1372	1418	5435	0	1867
DKAS	3225	1654	1710	6551	1519	0

4.4.3 Nachfragebestimmung für das Umland – SNOW-Knoten

Nachdem die Nachfrageberechnung für den SPV und den SGV innerhalb des Trassenbörsenetztes vorgestellt wurde, soll an dieser Stelle noch die sehr einfach gehaltene Nachfrageberechnung für den SPV und den SGV der Umlandsknoten beschrieben werden. Im SPV werden für die SNOW-Knoten konstante Einwohnerzahlen verwendet. Die Nachfrage für zwei beliebige SNOW-Knoten wird aus der Summe der zugehörigen Einwohnerzahlen und einem Skalierungsfaktor berechnet. Der vom Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb aus dem Kursbuch erstellte Fahrplan ergab, dass sich die Verkehrsströme hauptsächlich auf Nord-Süd- (Süd-Nord-) und Ost-West- (West-Ost-)Achsen befinden, wobei die Nord-Süd-Richtung gegenüber der Ost-West-Richtung dominiert. Aus dem Grund wurden die zugehörigen Nachfragewerte gegenüber den anderen SNOW-Knoten-Kombinationen höher bewertet. Für die Erzeugung von Trassengeboten, deren Start- und Zielorte außerhalb des Teilnetzes liegen, wurden die Einwohnerzahlen der SNOW-Knoten auf 1.000.000 und die Skalierungsfaktoren für die Nord-Süd-Richtungen auf 0.001, für die Ost-West-Richtungen auf 0.00075 und für alle anderen Kombinationen auf 0.0005 geschätzt. Damit wird bei der Liniengenerierung erreicht, dass es unter solchen Trassenwünschen mehr Trassen gibt, die das Netz in Nord-Süd- beziehungsweise Ost-West-Richtung durchfahren wollen. Um ein anderes Verhalten zu erzielen, müssen die Einwohnerzahlen der SNOW-Knoten oder die Skalierungsfaktoren entsprechend geändert werden.

Im SGV wurde die zugehörige Güternachfragematrix ähnlich erstellt wie im SPV. Die Beschäftigtenzahlen der SNOW-Knoten ist auf 50.000 geschätzt worden. Die Einträge der Nachfragematrix berechnen sich analog. Für die Nord-Süd- und Ost-West-Richtung wird die Summe der zugehörigen Beschäftigtenzahlen mit dem Faktor 0.1 und bei allen anderen Kombinationen mit 0.05 multipliziert.

4.4.4 Einsatz der Nachfragematrizen

Für den SPV gibt es zum einen sechs Nachfragematrizen, deren Werte sich auf die Zeitbereiche eines Tages beziehen. Werden die Zeitbereiche mit T_1, \dots, T_6 bezeichnet, so werden die Nachfragematrizen mit B_{T_m} für $m = 1, \dots, 6$ notiert. Zum anderen gibt es die OD-Matrix B mit Werten für einen gesamten Tag. Die Einträge dieser Matrix werden im Verlauf der Trassengenerierung verändert. Für jede generierte Trasse wird die damit befriedigte Nachfrage in der Matrix B abgezogen. Um diese Aktualisierung zu verdeutlichen, wird die Matrix im weiteren Verlauf mit \tilde{B} bezeichnet. Die Gütertransportmengen im SGV sind nicht tageszeitabhängig. Folglich gibt es für den Güterverkehr eine statische Matrix GB mit Gütermengen, die auf einen Tag bezogen sind und eine Matrix \tilde{GB} , die anfangs die gleichen Werte enthält, aber nach jeder erzeugten Gütertrasse aktualisiert wird. Für die SNOW-Knoten gibt es jeweils eine Matrix für den SPV und eine für den SGV, die nach Trassengenerierungen angepasst werden. Die statischen Matrizen werden für die Berechnung der maximalen Zahlungsbereitschaft benötigt, während die veränderlichen Nachfragematrizen zur Linienerstellung verwendet werden.

Nach jeder Trassengenerierung, gleich ob es sich dabei um eine Einzeltrasse oder eine Trasse in einem Takt handelt, werden die betroffenen OD-Nachfrage-Matrizen angepasst. Dabei wird die Nachfrage geschätzt, die durch eine Realisierung der Trasse befriedigt werden kann. Auf diese Nachfragewerte stützt sich ebenfalls das erlösorientierte Gebotsmodell. Für eine detailliertere Behandlung der zu schätzenden Nachfrage sei auf die Ausführungen des Gebotsmodells in Kapitel 4.6 verwiesen.

4.5 Verfahren zur Liniengenerierung

Der Verlauf der Trasse wird im Trassengebot durch einen Start- und einen Zielbahnhof spezifiziert und kann optional durch Zwischenhalte verfeinert werden. Die Bestimmung des Verlaufs oder auch Linie der Trasse wird an dieser Stelle erläutert. Insgesamt sind vier Verfahren zur Liniengenerierung in den Trassengenerator integriert worden. Dazu gehört ein Verfahren, das auf einem minimal aufspannenden Baum basiert, ein Verfahren, das einen maximal aufspannenden Baum verwendet, ein Greedy-Verfahren und ein Point-to-Point-Verfahren. Das Verfahren unter Verwendung eines maximal aufspannenden Baumes wurde in Anlehnung an ein Tool zur Linienplanung der Deutschen Bahn gewählt (PRO-SA/prosimExpresß [22]), das ebenfalls auf einen maximal aufspannenden Baum basiert. Die einzelnen Verfahren werden im Folgenden erläutert.

4.5.1 Liniengenerierung unter Verwendung eines minimal aufspannenden Baumes

Der das Bahnnetz repräsentierende Graph $G = (V, E)$ aus Kapitel 3.1.1 kann als ungerichteter Graph angesehen werden, da zu jeder gerichteten Kante eine Kante in die entgegengesetzte

4 Implementation eines Trassengenerators

setzte Richtung mit der gleichen Kantenlänge existiert. Dieser Graph bildet zusammen mit den Kantenlängen $dist : E \rightarrow \mathbb{N}$ eine Instanz für das Minimum-Spanning-Tree-Problem. Die Aufgabe besteht darin, einen aufspannenden Baum im zusammenhängenden Graphen G zu finden, so dass die Summe der Kantenlängen im Baum minimal ist. Anhand der Blätter dieses Baumes und ihrem eindeutigen Pfad zur Wurzel können mehrere Trassenlinien generiert werden. Die Bestimmung des minimal aufspannenden Baumes in G erfolgt mit dem Algorithmus von Prim, der eine Laufzeit von $\mathcal{O}(n^2)$ hat, wobei n der Anzahl der Knoten im Graphen entspricht. Unter Verwendung von Fibonacci Heaps ist sogar eine Laufzeit von $\mathcal{O}(m + n \log n)$ möglich. Neben dem Graphen G kann auch jeder induzierte Untergraph G_R , wobei R die Knotenmenge einer der in Abbildung 4.2 dargestellten Regionen ist, mit den zugehörigen Kantenlängen als Instanz für das Minimum-Spanning-Tree-Problem dienen.

Für die Linienbestimmung gibt es abhängig von den übergebenen Netzdaten zwei Möglichkeiten. Zum einen kann dieses Verfahren den minimal aufspannenden Baum auf dem von einer übergebenen Knotenmenge V_R induzierten Untergraphen $G_R(V_R, E_R)$, der zusammenhängend sein muss, bestimmen. Zur Linienherzeugung werden sukzessiv zwei Blätter miteinander kombiniert, bei ungerader Anzahl wird die Wurzel mit hinzugenommen. Bezüglich zweier Blätter wird der Weg im Baum gesucht, der beide Blätter miteinander verbindet und keine Knoten doppelt durchläuft. Zum anderen wird in jedem Fall der minimal aufspannende Baum im Gesamtgraphen G bestimmt und die übergebene Knotenmenge beeinflusst die anschließende Linienauswahl im Baum. Hierbei wird zu jeder möglichen Kombination von Blättern der Weg im Baum gesucht, der beide verbindet und keine Knoten doppelt besucht. Zu jedem dieser Wege wird überprüft, ob mindestens drei Knoten der übergebenen Knotenmenge durchlaufen werden. Ist dies der Fall, wird mindestens eine Trasse mit dieser Linie generiert. Entsprechend dem zu realisierenden Zugtyp werden die Zwischenknoten der Trassenlinien gefiltert, so dass es auf der Linie nur Zwischenhalte gibt, an denen der Zugtyp berechtigt ist zu halten (siehe Tabelle A.3 im Anhang). Während die zweite Möglichkeit vorwiegend für die Trassengenerierung der Verkehrsträger Intercity-express und Intercity vorgesehen ist, konzentriert sich die erste Möglichkeit hauptsächlich auf die S-Bahn, die Regionalbahn und den Regionalexpress. Mit diesem auf einem minimal aufspannenden Baum basierenden Verfahren werden in der Regel mehrere Trassenlinien und somit Trassengebote gleichzeitig bestimmt. Das Verfahren kann beispielsweise dafür genutzt werden, einen Regionalverkehrsanbieter zu simulieren, der auf Trassen bietet, die in einem bestimmten Gebiet einen Großteil des gesamten Regionalverkehrs abdecken. Für den Benutzer gibt es beim Aufruf des Verfahrens eine Möglichkeit den Verlauf der Trassenlinien etwas zu beeinflussen, indem die Wurzel des minimal aufspannenden Baumes vorgegeben werden kann.

4.5.2 Liniengenerierung unter Verwendung eines maximal aufspannenden Baumes

Anders als bei der Verwendung eines minimal aufspannenden Baumes kann beim Aufruf dieses Verfahrens nur eine Trassenlinie erzeugt werden. Dazu wird ein maximal aufspannender Baum benutzt. Auf der Instanz eines ungerichteten Graphen mit reellen Kantengewichten wird der aufspannende Baum gesucht, der maximales Gewicht besitzt. Als Instanzen für die Trassenlinienerzeugung kommen der Gesamtgraph $G(V, E)$ und jeder durch eine Region aus Abbildung 4.2 induzierte zusammenhängende Untergraph $G_R(V_R, E_R)$ verbunden mit folgenden Kantengewichten in Frage.

Für die Kantengewichte $b : E \rightarrow \mathbb{R}$ werden die Werte der aktualisierten OD-Nachfrage-Matrix auf die Kanten in E nach dem System-Split-Verfahren umgerechnet. Für Anfangskantengewichte von $b(e) = 0$ für alle $e \in E$ wird zu jedem Matrixeintrag $B(i, j)$ mit $i, j \in V$ der Wert zu den Kantengewichten der Kanten auf dem kürzesten Weg $P_{KW} = (i, \dots, j)$ von i nach j aufaddiert, so dass gilt

$$b(e) = \sum_{\substack{i, j \in V \\ \text{mit } e \text{ liegt auf} \\ P_{KW} = (i, \dots, j)}} B(i, j) \quad \text{für alle } e \in E. \quad (4.9)$$

Zu den berechneten Kantengewichten $b : E \rightarrow \mathbb{R}$ wird auf dem übergebenen Untergraphen G_R von G der maximal aufspannende Baum ermittelt. Nachdem die Kantengewichte geeignet modifiziert werden

$$b(e) = b_{max} - b(e) \quad \text{für alle } e \in E(G_R), \quad (4.10)$$

wobei $b_{max} = \max_{e \in E(G_R)} \{b(e)\},$

kann der Algorithmus von Prim verwendet werden. Der erzeugte Baum ist mit den unmodifizierten Kantengewichten der maximal aufspannende Baum T zu G_R .

Zu allen Blättern $l \in V(T)$ wird anschließend gemäß dem zu realisierenden Zugtyp $z \in Y$ die Wegnachfrage $B : V(T) \rightarrow \mathbb{R}$ auf dem eindeutigen Pfad zur Wurzel nach der Formel 4.11 berechnet. Für jedes Blatt $l \in V(T)$ sei der Pfad von l zum Wurzelknoten w mit $P_l = (p_1, \dots, p_k)$ bezeichnet, wobei $p_1 = l, p_k = w$ und k die Anzahl der Knoten auf P_l entspricht.

$$B(l) = \sum_{\substack{p_i, p_j \in P_l, \\ \text{wobei } z \text{ das Recht hat} \\ \text{in } p_i \text{ und } p_j \text{ zu halten}}} \tilde{B}(p_i, p_j) \quad \text{für alle Blätter } l \in V(T) \quad (4.11)$$

Bezüglich der Wegnachfragen B der Blätter von T kann eine Trassenlinie bestimmt werden. Anwenderabhängig kann zum einen eine Trassenlinie vom Blatt mit der höchsten Wegnachfrage zur Wurzel von T generiert werden und zum anderen kann eine Linie zwischen den zwei Blättern mit der höchsten Wegnachfrage entlang der Baumstruktur ohne

Knotenwiederholungen erzeugt werden. Abhängig vom Zugtyp z werden die Halte und Zwischenhalte der gefundenen Trassenlinie gemäß der Berechtigung von z gefiltert. Bei diesem Verfahren ist es dem Benutzer ebenfalls möglich den Wurzelknoten vorzugeben und somit die Struktur und damit die Trassenlinien zu beeinflussen.

4.5.3 Greedy-Verfahren

Dieses Verfahren verwendet eine andere Herangehensweise als die bisher vorgestellten Modelle. Die Trassenlinien werden über die Gesamtnachfrage der Orte im Untersuchungsnetz und der aktualisierten OD-Nachfrage-Matrix \tilde{B} ausgewählt. Die Gesamtnachfrage der Orte entspricht der zugehörigen Zeilensumme in der Matrix \tilde{B} .

Das Greedy-Verfahren arbeitet auf der übergebenen Knotenmenge, die zum einen $V(G)$ oder eine Teilmenge von $V(G)$ sein kann, zum Beispiel die Menge der rot oder orange gekennzeichneten Städte für den Interregional- beziehungsweise Fernverkehr. Diese Knotenmenge sei mit K bezeichnet. Beim Aufruf des Verfahrens muss der Anwender die Anzahl n der zu spezifizierenden Halte (Knoten) festlegen, die den Verlauf der Trassenlinie bestimmen sollen, dabei muss $n \leq |K|$ sein. Bei der Auswahl der n Knoten wird stets die Berechtigung des zu realisierenden Zugtyps berücksichtigt. Der erste der n zu wählenden Orte aus der übergebenen Knotenmenge, ist derjenige Knoten aus K , der die größte Gesamtnachfrage hat. Dieser sei mit v_1 notiert. Alle weiteren Orte v_2, \dots, v_n werden wie folgt ausgesucht:

$$v_k \in K, \text{ so dass } \tilde{B}(v_{k-1}, v_k) = \max_{v \in K} \tilde{B}(v_{k-1}, v) \quad \text{für } k = 2, \dots, n. \quad (4.12)$$

Um für diese Orte einen geeigneten Linienverlauf zu bestimmen, wird das Drilling-Problem gelöst. Zu den gewählten n Knoten wird im Graphen G genau der Weg gesucht, der alle n Knoten besucht und die kürzeste Entfernung besitzt. Diese Trassenlinie wird mit dem Path-Enumeration-Algorithmus bestimmt (siehe Seite 3 in [19]), der zu jeder Permutation der n Orte die zugehörige Weglänge bestimmt und somit die gesuchte Linie findet. Der Path-Enumeration-Algorithmus besitzt eine Laufzeit von $\mathcal{O}(n^2 n!)$. Da hier jedoch aufgrund der Bahnnetzgröße nur sehr kleine Werte für n verwendet werden (für die nachfolgenden Experimente ist $n \leq 5$), ist die Laufzeit akzeptabel.

Die durch die n permutierten Knoten spezifizierte Trassenlinie wird, soweit möglich, noch durch zusätzliche Zwischenhalte gemäß der Zugtypberechtigung ergänzt. Dies geschieht auf den Zwischenabschnitten der erzeugten Linie zwischen den benachbarten Knoten. Für jedes Paar benachbarter Knoten werden auf dem zugehörigen kürzesten Weg, falls möglich, zusätzliche Halte ausgewählt, was die Trassenliniengenerierung somit beendet.

Die Liniengenerierung von der aktualisierten OD-Nachfrage-Matrix abhängig zu machen wie beim Greedy-Verfahren und bei dem auf einem maximal aufspannenden Baum basierenden Verfahren hat folgende Vorteile. Zum einen werden Trassenlinien gewählt, die große Städte bedienen und damit eine hohe Nachfrage befriedigen. Auf diesen Linien halten die Züge auch an allen Zwischenbahnhöfen, sofern der zugehörige Zugtyp die

Berechtigung dazu hat, folglich auch an kleineren Orten. Zum anderen werden nach einer entsprechenden Anzahl von erzeugten Trassen auch kleinere Orte mit einer geringeren Gesamtnachfrage berücksichtigt, da die Nachfragewerte für jede generierte Trasse aktualisiert werden. Durch die Einbeziehung der Nachfragewerte wird erreicht, dass Orte mit höherer Nachfrage häufiger berücksichtigt werden als Orte mit geringer Nachfrage.

4.5.4 Point-to-Point-Verfahren

Das Point-to-Point-Verfahren ist eine sehr einfache Methode Trassenlinien zu generieren. Basierend auf einer übergebenen Knotenmenge K und dem übergebenen Zugtyp werden hier über eine zufällige gleichverteilte Komponente Start- und Zielort aus der Knotenmenge K gewählt, wobei die Zugtypberechtigungen eingehalten werden.

Mittels diesem einfachen Verfahren können Verkehrsanbieter simuliert werden, die beispielsweise auf bestimmten Strecken sehr schnelle Verbindungen für den Geschäftsverkehr anbieten. Werden die in Abbildung 4.2 gekennzeichneten Großstädte übergeben, können Trassenlinien generiert werden, die eine sehr hohe Nachfrage befriedigen. Bedingt durch keine Zwischenhalte kann der Verkehrsanbieter hier sehr attraktive Reisezeiten erreichen.

4.5.5 Liniengenerierung für Trassen, deren Start- und Zielorte außerhalb des Untersuchungsnetzes liegen

Da die wirklichen Start- und Zielbahnhöfe dieser Trassen außerhalb des Teilnetzes liegen, wird für die Liniengenerierung der Ort, an dem die Trasse in das Untersuchungsnetz eintritt, als Startort gewählt, unabhängig der Berechtigung des zugehörigen Zugtyps. Analog wird als Zielort der letzte Ort auf der Trassenlinie gewählt, der gerade noch im Untersuchungsnetz liegt. Auch wenn der Zug an diesen Orten nicht halten kann, so benutzt er trotzdem zu diesen Orten inzidente Gleisabschnitte. Folglich müssen an diesen Stellen auch Orte ohne Halteberechtigung für den gewählten Zugtyp als Start- und Zielbahnhof zugelassen werden.

Zur Liniengenerierung von Trassen, deren eigentliche Start- und Zielorte außerhalb des Untersuchungsnetzes liegen, werden die bereits vorgestellten SNOW-Knoten und die zugehörigen aktualisierten Nachfragematrizen für den SPV und den SGV verwendet. Hierfür kann nur ein Verfahren gewählt werden, dass auf die aktualisierten Nachfragematrizen basiert, um zu gewährleisten, dass die Nord-Süd- und Ost-West-Richtungen gegenüber den anderen Kombinationen bevorteilt werden. Bei der Verwendung eines minimal aufspannenden Baumes kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Blätter des Baumes am Bahnnetzrand liegen, beziehungsweise zu den Knoten gehören, die mit den SNOW-Knoten verbunden sind (siehe Tabelle 4.5). Folglich wird zur Liniengenerierung basierend auf SNOW-Knoten das Greedy-Verfahren genutzt.

Das Greedy-Verfahren arbeitet auf der SNOW-Knotenmenge mit einer Halteanzahl von

4 Implementation eines Trassengenerators

zwei. Der erste SNOW-Knoten wird gemäß der höchsten Gesamtnachfrage gewählt, während der zweite Knoten über den größten Eintrag aus der Zeile des ersten SNOW-Knoten in der aktualisierten Nachfragematrix ausgesucht wird. Anschließend werden zu beiden SNOW-Knoten unterschiedliche, adjazente Bahnnetzknotten zufällig (gleichverteilt) gewählt, die als Start- und Zielort in der Trassenspezifikation gelten. Das Greedy-Verfahren bestimmt auf den Abschnitten zwischen den linienspezifizierenden Halten zusätzliche Zwischenstops. Falls es sich um die Generierung einer SPV-Trasse handelt, werden bezüglich des kürzesten Weges zwischen dem Start- und Zielort Zwischenhalte, die der Zugtypberechtigung entsprechen müssen, ergänzt. Für die generierte Trassenlinie werden die SNOW-Nachfragematrizen aktualisiert und im Falle einer SPV-Trasse auch die Nachfragematrix \tilde{B} . Die Erzeugung einer SGV-Trasse mittels SNOW-Knoten hat keinen Einfluss auf die aktualisierte Güternachfragematrix \tilde{GB} der Bahnnetzknotten, denn die wirklichen Start- und Zielorte liegen außerhalb des Teilnetzes.

4.5.6 Liniengenerierung für den SGV innerhalb des Bahnnetzes

Unter der Annahme, dass Güterverkehrstrassen linientechnisch nur durch einen Start- und einen Zielbahnhof definiert werden und keine Zwischenhalte benötigen, werden nur die Verfahren Greedy und Point-to-Point in Betracht gezogen. Zur Liniengenerierung im SGV muss das Greedy-Verfahren mit der aktualisierten Güternachfragematrix aufgerufen werden. Die Anzahl der Linienspezifizierenden Orte ist auf 2 festgesetzt. Gemäß der Gütergesamtnachfrage und der aktualisierten Güternachfragematrix werden Start- und Zielort bestimmt und keine zusätzlichen Zwischenhalte ergänzt. Bei der Auswahl der Start- und Zielknotten wird sowohl beim Greedy- als auch beim Point-to-Point-Verfahren das Vorhandensein eines Güterbahnhofes in den Orten gemäß Tabelle A.3 berücksichtigt. Da es bei der Spezifizierung von SGV-Trassen im Allgemeinen weniger Vorgaben gibt als bei SPV-Trassen, sind die Gütertrassen flexibler in der genauen Wahl der Trassenlinie, die folglich dem ganzzahligen Programm des OPTRA-Modells überlassen wird.

4.6 Gebotsmodelle

Zur Berechnung der maximalen Zahlungsbereitschaft einer Trasse sind zwei Modelle implementiert worden. Zum einen ein entfernungsbasiertes Modell, das sich soweit dies mit dem Trassenbörsemmodell zu vereinbaren war, an dem aktuellen Trassenpreissystem (TPS) 2005 der Deutschen Bahn anlehnt. Zum anderen ein nachfrageabhängiges Modell, das sich auf die mit einer Trasse zu erzielenden Erlöse stützt.

TPS-orientiertes Gebotsmodell

Die folgenden Informationen zur Vorstellung des TPS 2005 sind der Quelle [23] entnommen. Bei der Inanspruchnahme von Trassenprodukten der DB Netz AG wird der zu ent-

richtende Preis nach folgender Formel berechnet.

Preiskomponenten:	
1. Streckenkategorie und Auslastung	→ Grundpreis
2. Trassenprodukte	→ Produktfaktor
3. Zu- und Abschläge	→ Sonderfaktoren
Formel für den Trassenpreis:	
Grundpreis	
× Produktfaktor	
× Sonderfaktoren (Dampflokfahrt, Lademaßüberschreitung, Sonderzuganmeldung)	
× Regionalfaktor	
+ Sonderfaktoren (Gewichtsklasse, Radsatzlast, Neigetechnik)	
<hr/>	
=	Trassenpreis (je Trkm)
<i>Quelle: Modulares Trassenpreissystem 2005</i>	

DB Netz AG teilt alle Gleisabschnitte des Bahnnetzes nach infrastruktureller Ausrüstung und verkehrlicher Bedeutung in 12 verschiedene Streckenkategorien ein. Jeder Streckenkategorie wird dabei ein bestimmter Grundpreis (siehe [23], Seite 4) zugeordnet, der, falls die Strecke sehr stark befahren ist, um 20% erhöht wird. Der Trassengrundpreis ergibt sich somit aus der Summe der Gleisabschnittslängen multipliziert mit dem zugehörigen Grundpreis. Der Produktfaktor in der Preisformel richtet sich nach dem nachgefragten Trassenprodukt. Zu den Trassenprodukten im SPV und SGV gehören:

1. *Personenverkehrs-Express-Trasse*: schnelle und direkte Anbindung von Ballungszentren, Vorrang bei Planung und Durchführung
2. *Personenverkehrs-Takt-Trasse*: für Takte (mindestens drei Zugpaare), Vorrang gegenüber anderen Verkehren außer Expressprodukten
3. *Personenverkehrs-Economy-Trasse*: günstiges Produkt für Nicht-Takt-Verkehre
4. *Personenverkehrs-LZ-Trasse*: Überführungsfahrten z. B. im Schadensfall
5. *Güterverkehrs-Express-Trasse*: für schnelle und direkte Verbindungen, Vorrang gegenüber anderen Güter- und Personenverkehren außer 1
6. *Güterverkehrs-Standard-Trasse*: für alle Güterzüge verfügbar
7. *Güterverkehrs-LZ-Trasse*: Überführungsfahrten z. B. im Schadensfall
8. *Güterverkehrs-Zubringer-Trasse*: zur Überführung beladener und leerer Einzelwagen.

Die Produkte 4, 7 und 8 bleiben aufgrund der fehlenden Personen- oder Güterbeförderungszwecke im Rahmen der Trassengenerierung zur Durchführung einer kombinatorischen Auktion unberücksichtigt. Ebenso wird auch auf Sonder- und Regionalfaktoren verzichtet, da bei der Modellierung des Trassenbörsegutes auf keine Sonderleistungen wie

4 Implementation eines Trassengenerators

beispielsweise Lademaßüberschreitung eingegangen wurde und die bezüglich der Regionalfaktoren betroffenen Regionalnetze nicht das Untersuchungsnetz tangieren.

Für die Implementierung des TPS 2005 sind alle Gleisabschnitte des Hannover-Fulda-Teilnetzes entsprechend den Streckenkategorienkarten [24], [25] und [26] mit den Grundpreisen⁶ des TPS versehen worden. Bei Trassen, deren Linie nicht eindeutig vorgegeben ist, werden für die Grundpreisberechnung die Kanten der „billigsten“ Strecke unter allen zulässigen Linien verwendet. Der erhöhte Produktfaktor bei den Express-Trassen kann nicht durch eine Bevorteilung gegenüber anderen Verkehren erklärt werden. Demzufolge wurde schnellen Trassen (das heißt Zugtypen IC und ICE), die keinen Takt bilden und mindestens drei Großstädte (orange Orte in Abbildung 4.2) verbinden, der Faktor der Personen-Express-Trasse zugeordnet. Bei Taktzügen (mindestens drei Züge) wird der Trassenpreis mit dem Produktfaktor der Personenverkehrs-Takt-Trasse multipliziert. Alle anderen Trassengebote des SPV zählen als Personenverkehrs-Economy-Trasse. Im SGV gibt es die Unterscheidungen zwischen Express- und Standard-Trasse. Eine Güterverkehrstrasse wird als Express-Trasse gewertet, falls die vom Verkehrsanbieter geschätzte Fahrtdauer geringer ist als die kürzest mögliche Fahrtdauer plus 15%. Alle anderen Gütertrassen werden als Standardtrasse gezählt. Die Zahlungsbereitschaft für eine Trasse wird anhand der Formel im TPS 2005 bestimmt.

Erlösorientiertes Gebotsmodell

Für die Berechnung der maximalen Zahlungsbereitschaft einer SPV-Trasse wird der Wert zugrunde gelegt, der an den Verkehrsanbieter für einen Personenkilometer gezahlt wird. Dieser Wert ist zugtypabhängig und muss beim Aufruf der Funktion zur Generierung einer Trasse übergeben werden. Aus diesen Personenkilometereinnahmen multipliziert mit der geschätzten Anzahl der Personenkilometer und einem konstanten Faktor, geteilt durch die Anzahl der Trassenhalte, ergibt sich die maximale Zahlungsbereitschaft ZB für eine Trasse. Für die Anzahl der Personenkilometer werden die Personenfahrten in den entsprechenden Zeitbereichen auf der Trassenlinie $P = (p_1, \dots, p_n)$ zum Zugtyp z folgendermaßen geschätzt und mit ihrer Länge multipliziert

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \min\{B_{T_m}(p_i, p_j), \text{Sitzplätze}(z) \cdot k\} \cdot \text{dist}(p_i, p_j), \quad (4.13)$$

wobei $m \in \{1, \dots, 6\}$, so dass die Abfahrtszeit von p_i nach p_j in dem Zeitbereich T_m liegt. Da die Einträge in der Nachfragematrix nicht zugtypabhängig sind und Reisende bekanntlich unterschiedliche Präferenzen bezüglich der Zugtypen haben, dürfte nur der Teil der Nachfrage verwendet werden, der zum betroffenen Zugtyp z gehört. Folglich wird hier eine Minimumsbildung aus der Personenfahrtennachfrage in den entsprechenden Zeitbereichen und einem Anteil der Sitzplätze von z vorgenommen. Dazu werden die Sitzplatzzahlen aus

⁶Auf keinen der Gleisabschnitten musste der Grundpreis durch den Auslastungsfaktor erhöht werden, da keine erhöhte Nachfrage auf diesen Strecken besteht.

Tabelle 4.4 verwendet und die Konstante k , die für alle Zugtypen den Wert 10% annimmt. Aufgrund der verschiedenen Zugtyppräferenzen und dem unterschiedlichen Fahrverhalten der Zugtypen (viele und wenige Zwischenhalte bedingen häufiges und seltenes Ein- und Aussteigen) wird das Produkt aus Personenkilometereinnahmen und geschätzten Personenkilometern mit einem Faktor von 2 multipliziert und durch die Halteanzahl n der Trasse geteilt (4.14).

$$ZB = k_{j,z} \cdot \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \min\{B_{T_m}(p_i, p_j), \text{Sitzpl\"atze}(z) \cdot 0,1\} \cdot \text{dist}(p_i, p_j), \quad (4.14)$$

wobei mit $k_{j,z}$ die Einnahmen des Verkehrsanbieters $j \in N$ (N ist die Menge der Bieter) für einen Personenkilometer in einem Zug vom Typ z bezeichnet wird.

Im SGV gibt es analog zum Personenkilometereinnahmewert einen Einnahmewert, den der Gütertransportanbieter für den Transport von einer Tonne pro Kilometer erhält. Damit ergibt sich die maximale Zahlungsbereitschaft aus dem Produkt von zu transportierender Gütermenge in Tonnen geteilt durch 1.000, der kürzesten Entfernung von Start- und Zielbahnhof im Bahnnetz⁷ und dem Tonnenkilometereinnahmewert. Dabei wird im Binnen-transport die zu befördernde Gütermenge GM aus der statischen Gütertransportnachfragematrix bestimmt. Für den Startort $i \in V_{Gbh}$ und den Zielort $j \in V_{Gbh}$ gilt

$$GM = \left[\frac{GB(i, j)}{\left| \frac{GB(i, j)}{1.000} \right|} \right]. \quad (4.15)$$

Für Gütertrassen, deren wirkliche Start- und Zielbahnhöfe außerhalb des Bahnnetzes liegen, wird eine Gütermenge von 900 t angenommen. Damit sind die maximalen Zahlungsbereitschaften im nachfrageorientierten Gebotsmodell erklärt.

Gegenüberstellung beider Gebotsmodelle

Anhand von Beispieltrassen und den Trassen des Referenzfahrplans, der aus dem Status quo gewonnen wird (siehe Kapitel 5.1), werden die Zahlungsbereitschaften bei beiden Gebotsmodellen miteinander verglichen. Als Beispieltrassen werden für jeden Zugtyp zwei typische Trassen bestimmt, deren Längen an den mittleren Reiseweiten der Deutschen Bahn orientiert sind. Die mittleren Reise- beziehungsweise Transportweiten der Deutschen Bahn sind in [28] mit folgenden Werten angegeben: ICE: 309,0 km, IC: 183,4 km, DB Regio: 24,2 km, Gütertransport: 282,9 km. Die gewählten Beispieltrassen bestehen für jeden Zugtyp aus einer Hinfahrt- und einer Rückfahrttrasse (Tabelle 4.10). Die Abfahrtszeit aller Hinfahrttrassen ist 10 Uhr, während die Rückfahrttrassen um 14 Uhr starten. Die verwendeten Personen- beziehungsweise Tonnenkilometereinnahmen der Zugtypen sind folgende, ICE: 0,180 €, IC: 0,152 €, RE: 0,108 €, RB: 0,108 €, SB: 0,092 € und ICG: 2,5 €. Die

⁷die realisierte Streckenlänge ist erst nach der Optimierung bekannt

4 Implementation eines Trassengenerators

Werte für die Zugtypen ICE, IC, RE und RB entsprechen dem DB-Fahrpreis mit der Ermäßigung einer Bahncard 25 für eine Fahrt von Braunschweig nach Hannover, geteilt durch die Kilometeranzahl der Strecke. Die zur Berechnung herangezogenen Fahrpreise wurden der Auskunft www.bahn.de entnommen. Für die S-Bahn und den ICG standen keine vergleichbaren Fahrpreise zur Verfügung⁸. Diese Werte wurden geschätzt. Die gewählten Trassen und ihre zugehörigen Zahlungsbereitschaften sind der Tabelle 4.10 zu entnehmen. Die Werte der beiden Gebotsmodelle sind für die Zugtypen IC, RB und SB sehr ähn-

Tabelle 4.10: Gegenüberstellung der beiden Gebotsmodelle auf ausgewählten Trassen

Trassen		Gebotsmodelle		
Zugtyp	Linie	km	TPS-orientiert	erlösorientiert
ICE	DBRS-DGOE-DKAW-DFUL	283	1245	1729
ICE	DFUL-DKAW-DGOE-DBRS	283	1245	1421
IC	DHAN-DHIL-DGOE-DBEB	204	699	742
IC	DBEB-DGOE-DHIL-DHAN	204	699	687
RE	DKRS-DNOM-DGOE-DKAS-DMAL	112	258	374
RE	DMAL-DKAS-DGOE-DNOM-DKRS	112	258	358
RB	DNST-DHWU-DHAN	24	40	44
RB	DHAN-DHWU-DNST	24	40	41
SB	DHAN-DHLI-DWEE	17	34	36
SB	DWEE-DHLI-DHAN	17	34	35
ICG	DBRS-DFUL	280	945	630
ICG	DFUL-DBRS	280	573	630

lich. Für den ICE und den RE liefert das erlösorientierte Gebotsmodell höhere Werte als das TPS-Modell. Die Zahlungsbereitschaften für die zweite Gütertrasse liegen dicht beieinander, während bei der ersten das TPS-Gebotsmodell dominiert. Aufgrund der unterschiedlichen Struktur der beiden Gebotsmodelle können ihre Zahlungsbereitschaften für eine Trasse auch sehr verschieden sein. Eine sehr lange SPV-Trasse, die keine hohe Nachfrage bedient, erzeugt im TPS-orientierten Modell höhere Werte als im erlösorientierten. Umgekehrt wird es bei einer kurzen SPV-Trasse in Ballungsräumen, in denen die Anzahl der Personenfahrten in den betroffenen Zeitbereichen sehr hoch ist. Außerdem können die verschiedenen Trassenprodukte des TPS-orientierten Gebotsmodells Differenzen in den Werten der Zahlungsbereitschaften verursachen, wie zum Beispiel beim ICG DBRS-DFUL in Tabelle 4.10. Diese Trasse wurde im TPS-orientierten Modell als Express-Trasse ausgewertet und erhält deshalb eine höhere Zahlungsbereitschaft als die andere Gütertrasse. Der Grund liegt in der unterschiedlichen Fahrtdauer beider Gütertrassen. Die SGV-Trassen, die kürzere Fahrzeiten haben, werden im TPS-orientierten Modell als Express-Trassen bewertet. Auf die Fahrzeitbestimmung wird in Kapitel 4.7 detaillierter eingegangen.

⁸Für die S-Bahn gibt es viele verschiedene Tarife, wie zum Beispiel Monats- und Jahreskarten, die die Bestimmung von durchschnittlichen Personenkilometereinnahmen erschweren.

An den Beispieltrassen (Tabelle 4.10) ist zu erkennen, dass im Fernverkehr die Zahlungsbereitschaften des erlösorientierten Gebotsmodells die Werte des TPS-Modells übertreffen. Dies wird deutlicher, wenn die Trassen des Referenzfahrplans (Kapitel 5.1) betrachtet werden. Um für diese 310 Trassen Durchschnittswerte pro Zugtyp angeben zu können, sind die Zahlungsbereitschaften durch die Länge der Trassen geteilt worden (Tabelle 4.11).⁹ Die Zahlungsbereitschaften sind innerhalb der Zugtypen nach Einzel- und

Tabelle 4.11:

Durchschnittliche Zahlungsbereitschaften pro Trassenkilometer für die verschiedenen Zugtypen

GM	ICE: E	IC: E	RE: E	RE: T	RB: E	RB: T	SB: T	ICG
Erlös	7.57	4.74	3.85	4.46	2.14	2.03	2.41	2.31
TPS	3.92	2.64	2.11	3.78	2.06	2.98	3.40	3.02

Takttrassen (E und T) aufgeteilt. Dabei besteht ein Takt aus einem Kombinationsgebot aus mindestens drei aufeinanderfolgenden Zügen. Einzeltrassen beschreiben entsprechend einzelne Trassengebote und Gebotskombinationen von zwei Trassen. Im Referenzfahrplan kommen keine ICE-Takttrassen, IC-Takttrassen und SB-Einzeltrassen vor, folglich konnten dafür keine Werte bestimmt werden. Der hohe Wert des erlösorientierten Gebotsmodells für ICE-Einzeltrassen ist damit zu rechtfertigen, dass, wie in der Einleitung erwähnt, der ICE im Trassenpreismodell der Deutschen Bahn zu geringe Preise zahlt. Die TPS-Preise des ICEs stehen in keinem Verhältnis zu den Kosten der Hochgeschwindigkeitsstrecken. Auch im Interregionalverkehr sind die Zahlungsbereitschaften des erlösorientierten Modells höher als im TPS-orientierten Modell. Umgekehrt ist es im Regional- und Güterverkehr, denn die Preise für den Regionalverkehr sind im TPS-Modell im Vergleich zu den IC- und RE-Preisen sehr hoch.

Bestimmung der Gebotsabweichung

Neben dem Wert der maximalen Zahlungsbereitschaft für eine Trasse kann das Eisenbahnverkehrsunternehmen eine Flexibilität für das Trassengebot abgeben. Dadurch wird erreicht, dass auch zeitlich verschobene¹⁰ Trassen bei der Allokation berücksichtigt werden. Bewertet der Verkehrsanbieter die verschobenen Trassen anders, so kann er dies in Form der Gebotsabweichung ausdrücken. Durch Angabe einer Gebotsabweichung wird die maximale Zahlungsbereitschaft für verschobene Trassen verringert, pro verschobener Minute in der Abfahrtszeit um den Betrag der Gebotsabweichung. Für eine Verlängerung der Fahrdauer verringert sich die Zahlungsbereitschaft ebenfalls für jede Minute um den Betrag der Gebotsabweichung, während sich die Zahlungsbereitschaft für jede Minute, die die abgegebene Fahrdauer unterboten wird, erhöht. Die Gebotsabweichung kann als eine Art Flexibilität der Zahlungsbereitschaft angesehen werden. Je größer der Wert, desto geringer

⁹Die Trassenlängen sind in einer OPTRA-Allokation mit Flexibilität 0 bestimmt worden.

¹⁰entsprechend der Flexibilität

4 Implementation eines Trassengenerators

werden verschobene Trassen bewertet, so dass die Wahl der Trasse mit der gewünschten Abfahrtszeit in gewisser Weise durch die Gebotsabweichung beeinflusst werden kann.

Zur Bestimmung der Gebotsabweichung wird zwischen drei Kategorien unterschieden. Die drei Kategorien repräsentieren hohe, mittlere und geringe Flexibilität der Zahlungsbereitschaft. In der Kategorie hohe Flexibilität nimmt die Gebotsabweichung zufällige Werte von 0% bis 3% der berechneten Zahlungsbereitschaft an, bei mittlerer Flexibilität sind dies 3% bis 6% und bei geringer Flexibilität 6% bis 10%. Die Flexibilität der Zahlungsbereitschaft darf hier nicht mit der Flexibilität bei der Trassenspezifikation verwechselt werden. Gehört eine Trasse einem Takt an, wird für die Gebotsabweichung die durchschnittliche maximale Zahlungsbereitschaft für die Trassen in diesem Takt zugrunde gelegt. Im Zusammenhang mit den beiden verschiedenen Gebotsmodellen ergeben sich aufgrund der unterschiedlichen Zahlungsbereitschaften ein und der selben Trasse verschiedene Werte für die Gebotsabweichung, die in die entsprechenden Ausgabedateien geschrieben werden.¹¹ Die gewünschte Kategorie der Gebotsabweichung wird beim Aufruf zur Generierung einer Trassenspezifikation übergeben.

4.7 Anwendung des Trassengenerators

Anhand der übergebenen Informationen an die aufrufende Einheit zur Trassengenerierung wird die Linie und die Zahlungsbereitschaft bestimmt. Damit steht das Grundgerüst einer Trassenspezifikation fest. An dieser Stelle soll ein Überblick über die zeitliche Einordnung und die Takterzeugung gegeben werden. In den zeitlichen Rahmen gehören die Bestimmung der Abfahrtszeit und der Fahrtdauer. Ist die Abfahrtszeit nicht beim Aufruf übergeben worden, so wird sie zufällig innerhalb des feststehenden Horizonts gewählt. Die Fahrtdauer einer Personentrasse ergibt sich aus der Summe der kürzesten Fahrzeiten zwischen den Halten der Trassenlinie und den Standzeiten an den Haltebahnhöfen. Bei Gütertrassen wird die Fahrtdauer aus der kürzesten Fahrzeit zwischen Start- und Zielort bestimmt. Um diese Trassen flexibler zu gestalten, werden die Fahrzeiten für einen Teil der Trassen um 10% erhöht und für den anderen Teil um 50%. Innerhalb eines Taktes sind alle Fahrzeiten gleich.

Eine gewählte Trassenlinie kann als Takt oder als Nichttakt generiert werden, wobei ein Takt aus einer Folge von mindestens drei Trassen und ein Nichttakt aus höchstens zwei Trassen besteht. Der zeitliche Abstand zwischen den Takt-Trassen bleibt im gesamten Takt gleich. Die Anzahl der aufeinander folgenden Trassen und deren zeitlicher Abstand kann beim Aufruf zur Trassengenerierung eines Marktteilnehmers angegeben werden. Ist dies nicht der Fall, wird die Anzahl nach der Linienenerzeugung anhand der OD-Nachfragematrizen automatisch bestimmt. Dazu werden die statischen Nachfragewerte im entsprechenden Zeitbereich entlang der Trasse aufsummiert. Für n Halte und einem Zugtyp z ergibt sich die Trassenanzahl zu

¹¹Die Taktspezifizierung wird mit jedem Gebotsmodell in eine andere Ausgabedatei geschrieben.

$$\text{Trassenanzahl} = \left\lceil k \cdot \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=i+1}^n B_{T_m}(i, j)}{\text{Sitze}(z) \cdot n} \right\rceil, \quad (4.16)$$

wobei k eine Konstante ist und $m \in \{1, \dots, 6\}$, so dass die Abfahrtszeit von i in T_m liegt. Für den Trassenabstand werden vorgegebene Werte gewählt. Falls die Anzahl der Trassen mit dem zugehörigen Abstand zeitlich über den festen Horizont hinausreichen oder bestimmte festgesetzte Grenzwerte überschreitet, wird die Anzahl entsprechend reduziert. Damit sind alle trassenspezifisierenden Daten wie Zugtyp, Abfahrtszeit, Linie, Zahlungsbereitschaft, Fahrtdauer, Gebotsabweichung und Flexibilität, die beim Aufruf angegeben wird, bestimmt.

Durch Kombination der verschiedenen Modulelemente des Trassengenerators lassen sich eine Vielzahl von unterschiedlichen Marktteilnehmern erzeugen. Die Trassenwünsche der einzelnen Verkehrsanbieter werden zusammengefasst und in den OPTRA-Einleseformaten ausgegeben. Die wichtigsten und in der vorliegenden Arbeit am häufigsten verwendeten Kombinationen der Generatormodule, differenziert nach den Verkehrsarten, sind in den Spalten der Tabelle 4.12 dargestellt. Die sechste Spalte des Fernverkehrs beschreibt beispielsweise einen Anbieter für schnelle Point-to-Point-Verbindungen im Geschäftsverkehrs. Hier werden ICE-Trassen zwischen den Großstädten des Netzes erzeugt. Im Gegensatz dazu kann mit der Spalte drei des Interregionalverkehrs ein Marktteilnehmer simuliert werden, der preisgünstig (TPS-Modell) eine RE-Trasse ersteigern möchte, die auf langen Strecken eine hohe Nachfrage befriedigt. Darüber hinaus kann der Trassenwunsch mit einer hohen Flexibilität generiert werden, um mögliche Konflikte mit anderen Trassengebotes zu vermeiden. Ein Nachverkehrsanbieter, der regelmäßige Beförderungsmöglichkeiten zum Beispiel im S-Bahnnetz von Hannover realisieren möchte, kann mit den ersten Spalten des Regionalverkehrs identifiziert werden. Hier können Taktverkehre in kleineren Regionen generiert werden. Abschließend soll ein Güterverkehrsanbieter beschrieben werden, der einen schnellen Transport zwischen den großen Güterbahnhöfen des Netzes verwirklichen möchte. Dazu kann die erste Güterverkehrsspalte genutzt werden. Mit einer wenig flexiblen Fahrtdauer kann eine hohe Zahlungsbereitschaft mit dem TPS-Gebotsmodell bestimmt werden.

4 Implementation eines Trassengenerators

Tabelle 4.12:

Einige wichtige Kombinationen von Elementen der Trassengeneratormodule zur Generierung von Verkehrsanbietern und deren Trassenwünsche

Daten	Regional- verkehr	Interregio- verkehr	Fern- verkehr	Güter- verkehr
Verfahren				
Min-S-T	×	×	×	
Max-S-T	× ×	× ×	×	
Greedy		× × ×	× × ×	× ×
P-to-P				× ×
Verwendete Knotenmenge				
Großregionen	×	×		
Regionen	× ×			
IR Großstädte		×	×	
F Großstädte			× × ×	×
Alle Orte		× ×	× ×	× ×
SNOW			×	×
OD-Nachfrage-Matrizen				
SPV	× × ×	× × × × × ×	× × × × × ×	
SGV				× ×
SNOW			×	×
Zugtypen				
RB	× × ×			
SB	× × ×			
RE		× × × × × ×		
IC		× × × × × ×		
ICE			× × × × × ×	
ICG				× × ×
Gebotsmodelle				
TPS	× × ×	× × × × × ×	× × × × × ×	× × ×
Erlös	× × ×	× × × × × ×	× × × × × ×	× × ×

5 Generierung von Testszenarien unter verschiedenen verkehrstechnischen Aspekten

Ziel ist es eine Trassenbörsenauktion zu simulieren und den Einfluss von verschiedenen Trassentypen auf das Auktionsergebnis zu untersuchen. Dabei wird unter anderem versucht, folgende Fragen zu beantworten. *Kann sich der Güterverkehr aufgrund seiner Flexibilität gegenüber dem SPV durchsetzen? Verdrängt der Taktverkehr die SPV-Einzeltrassen? Leidet der Regionalverkehr unter der Erhöhung des Fernverkehrs?* Diese Fragen motivieren die Szenariengenerierung bezüglich folgender Trassendifferenzierung in Einzeltrassen des Regional- und Fernverkehrs, Takttrassen des Regional- und Fernverkehrs und Güterverkehrs(einzel)trassen.

Die Generierung der Testszenarien ist auf diese fünf Trassentypen ausgerichtet. Das bedeutet, dass in jeder dieser Kategorien Szenarien erstellt werden, in der vermehrt Trassen des entsprechenden Trassentyps vorkommen. Als zusätzliches sechstes Szenario werden alle Trassenanzahlen dieser fünf Typen erhöht. Um die Ergebnisse am Auktionsende besser miteinander vergleichen zu können, werden die Testbeispiele so aufgebaut, dass alle Szenarien neben den Trassen des entsprechenden Trassentyps die gleiche Trassenbasis enthalten. Das bedeutet, dass sich alle Testbeispiele einer Szenarienkategorie aus der Trassenbasis und zusätzlichen Trassen des zugehörigen Trassentyps zusammensetzen. Diese Menge an Trassenanfragen, auf der jedes Szenario basiert, wird als Referenzfahrplan bezeichnet. Es wird gefordert, dass dieser Referenzfahrplan konfliktfrei ist. Alle Trassengebote sollten bei der OPTRA-Optimierung mit einem Flexibilitätswert von 0 alloziert werden. Der aktuelle Fahrplan Status quo, der vom Projektpartner FG Schienenfahrwege und Bahnbetrieb erstellt wurde, soll als Referenzfahrplan verwendet werden. Wie bereits erwähnt, werden nicht alle Trassenwünsche des Status quo-Fahrplans von OPTRA zugeteilt. Kapitel 5.1 beschreibt, wie aus den Status quo-Trassen durch bestimmte Anpassungen ein Fahrplan erstellt wird, der (bei einer Flexibilität von 0) konfliktfrei ist. Basierend auf dem veränderten Status quo werden die Testszenarien entsprechend den sechs Szenarienkategorien generiert. Die Ausführungen dazu sind in Kapitel 5.2 enthalten.

5.1 Aktueller Fahrplan – Status quo

Um die Anwendbarkeit einer kombinatorischen Auktion mit der OPTRA-Allokation zu untersuchen, werden mit dem Trassengenerator Testszenarien unter bestimmten Gesichts-

punkten erstellt. Für die damit zusammenhängenden Untersuchungen und Trassengenerierungen soll der aktuelle Fahrplan Status quo als Referenzfahrplan verwendet werden. Da jedoch bei einer Flexibilität von 0 (keine Abfahrtszeitverschiebung ist zugelassen) nicht alle Status quo-Trassen mit dem OPTRA-Modell abgebildet werden können und folglich kein konfliktfreier Referenzfahrplan zur Verfügung steht, soll versucht werden, mögliche Gründe dafür anzugeben. Im weiteren soll gezeigt werden, wie im Status quo-Fahrplan durch genauere Untersuchungen an einigen Trassen gezielte Verschiebungen vorgenommen werden, um dennoch einen konfliktfreien Referenzfahrplan zu erhalten.

Der Status quo-Fahrplan besteht aus 320 Trassengebieten, deren Abfahrtszeiten sich im zeitlichen Rahmen von 10 bis 14 Uhr bewegen. Unter den 320 Trassen gibt es 290 Personenverkehrstrassen und 30 Güterverkehrstrassen. Nach Angaben des Fachgebiets Schienenfahrwege und Bahnbetrieb sind aufgrund fehlender Informationen über den aktuellen Schienengütertransport die 30 Status quo-Gütertrassen nur geschätzt worden. Die Personenverkehrstrassen basieren auf dem Kursbuch 2004. Die Ergebnisse der OPTRA-Allokation für verschiedene Gebotsmodelle (Tabelle 5.1) zeigen, dass nicht einmal 75% aller Status quo-Trassen alloziert werden. Für diese Testläufe ist das OPTRA-Verfahren so

Tabelle 5.1:

Zuteilung der Status quo-Trassen für verschiedene Gebotsmodelle und einer Flexibilität von 0

Gebotsmodell	320 Status quo-Trassen allozierte Trassen	
	absolut	prozentual
FG Schienenfahrwege	219	68,4
TPS-orientiert	221	69,1
Erlösorientiert	224	70,0
Gebot 1.000 € (alle)	231	72,2

eingestellt worden, dass sich bei einer Verschiebung in der Fahrdauer keine Veränderungen im Gebot beziehungsweise in der Zahlungsbereitschaft ergeben. Der erste Durchlauf wurde mit den vom Projektpartner ermittelten Zahlungsbereitschaften getätigt, über deren Berechnung jedoch keine genaueren Informationen vorliegen. Im Verlauf dieser Arbeit wird auf diese Zahlungsbereitschaften nicht weiter eingegangen, da sie einer anderen Größenordnung angehören als die Werte des TPS-orientierten und des erlösorientierten Gebotsmodells. In der letzten Zeile der Tabelle wird ein OPTRA-Aufruf dargestellt, bei dem alle Status quo-Trassen eine Zahlungsbereitschaft von 1.000 € zugewiesen bekommen. Bei dieser Gleichbewertung aller Trassenwünsche wird die höchste Anzahl zugeteilter Trassen erreicht. Trotzdem werden mit diesen Zahlungsbereitschaften 89 Trassen nicht ausgewählt. Mit dem TPS-orientierten und erlösorientierten Gebotsmodell werden nicht so viele Trassen alloziert wie mit Einheitsgebieten. Der Grund dafür liegt in der unterschiedlichen Bewertung verschiedener Trassen. In einem Konfliktfall können höher bewertete Trassen mehrere geringer bewertete Trassen verdrängen. Das soll an einem Beispiel erläutert werden. Angenommen eine Trasse *A* ist nur mit den Trassen *B* und *C* in Konflikt, wobei

B und C untereinander konfliktfrei sind. Die zugehörigen EVUs haben folgende Gebote für die Trassenwünsche A , B und C eingereicht: 1.500 €, 500 € und 500 €. Bei einer Gewinnmaximierung wird die Trasse A für 1.500 € gewählt. Haben alle Trassen den gleichen Gebotswert so gewinnen B und C . Ziel ist es, alle 320 Trassen des Status quo-Fahrplans, beziehungsweise so viele wie möglich, zu allozieren. Aus diesem Grund beschränken sich die weiteren Betrachtungen auf die einheitliche Gebotsabgabe von 1.000 €.

Da die Güterverkehrstrassen im Status quo-Fahrplan geschätzt sind, könnten sich dadurch Konflikte innerhalb dieser Trassen und Konflikte mit den Personenverkehrstrassen ergeben haben, die eine komplette Allokation des Fahrplans unterbinden. Bei der differenzierten Betrachtung der Personenverkehrstrassen und der Gütertransporttrassen wird das Vorhandensein von Konflikten zwischen den SGV- und SPV-Trassen bestätigt. Die Werte dieser Untersuchungen mit einheitlichen Zahlungsbereitschaften von 1.000 € zeigen, dass bei einer getrennten Betrachtung von SPV und SGV elf Trassen mehr zugeteilt werden als bei gemeinsamer Betrachtung (Tabelle 5.2).

Tabelle 5.2:

Allokation der Status quo-Trassen bei einer Flexibilität von 0 und einheitlichen Geboten von 1.000 €

Status quo Trassen	Anzahl	allozierte Trassen	
		absolut	prozentual
SPV	290	220	75,9
SGV	30	22	73,3
alle	320	231	72,2

Außerdem konnte bei genauerer Untersuchung der nicht zugeteilten Trassenwünsche festgestellt werden, dass es einige Trassen gibt, die aufgrund ihrer angegebenen Fahrdauer nicht vom OPTRA-Modell ausgewählt werden können. Diese Trassen besitzen eine Fahrdauer, die kleiner ist als die im OPTRA-Modell verwendeten Mindestfahrzeiten. Bei 27 Status quo-Trassen treten diese Diskrepanzen auf, darunter sind 19 Personenverkehrs- und 8 Güterverkehrstrassen. Die Abweichung von den Mindestfahrzeiten in OPTRA beträgt bei den SPV-Trassen jeweils eine Minute und bei den SGV-Trassen bis zu 80 Minuten. Folgende Erklärungen dafür, dass bei der OPTRA-Entwicklung nicht die gleiche Datenbasis zugrunde lag wie im Status quo-Fahrplan (der Realität), gab der Projektpartner FG Schienenfahrwege und Bahnbetrieb: Zum einen sind die Eingangsdaten der Strecken für die Berechnung der OPTRA-Fahrzeiten nur geschätzt. Das beeinflusst außerdem die Zugfolgezeiten. Zum anderen erfolgte eine Vereinfachung in der Auswahl der Zugtypen, indem „alle Züge in nur 6 Klassen“ zusammengefasst wurden. Desweiteren könnte auch die fehlende Modellierung der Durchfahrt von Zügen in Bahnhöfen ein Grund sein, dadurch würde sich die Fahrzeit verkürzen.

Mit dem Ziel, durch leichte Variationen an den Status quo-Trassenwünschen dennoch (fast) alle 320 Trassenwünsche mit OPTRA zu allozieren, wurden die Fahrzeiten in dem

Status quo-Fahrplan an die Werte, die die OPTRA-Allokation verwendet, angepasst. Die Fahrzeiten der 27 Trassen, bei denen die Diskrepanzen auftreten, sind um den Differenzbetrag erhöht worden. Außerdem sind die Zwischenhalte entsprechend angepasst worden. Durch diese Veränderungen könnten jedoch neue Konflikte innerhalb des Status quos hervorgerufen werden. In der OPTRA-Allokation der angepassten Status quo-Trassen ist zu erkennen, dass mehr Trassen zugeteilt werden als vorher (Tabelle 5.3). Außerdem geht aus den Werten hervor, dass unter den Status quo-Trassen weiterhin Konflikte bestehen. Es können auch einige Trassen nicht ausgewählt worden sein, wenn es im Status quo ver-

Tabelle 5.3:

Zuteilung der angepassten Status quo-Trassen mit einer einheitlichen Zahlungsbereitschaft von 1.000 € und einer Flexibilität von 0

Status quo	Anzahl	allozierte Trassen	
		absolut	prozentual
SPV	290	234	80,7
SGV	30	30	100,0
alle	320	244	76,3

wendete Zugfolgezeiten gibt, die nicht mit den Mindestzugfolgezeiten im OPTRA-Modell übereinstimmen. Die geschätzten Eingangsdaten für die Berechnung der Fahrzeiten haben auch Einfluss auf die Zugfolgezeiten. Auch der Projektpartner Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb konnte für die 56 nicht allozierten SPV-Trassen keine andere Erklärung finden, da seitens des Projektpartners derartige Untersuchungen noch nicht durchgeführt wurden. Nach Angaben des Projektpartners seien dafür das „Modell noch nicht ausgereift genug [...] (mindestens die Bahnhöfe müssen noch modelliert werden)“ und „die Eingangsdaten noch zu ungenau“.

Der nächste Schritt auf dem Weg zum konfliktfreien Status quo-Fahrplan besteht darin, die Abfahrtszeiten bestimmter Status quo-Trassen so zu verändern, dass (fast) alle 320 Trassen ausgewählt werden. Die Abfahrtszeitverschiebungen sollen minimal sein, um eine geringe Abweichung gegenüber dem realistischen Status quo zu gewährleisten. Demzufolge werden aus dem angepassten Status quo-Szenario mit OPTRA ganzzahlige Programme erzeugt, so dass Verschiebungen in der Abfahrtszeit durch Gebotsverringerung bestraft werden, aber keine Gebotsveränderung bei Verschiebung der Fahrtdauer vorgenommen wird. Für die Zahlungsbereitschaften der Trassen wurde einheitlich 1.000 € und für die Gebotsabweichung einheitlich ein Wert von 1 € verwendet. Dadurch wird innerhalb des Zeithorizontes des Status quos von 240 Minuten garantiert, dass in einem Konfliktfall nicht eine teure Trasse zwei billige (deren Abfahrtszeiten weit verschoben sind) verdrängen kann. Mit dem OPTRA-Verfahren wurden zu den angepassten Status quo-Trassen mehrere ganzzahlige Programme mit verschiedenen Flexibilitäten generiert. Dabei hatten alle Trassen den gleichen Flexibilitätswert (Tabelle 5.4). Die IPs werden mit der Standardsoftware CPLEX gelöst. Die Optimierung der erzeugten IPs ist aufgrund der hohen Flexibilitätswerte sehr zeitaufwendig gewesen und dauerte bis zu mehreren Wochen. Neben

Tabelle 5.4:

Allokationen des angepassten Status quo-Fahrplans bei verschiedenen Flexibilitäten

Flexibilität		allozierte Trassen		
Wert	Minuten	absolut	prozentual	Zielfunktionswert
5	3	280	87,5	280.000
11	6	303	94,7	303.000 ^a
19	10	309	96,6	309.000 ^b

^abei einem Optimalitätsgap von 0,6% abgebrochen

^bnach mehreren Wochen bei einem Optimalitätsgap von 1,87% abgebrochen

der hohen Rechenzeit ist außerdem die Anzahl der allozierten Trassen noch nicht zufriedenstellend. Demzufolge werden darüber hinaus IPs generiert, bei denen nur ein Teil der angepassten Status quo-Trassen mit Flexibilitätswerten versehen werden. Die Aufteilung der 320 Trassen orientiert sich an der Allokation in Tabelle 5.3. Die 244 allozierten Trassen bekommen einen Flexibilitätswert von 0. Alle nicht zugeteilten 76 Trassen erhalten die gleiche positive Flexibilität. Zu diesen Status quo-Trassen und verschiedenen positiven Flexibilitäten werden mit OPTRA ganzzahlige Programme erstellt und mit CPLEX gelöst (Tabelle 5.5). Die resultierenden Allokationen für die Flexibilitäten von 39 und 49 liefern

Tabelle 5.5:

Allokationen des angepassten Status quo-Fahrplans bei verschiedenen Flexibilitäten der 76 Trassen

Flexibilität		allozierte Trassen		
Wert	Minuten	absolut	prozentual	Zielfunktionswert
29	15	304	95,0	304.000
39	20	310	96,9	310.000
49	25	317	99,1	317.000

hohe Zahlen an ausgewählten Trassen. Auffällig sind jedoch die Zielfunktionswerte in den Tabellen 5.4 und 5.5. Sie lassen darauf schließen, dass die zugehörigen, allozierten Status quo-Trassen nicht in ihren Abfahrtszeiten verschoben werden. Bei genauerer Betrachtung der Lösungsvariablen konnte festgestellt werden, dass dies in einem Modellierungsfehler von OPTRA begründet liegt. In dem OPTRA-Modell wurde der Fall, dass ein Zug direkt nach der Abfahrt aus seinem spezifizierten Startbahnhof in dem selbigen halten kann, nicht ausgeschlossen. Beginnt ein Zug seine Fahrt mit dem Halten im Startbahnhof, verringert sich der Gebotsbetrag nicht. Das erklärt die „glatten“ Werte der Zielfunktionen. Folglich kann nicht mehr davon ausgegangen werden, dass die wirklichen Abfahrtszeiten (nach dem Halten im Startbahnhof) minimal verschoben sind. Diese wirklichen Abfahrtszeiten der 76 Status quo-Trassen werden durch den Vergleich der CPLEX-Lösungsvariablen mit den Ab-

5 Generierung von Testszenarien unter verschiedenen verkehrstechnischen Aspekten

fahrtszeiten der Trassenspezifikationen für die ersten beiden Fälle bestimmt (Tabelle 5.6). Da der Wert für die maximale Verschiebung bei der Flexibilität 49 noch höher als im Fall 39 sein wird, wurde auf diese Auszählung verzichtet.

Tabelle 5.6:

Allokationen des angepassten Status quo-Fahrplans bei verschiedenen Flexibilitätswerten der 76 Trassen

Flexibilität		allozierte Trassen		Abfahrtsverschiebung (min)	
Wert	Minuten	von 244 (f=0)	von 76 (f>0)	maximal	durchschnittlich
29	15	238	66	12	2,5
39	20	240	70	15	3,6
49	25	243	74	-	-

Als Referenzfahrplan für die Generierung der Testszenarien wird die Allokation der angepassten Status quo-Trassen bei einer Flexibilität von 39 verwendet. Akzeptabel sind sowohl die Anzahl der ausgewählten Trassen als auch die maximale Verschiebung der Abfahrtszeiten, wenn diese mit den wirklichen Abfahrten identifiziert werden. Die 310 Trassen werden auf die Allokation abgestimmt. Dazu werden für alle Trassen sowohl die Fahr- und Abfahrtszeiten als auch die Standzeiten an den Zwischenhalten angepasst. Gegenüber dem originalen Status quo-Fahrplan fehlen zehn Trassenwünsche. Zu diesen fehlenden Trassen gehören vier ICE-Trassen, vier RB-Trassen und zwei ICG-Trassen. Außerdem wird die Abfahrtszeit einer RB-Trasse um 4 Minuten über das betrachtete Intervall von 10:00-14:00 Uhr hinausgeschoben. Die 310 veränderten Status quo-Trassen werden als Referenzfahrplan für die Generierung der Testszenarien verwendet.

5.2 Generierung der Testszenarien

Die Generierung der Testszenarien übernimmt der Trassengenerator. In den sechs Szenarien werden mehrere Testbeispiele erzeugt. Diese Szenarien bestehen in der Erhöhung der Fernverkehreinzeltrassen, Fernverkehrtakttrassen, Regionalverkehreinzeltrassen, Regionalverkehrtakttrassen, Güterverkehrstrassen und aller Trassentypen. Jedes Testbeispiel setzt sich aus den Trassen des Referenzfahrplans und zusätzlich generierten Trassen der entsprechenden Kategorie zusammen. Die maximalen Zahlungsbereitschaften der Trassenwünsche in den Testszenarien werden mit beiden Gebotsmodellen berechnet. Folglich gibt es für jedes Gebotsmodell die gleichen Testszenarien. Für die Bewertung der Status quo-Referenztrassen durch das erlösorientierte Gebotsmodell werden die Personenkilometereinnahmen aus Kapitel 4.6 (Seite 57) verwendet. Diese Werte werden ebenfalls für die Zahlungsbereitschaften der zusätzlichen Trassen zugrunde gelegt. Jedoch weichen die Personen- und Tonnenkilometereinnahmen bei den zusätzlichen Trassen bis zu 10% von den Werten aus Kapitel 4.6 ab. Diese Einnahmewerte werden innerhalb der beschriebenen

Spanne zufällig gewählt. Durch die Variabilität in den Personen- und Tonnenkilometer-einnahmen können unterschiedliche Verkehrsanbieter modelliert werden. Beispielsweise kann ein EVU, das für eine bestimmte Trasse Kostenvorteile gegenüber anderen Anbietern vergleichbarer Trassen hat, höher bieten.

Die verschiedenen Zugtypen werden auf die sechs Kategorien verteilt. Die Zugtypen ICE und IC gehören den Fernverkehrsszenarien an, während RE, RB und SB den Regionalverkehrskategorien zugeordnet sind. Das Szenario Güterverkehr beinhaltet den Zugtyp ICG. In jeder Kategorie werden fünf Testbeispiele unterschiedlicher Größe generiert. Jedes Testbeispiel besteht aus den Trassen des Referenzfahrplans und zusätzlichen Trassen. Die zusätzlichen Trassenwünsche einer Kategorie gehören ausschließlich und zu gleichen Teilen den zugehörigen Zugtypen an. Dabei werden die zusätzlichen Trassen pro Zugtyp der entsprechenden Kategorie sukzessiv um drei erhöht. Das bedeutet für jede Kategorie, dass in dem ersten Testbeispiel drei zusätzliche Trassen pro zugehörigen Zugtypen erzeugt werden. Die zweiten Beispiele enthalten pro Zugtyp sechs zusätzliche Trassen, wobei die zusätzlichen Trassen aus dem ersten Beispiel übernommen werden. Folglich werden in den letzten Testbeispielen 15 zusätzliche Trassen pro Zugtyp generiert. Darunter gibt es wieder drei neue, denn die anderen 12 sind bereits in den vierten Beispielen enthalten. Folglich sind alle Trassen von Testbeispiel I in Testbeispiel $I + 1$ enthalten ($I \subset I + 1$, für alle $I = 1, 2, 3, 4$). Die Identifikation der Testbeispiele erfolgt anhand ihres Szenarios und der Anzahl zusätzlicher Trassen (Tabelle 5.7). In der Kategorie Erhöhung aller Trassentypen

Tabelle 5.7:

Anzahl der zusätzlich zum Referenzfahrplan generierten Trassen in den Testbeispielen

Trassen- kategorien	Testbeispiele					zugehörige Zugtypen
	1	2	3	4	5	
FV E:	+ 6	+12	+18	+24	+30	ICE, IC
FV T:	+ 6	+12	+18	+24	+30	ICE, IC
RV E:	+ 9	+18	+27	+36	+45	RE, RB, SB
RV T:	+ 9	+18	+27	+36	+45	RE, RB, SB
GV:	+ 3	+ 6	+ 9	+12	+15	ICG
Alle:	+33	+66				ICE, IC, RE, RB, SB, ICG

(sechste Zeile) gibt es nur höchstens zwei Beispiele, bedingt durch die langen Rechenzeiten größerer Testbeispiele in der Auktion.

6 Resultate der Auktionsrechnungen in den verkehrstechnischen Szenarien

Die Auktionssimulationen werden mit allen generierten Testbeispielen der verschiedenen Szenarien durchgeführt. Alle Trassenwünsche in den Testbeispielen erhalten dafür eine Flexibilität von eins. Zusätzlich werden Simulationen gerechnet, bei denen alle Trassengebote mit einer Flexibilität von drei betrachtet werden. Für diese Rechnungen wird nur ein Teil der Beispiele verwendet, weil die Lösungszeit der ganzzahligen Programme durch die Erhöhung der Flexibilität erheblich steigt. Die Untersuchung der Auktionsresultate erfolgt nach zwei wesentlichen Gesichtspunkten. Dazu gehört die Zuteilung der verschiedenen Trassentypen am Auktionsende und die damit verbundenen Einnahmen für den Auktionator. Für eine genauere Betrachtung der Auktionseinnahmen werden die Werte auf die verschiedenen Trassentypen verteilt und zusätzlich auf einen Trassenkilometer bezogen. Die dafür verwendeten Trassenlängen basieren auf der Allokation am Auktionsende. Alle Ergebnisse der durchgeführten Auktionen werden in Kapitel 6.1 tabellarisch vorgestellt. Anhand dieser Werte lassen sich einige interessante Effekte beobachten. Diese werden in Kapitel 6.2 beschrieben. Außerdem soll versucht werden, Erklärungen für die Effekte zu finden.

6.1 Ergebnisse der Auktionssimulationen

Die Auktionsergebnisse werden differenziert nach der Zugtypenzuteilung, den Auktionseinnahmen und den Trassenkilometereinnahmen. Die zugehörigen Tabellen enthalten jeweils die Testergebnisse aller sechs Szenarien. Im Kopf der Zugtypenzuteilungstabellen sind die Trassen des Referenzfahrplans, der in allen Testbeispielen enthalten ist, auf die verschiedenen Trassentypen verteilt. Dabei sind nur solche Trassen berücksichtigt worden, deren Grundpreise zulässige erste Gebote ergeben. Diese Werte unterscheiden sich bezüglich beider Gebotsmodelle um acht Trassen. Die Trassentypen sind nach den sechs Zugtypen und nach Einzel- und Takttrassen (in den Ergebnistabellen mit e und t bezeichnet) differenziert. Da im Güterverkehr keine Takttrassen vorgesehen sind, ergeben sich folglich elf verschiedene Trassentypen. Die Tabellen der Zugtypenzuteilungen enthalten als letzte Spalte zusätzlich die Anzahl der in der Auktion benötigten Runden. Ein Nachteil an der tabellarischen Darstellung der Auktionsergebnisse ist, dass nicht ersichtlich ist, welche Trassen alloziert wurden. So kann es vorkommen, dass beispielsweise ein zusätzlich generierter Takt einen gleichgroßen Takt des Referenzfahrplans (gleichen Typs) verdrängt, ohne dass sich diese Veränderung in den Allokationsergebnissen widerspiegelt. Um Änderungen

dieser Art zu berücksichtigen, müßte ergänzend eine Visualisierung aller zugeteilten Trassen verwendet werden.

Die Ergebnisse der Auktionseinnahmen sind bezüglich der Trassentypen auf zwei Tabellen verteilt worden. Neben den Spalten der Einzel- und Takttrassen (e und t) gibt es bei jedem Zugtyp eine zusätzliche Spalte. Diese mit d bezeichnete Spalte bezieht sich auf alle Trassen des Zugtyps in dem zugehörigen Beispiel und enthält die Differenz zwischen den realisierten Geboten, bei denen die Gebotsabweichung infolge von Trassenstreckung¹ berücksichtigt wurde und den Basisgeboten ohne Gebotsabweichung. In den Untersuchungen werden ausschließlich nicht negative Basisgebote betrachtet. Folglich ergibt sich für eine Trasse mit positiver Gebotsabweichung nur dann ein positiver Differenzwert, wenn für diese Trasse eine Fahrtdauer realisiert wird, die kürzer ist als die gewünschte. Die Tabellen der Trassenkilometereinnahmen enthalten die durchschnittlichen Preise für einen Trassenkilometer, ebenfalls differenziert nach den elf Trassentypen.

Die Auktionsresultate aller Szenarien mit einer Flexibilität von eins sind in den folgenden Tabellen dargestellt. Dabei enthalten die Tabellen 6.1 bis 6.4 die Ergebnisse der Endallokationen aller Testbeispiele, deren maximale Zahlungsbereitschaften mit dem erlösorientierten Gebotsmodell bestimmt wurden. Die Auktionsresultate für das TPS-orientierte Gebotsmodell sind in den nachfolgenden Tabellen 6.5 bis 6.8 aufgelistet. In den Zuteilungstabellen werden sowohl in den Szenarien zur Erhöhung der Einzeltrassen als auch der Takttrassen die einzelnen, realisierten Züge betrachtet, die den Kombinationsgeboten angehören (nicht der Takt als Ganzes).

Ein Teil der Auktionsrechnungen wird ein zweites Mal durchgeführt. Diesmal erhalten alle Testbeispiele der Szenarien einen Flexibilitätswert von drei. Bedingt durch die Laufzeitverlängerung werden für jedes Szenario nur zwei Beispiele berücksichtigt. Die Auktionsergebnisse dieser Testbeispiele befinden sich im Anschluss an den bereits beschriebenen Tabellen. Die Auktionsergebnisse der mit dem erlösorientierten Gebotsmodell erstellten Testbeispiele sind den Tabellen 6.9 bis 6.11 zu entnehmen, während die Werte der mit dem TPS-orientierten Gebotsmodell erzeugten Beispiele in den Tabellen 6.12 bis 6.14 dargestellt sind.

Die Summe der Grundpreise aller Testbeispieltrassen beträgt beim erlösorientierten Gebotsmodell 28-30% von der Summe der maximalen Zahlungsbereitschaften. Beim TPS-Modell ergeben sich höhere Werte (38-40% der Summe der maximalen Zahlungsbereitschaften).

¹Eigentlich sollte auch die Trassenverschiebung erwähnt werden. Jedoch werden die Abfahrtszeiten von Trassen mit positiver Gebotsabweichung bezüglich der vorliegenden OPTRA-Modellierung bei einer Zielfunktion, die maximiert wird nicht verschoben. In dem OPTRA-Modell ist es möglich die zu verschiebende Zeit am Startbahnhof zu warten, um den Wert des Basisgebots nicht zu verringern.

6 Resultate der Auktionsrechnungen in den verkehrstechnischen Szenarien

Tabelle 6.1:

Trassenzuteilung am Auktionsende bezüglich der verschiedenen Zugtypen. Gebotsmodell: erlö-orientiert (302 zulässige Gebote der Referenztrassen), Flexibilität: 1

Zugtypzuteilung:	ICE	IC	RE	RB	SB	ICG	Runden
Referenzfp.	e t	e t	e t	e t	e t	e	
	27 0	27 0	34 19	83 23	0 61	28	
Kategorie: Fernverkehr – Einzeltrassen (ICE, IC)							
+ 6	28 0	28 0	34 19	83 23	0 61	26	32
+12	30 0	26 0	34 19	81 23	0 61	26	37
+18	31 0	28 0	34 19	81 23	0 61	25	36
+24	32 0	29 0	32 19	79 23	0 61	24	40
+30	33 0	30 0	32 19	77 23	0 57	24	41
Kategorie: Fernverkehr – Takttrassen (ICE, IC)							
+ 6	26 0	27 3	32 19	83 23	0 61	27	44
+12	26 3	27 3	32 19	83 23	0 61	27	43
+18	26 6	27 9	32 19	82 19	0 61	26	43
+24	24 9	27 9	32 19	79 19	0 58	26	43
+30	24 9	27 9	32 19	79 19	0 58	26	43
Kategorie: Regionalverkehr – Einzeltrassen (RE, RB, SB)							
+ 9	27 0	27 0	36 19	83 23	3 54	27	9
+18	27 0	27 0	38 19	84 23	5 54	27	23
+27	27 0	26 0	41 19	84 23	7 50	27	23
+36	27 0	26 0	42 19	84 23	7 50	26	29
+45	27 0	26 0	43 19	85 23	8 46	25	29
Kategorie: Regionalverkehr – Takttrassen (RE, RB, SB)							
+ 9	27 0	27 0	34 19	83 23	0 60	28	18
+18	27 0	27 0	34 22	81 23	0 63	27	25
+27	27 0	27 0	34 25	81 29	0 66	27	25
+36	27 0	27 0	34 19	81 29	0 65	27	22
+45	27 0	26 0	34 22	81 29	0 61	26	26
Kategorie: Gütertransporttrassen (ICG)							
+ 3	27 0	27 0	34 19	83 23	0 61	31	1
+ 6	27 0	27 0	34 19	83 23	0 61	33	9
+ 9	27 0	27 0	34 19	83 23	0 61	36	9
+12	27 0	27 0	34 19	83 23	0 61	39	9
+15	27 0	27 0	34 19	83 23	0 61	42	9
Kategorie: Alle Trassen							
+33	28 0	26 0	37 22	82 23	1 52	30	47

Tabelle 6.2:

Einnahmen des Auktionators pro Trassenkilometer am Auktionsende bezüglich der verschiedenen Zugtypen. Gebotsmodell: erlösorientiert (302 zulässige Gebote der Referenztrassen), Flexibilität: 1

km-Preise:	ICE		IC		RE		RB		SB		ICG
	e	t	e	t	e	t	e	t	e	t	
Kategorie: Fernverkehr – Einzeltrassen (ICE, IC)											
+ 6	2,34	–	1,65	–	1,24	1,08	0,90	0,90	–	0,89	1,06
+12	2,50	–	1,53	–	1,24	1,08	0,90	0,90	–	0,89	1,16
+18	2,69	–	1,56	–	1,24	1,08	0,91	0,90	–	0,94	1,16
+24	3,20	–	1,98	–	1,46	1,08	0,91	0,90	–	1,16	1,14
+30	3,83	–	2,01	–	1,55	1,30	0,93	0,85	–	1,10	1,20
Kategorie: Fernverkehr – Takttrassen (ICE, IC)											
+ 6	2,19	–	1,47	5,99	1,10	1,07	0,90	0,90	–	0,89	1,12
+12	2,26	1,76	1,47	5,40	1,14	1,07	0,89	0,90	–	0,89	1,03
+18	2,23	1,76	1,46	4,09	1,20	1,07	0,93	0,90	–	0,96	1,12
+24	2,26	2,11	1,48	4,23	1,20	1,07	0,91	0,83	–	0,96	1,12
+30	2,52	2,11	1,47	4,23	1,22	1,07	1,02	0,82	–	0,96	1,14
Kategorie: Regionalverkehr – Einzeltrassen (RE, RB, SB)											
+ 9	1,83	–	1,46	–	1,20	1,08	0,91	0,90	1,42	0,89	1,07
+18	1,83	–	1,46	–	1,26	1,08	0,93	0,90	1,37	0,90	1,08
+27	1,84	–	1,50	–	1,30	1,09	0,94	0,90	1,51	0,91	1,08
+36	1,85	–	1,50	–	1,52	1,09	0,94	0,86	1,31	0,94	1,10
+45	1,83	–	1,53	–	1,53	1,09	0,96	0,86	1,26	1,04	1,11
Kategorie: Regionalverkehr – Takttrassen (RE, RB, SB)											
+ 9	1,78	–	1,49	–	1,19	1,10	0,87	0,90	–	0,90	1,08
+18	1,71	–	1,47	–	1,17	0,75	0,87	0,90	–	1,00	0,61
+27	1,77	–	1,46	–	1,17	0,63	0,91	0,79	–	1,00	0,82
+36	1,88	–	1,50	–	1,19	1,09	0,92	0,94	–	1,04	1,11
+45	1,89	–	1,53	–	1,47	1,10	0,90	0,93	–	1,08	1,14
Kategorie: Gütertransporttrassen (ICG)											
+ 3	1,81	–	1,49	–	1,05	1,07	0,86	0,90	–	0,88	1,21
+ 6	1,82	–	1,52	–	1,06	1,09	0,85	0,90	–	0,88	1,27
+ 9	1,81	–	1,51	–	1,06	1,09	0,85	0,90	–	0,88	1,35
+12	1,71	–	1,34	–	1,05	1,09	0,84	0,90	–	0,88	0,92
+15	1,82	–	1,52	–	1,06	1,09	0,86	0,90	–	0,88	1,54
Kategorie: Alle Trassen											
+33	2,98	–	1,60	–	1,51	1,41	0,95	0,88	3,02	1,21	1,23

6 Resultate der Auktionsrechnungen in den verkehrstechnischen Szenarien

Tabelle 6.3:

Einnahmen des Auktionators am Auktionsende bezüglich der verschiedenen Zugtypen. Gebotsmodell: erlösorientiert (302 zulässige Gebote der Referenztrassen), Flexibilität: 1

Einnahmen:	ICE			IC			RE		
	e	t	d	e	t	d	e	t	d
Kategorie: Fernverkehr – Einzeltrassen (ICE, IC)									
+ 6	13152	0	1330	4498	0	337	3530	1412	155
+12	14860	0	1384	3655	0	197	3530	1412	155
+18	16817	0	1377	4569	0	359	3530	1412	155
+24	20398	0	1349	6046	0	372	4013	1412	155
+30	24995	0	1517	6784	0	557	4263	1703	152
Kategorie: Fernverkehr – Takttrassen (ICE, IC)									
+ 6	11280	0	743	3645	3498	376	2821	1405	126
+12	11725	1556	905	3645	3498	376	2917	1405	114
+18	11725	1985	930	3645	4855	-893	3061	1405	114
+24	11479	3577	1614	3645	6513	691	3061	1405	114
+30	12695	3577	1614	3645	6513	691	3125	1405	114
Kategorie: Regionalverkehr – Einzeltrassen (RE, RB, SB)									
+ 9	9877	0	1101	3633	0	121	3862	1410	192
+18	9975	0	1101	3655	0	121	4415	1410	280
+27	9975	0	1101	3684	0	136	4923	1419	337
+36	10070	0	1098	3681	0	133	6220	1419	384
+45	10070	0	1098	3681	0	133	6419	1419	435
Kategorie: Regionalverkehr – Takttrassen (RE, RB, SB)									
+ 9	9624	0	1044	3653	0	141	3391	1437	147
+18	9624	0	1044	3653	0	141	3377	1437	-1228
+27	10300	0	1044	3653	0	141	3362	1431	-3100
+36	10300	0	1044	3653	0	141	3412	1431	112
+45	10300	0	1044	3593	0	143	4211	1644	102
Kategorie: Gütertransporttrassen (ICG)									
+ 3	9831	0	1251	3676	0	164	3010	1421	100
+ 6	9831	0	1251	3676	0	164	3036	1421	100
+ 9	9831	0	1251	3676	0	164	3036	1421	100
+12	9831	0	1251	3710	0	160	3036	1421	100
+15	9831	0	1251	3710	0	160	3036	1421	100
Kategorie: Alle Trassen									
+33	17256	0	1170	3834	0	201	4914	2497	386

Tabelle 6.4:

Einnahmen des Auktionators am Auktionsende bezüglich der verschiedenen Zugtypen. Gebotsmodell: erlösorientiert (302 zulässige Gebote der Referenztrassen), Flexibilität: 1

Einnahmen:	RB			SB			ICG		Gesamteinnahmen
	e	t	d	e	t	d	e	d	
Kategorie: Fernverkehr – Einzeltrassen (ICE, IC)									
+ 6	3752	1214	85	0	1806	-4	3685	342	33049
+12	3710	1214	85	0	1806	-4	4219	303	34406
+18	3710	1214	85	0	1922	-4	4007	283	37181
+24	3513	1214	85	0	2372	-4	3666	268	42634
+30	3405	1214	85	0	2123	-6	3911	259	48398
Kategorie: Fernverkehr – Takttrassen (ICE, IC)									
+ 6	3747	1214	107	0	1810	0	4224	378	33644
+12	3747	1214	107	0	1810	0	4212	366	35729
+18	3679	872	-91	0	1948	-8	4012	358	37187
+24	3482	872	107	0	1772	-8	4012	358	39818
+30	3900	872	107	0	1772	-8	4074	358	41578
Kategorie: Regionalverkehr – Einzeltrassen (RE, RB, SB)									
+ 9	3784	1214	55	363	1684	13	3862	383	29689
+18	3901	1214	58	545	1726	28	3904	383	30745
+27	4027	1214	68	767	1632	31	3874	-31	31515
+36	4241	1214	84	687	1681	41	3910	388	33123
+45	4457	1214	91	779	1817	47	3857	388	33713
Kategorie: Regionalverkehr – Takttrassen (RE, RB, SB)									
+ 9	3639	1214	69	0	1999	24	4150	483	29107
+18	3961	1214	69	0	2452	60	4040	484	29758
+27	3961	1371	-503	0	2671	81	4093	463	30842
+36	3847	1598	77	0	2784	99	4096	466	31121
+45	3847	1598	77	0	3057	135	4165	486	32415
Kategorie: Gütertransporttrassen (ICG)									
+ 3	3613	1214	43	0	1806	-4	5055	1034	29626
+ 6	3613	1214	43	0	1806	-4	5498	1340	30095
+ 9	3613	1214	43	0	1806	-4	6459	1880	31056
+12	3613	1214	43	0	1806	-4	7759	2800	32390
+15	3613	1214	43	0	1805	-5	8499	3220	33129
Kategorie: Alle Trassen									
+33	4022	1214	163	290	2321	18	5172	976	41520

6 Resultate der Auktionsrechnungen in den verkehrstechnischen Szenarien

Tabelle 6.5:

Trassenzuteilung am Auktionsende bezüglich der verschiedenen Zugtypen. Gebotsmodell: TPS 2005-orientiert (310 zulässige Gebote der Referenztrassen), Flexibilität: 1

Zugtypzuteilung: Referenzfp.	ICE		IC		RE		RB		SB		ICG	Runden
	e	t	e	t	e	t	e	t	e	t	e	
	27	0	27	0	38	19	87	23	0	61	28	
Kategorie: Fernverkehr – Einzeltrassen (ICE, IC)												
+ 6	28	0	27	0	38	19	87	23	0	61	28	15
+12	30	0	26	0	38	19	85	23	0	61	26	16
+18	29	0	29	0	38	19	85	23	0	61	25	17
+24	30	0	29	0	38	19	85	23	0	61	25	18
+30	30	0	31	0	38	19	85	23	0	61	25	20
Kategorie: Fernverkehr – Taktrassen (ICE, IC)												
+ 6	25	0	27	3	36	19	87	23	0	61	27	17
+12	26	3	27	3	36	19	87	23	0	61	27	21
+18	26	6	27	6	36	19	85	19	0	61	26	21
+24	24	9	27	9	36	19	83	19	0	58	26	22
+30	24	12	27	10	36	19	83	19	0	58	27	22
Kategorie: Regionalverkehr – Einzeltrassen (RE, RB, SB)												
+ 9	27	0	27	0	40	19	87	23	2	58	27	19
+18	27	0	27	0	42	19	88	23	4	58	27	20
+27	27	0	25	0	44	19	89	23	5	58	28	20
+36	27	0	25	0	43	19	92	23	7	54	28	23
+45	27	0	25	0	44	19	93	23	8	50	27	23
Kategorie: Regionalverkehr – Taktrassen (RE, RB, SB)												
+ 9	27	0	27	0	36	19	87	26	0	60	28	17
+18	27	0	27	0	36	19	83	29	0	59	27	30
+27	27	0	27	0	36	27	83	32	0	62	27	30
+36	27	0	27	0	36	22	85	32	0	65	27	22
+45	27	0	26	0	34	22	85	35	0	65	25	26
Kategorie: Gütertransporttrassen (ICG)												
+ 3	27	0	27	0	38	19	87	23	0	61	31	1
+ 6	27	0	27	0	38	19	87	23	0	61	33	19
+ 9	27	0	27	0	38	19	87	23	0	61	36	19
+12	27	0	27	0	38	19	87	23	0	61	39	19
+15	27	0	27	0	38	19	87	23	0	61	42	19
Kategorie: Alle Trassen												
+33	27	0	26	0	37	22	86	26	0	60	30	29
+66	28	0	25	3	38	25	85	29	2	55	31	29

Tabelle 6.6:

Einnahmen des Auktionators pro Trassenkilometer am Auktionsende bezüglich der verschiedenen Zugtypen. Gebotsmodell: TPS 2005-orientiert (310 zulässige Gebote der Referenztrassen), Flexibilität: 1

km-Preise:	ICE		IC		RE		RB		SB		ICG
	e	t	e	t	e	t	e	t	e	t	
Kategorie: Fernverkehr – Einzeltrassen (ICE, IC)											
+ 6	1,44	–	1,10	–	1,00	1,04	0,86	0,90	–	0,87	0,44
+12	2,02	–	1,48	–	1,06	1,07	0,90	0,90	–	0,89	1,12
+18	2,00	–	1,70	–	1,06	1,07	0,89	0,90	–	0,90	1,12
+24	2,04	–	1,78	–	1,24	1,07	0,93	0,90	–	0,98	1,12
+30	2,21	–	1,83	–	1,25	1,07	1,00	0,85	–	0,96	1,14
Kategorie: Fernverkehr – Takttrassen (ICE, IC)											
+ 6	1,83	–	1,45	2,84	1,05	1,10	0,89	0,90	–	0,89	1,02
+12	1,84	1,90	1,43	3,48	1,05	1,10	0,89	0,90	–	0,89	0,99
+18	1,88	1,85	1,44	3,27	1,14	1,10	0,91	0,90	–	0,89	1,10
+24	1,89	1,94	1,45	3,27	1,14	1,10	0,89	0,83	–	0,90	1,10
+30	2,19	1,94	1,47	3,27	1,15	1,10	0,88	0,82	–	0,89	1,15
Kategorie: Regionalverkehr – Einzeltrassen (RE, RB, SB)											
+ 9	1,72	–	1,43	–	1,16	1,08	0,88	0,90	1,22	0,95	1,10
+18	1,73	–	1,45	–	1,23	1,08	0,89	0,90	1,17	1,05	1,12
+27	1,74	–	1,41	–	1,23	1,08	0,91	0,90	1,15	1,10	1,14
+36	1,71	–	1,38	–	1,21	1,09	0,96	0,86	1,53	1,12	1,19
+45	1,70	–	1,27	–	1,15	0,98	0,96	0,87	1,58	1,13	0,86
Kategorie: Regionalverkehr – Takttrassen (RE, RB, SB)											
+ 9	1,69	–	1,48	–	1,05	1,08	0,82	1,11	–	0,93	0,75
+18	2,01	–	1,47	–	1,06	1,08	0,88	1,44	–	1,06	1,08
+27	2,31	–	1,34	–	1,02	1,04	0,88	1,41	–	1,06	0,98
+36	2,21	–	1,46	–	1,03	0,75	0,90	1,20	–	1,13	1,06
+45	2,12	–	1,49	–	1,04	1,14	0,90	1,38	–	1,25	1,14
Kategorie: Gütertransporttrassen (ICG)											
+ 3	1,69	–	1,43	–	1,05	1,06	0,88	0,90	–	0,88	1,30
+ 6	1,69	–	1,44	–	1,08	1,08	0,88	0,90	–	0,88	1,37
+ 9	1,51	–	1,40	–	1,07	1,04	0,85	0,90	–	0,87	0,98
+12	1,69	–	1,44	–	1,08	1,08	0,88	0,90	–	0,88	1,54
+15	1,45	–	1,44	–	1,08	1,08	0,87	0,90	–	0,88	1,03
Kategorie: Alle Trassen											
+33	2,04	–	1,49	–	1,09	1,22	0,87	1,08	–	1,32	1,33
+66	2,21	–	1,88	2,87	1,03	1,10	0,89	1,11	1,53	1,47	1,60

6 Resultate der Auktionsrechnungen in den verkehrstechnischen Szenarien

Tabelle 6.7:

Einnahmen des Auktionators am Auktionsende bezüglich der verschiedenen Zugtypen. Gebotsmodell: TPS 2005-orientiert (310 zulässige Gebote der Referenztrassen), Flexibilität: 1

Einnahmen:	ICE			IC			RE		
	e	t	d	e	t	d	e	t	d
Kategorie: Fernverkehr – Einzeltrassen (ICE, IC)									
+ 6	10986	0	-481	3574	0	-977	3233	1405	104
+12	11970	0	696	3528	0	71	3233	1405	104
+18	11858	0	713	5502	0	302	3233	1404	103
+24	12465	0	701	5502	0	302	3755	1404	103
+30	13436	0	701	6361	0	536	3809	1404	103
Kategorie: Fernverkehr – Takttrassen (ICE, IC)									
+ 6	9311	0	748	3555	1657	156	2885	1440	107
+12	9691	1665	1009	3543	2031	176	2913	1440	99
+18	9877	2079	1027	3545	3876	268	3149	1440	99
+24	9601	3285	1294	3545	5043	385	3149	1440	99
+30	11045	3285	-1337	3611	5043	66	3163	1440	99
Kategorie: Regionalverkehr – Einzeltrassen (RE, RB, SB)									
+ 9	9326	0	647	3563	0	52	3975	1417	161
+18	9424	0	647	3563	0	52	4567	1417	240
+27	9424	0	647	3355	0	52	4828	1417	249
+36	9415	0	638	3355	0	52	4691	1426	272
+45	9415	0	638	3355	0	52	4887	1426	-334
Kategorie: Regionalverkehr – Takttrassen (RE, RB, SB)									
+ 9	10253	0	364	3564	0	53	2968	1413	103
+18	10929	0	364	3564	0	53	2966	1413	101
+27	12566	0	364	3564	0	53	2960	1411	-5750
+36	12228	0	364	3564	0	53	2960	1411	-1701
+45	11605	0	364	3500	0	51	2628	1704	82
Kategorie: Gütertransporttrassen (ICG)									
+ 3	9137	0	556	3515	0	4	3194	1408	68
+ 6	9137	0	556	3515	0	4	3298	1408	68
+ 9	9137	0	556	3515	0	4	3298	1408	68
+12	9137	0	556	3515	0	4	3298	1408	68
+15	9137	0	556	3515	0	4	3298	1408	68
Kategorie: Alle Trassen									
+33	11590	0	421	3554	0	50	3319	2157	276
+66	13140	0	748	4128	1680	41	3485	2376	336

Tabelle 6.8:

Einnahmen des Auktionators am Auktionsende bezüglich der verschiedenen Zugtypen. Gebotsmodell: TPS 2005-orientiert (310 zulässige Gebote der Referenztrassen), Flexibilität: 1

Einnahmen:	RB			SB			ICG		Gesamteinnahmen
	e	t	d	e	t	d	e	d	
Kategorie: Fernverkehr – Einzeltrassen (ICE, IC)									
+ 6	3951	1216	113	0	1803	-6	4330	463	30498
+12	3884	1216	113	0	1803	-6	4089	395	31128
+18	3884	1216	113	0	1835	-6	3857	355	32789
+24	4122	1216	63	0	2011	-6	3946	178	34421
+30	4341	1216	110	0	1962	-11	3937	265	36466
Kategorie: Fernverkehr – Takttrassen (ICE, IC)									
+ 6	3846	1216	109	0	1806	-3	4480	856	30196
+12	3846	1216	109	0	1806	-3	4162	538	32313
+18	3740	872	101	0	1823	-14	3906	474	34307
+24	3544	872	101	0	1646	-14	3906	474	36031
+30	3594	872	101	0	1646	-14	4123	-149	37822
Kategorie: Regionalverkehr – Einzeltrassen (RE, RB, SB)									
+ 9	3813	1216	76	195	1923	18	3964	485	29392
+18	3874	1216	79	353	2121	33	4069	485	30604
+27	4178	1216	95	397	2216	35	4149	71	31180
+36	4733	1216	91	770	2124	47	4541	549	32271
+45	4938	1216	113	949	2148	55	4488	549	32822
Kategorie: Regionalverkehr – Takttrassen (RE, RB, SB)									
+ 9	3799	1786	80	0	2071	-6	4125	458	29979
+18	3583	2560	122	0	2450	30	4017	461	31482
+27	3583	2750	162	0	2669	51	4160	419	33663
+36	4007	2301	148	0	3026	69	4123	419	33620
+45	4023	3102	319	0	3678	132	4027	481	34267
Kategorie: Gütertransporttrassen (ICG)									
+ 3	3852	1216	115	0	1803	-6	5449	1428	29574
+ 6	3852	1216	115	0	1803	-6	5922	1764	30151
+ 9	3852	1216	115	0	1803	-6	6913	2334	31142
+12	3852	1216	115	0	1803	-6	8169	3210	32398
+15	3852	1216	115	0	1803	-6	8765	3486	32994
Kategorie: Alle Trassen									
+33	3959	1831	198	0	2728	81	5460	1280	34598
+66	4080	2086	255	196	3109	111	7082	2238	41362

6 Resultate der Auktionsrechnungen in den verkehrstechnischen Szenarien

Tabelle 6.9:

Trassenzuteilung am Auktionsende bezüglich der verschiedenen Zugtypen. Gebotsmodell: erlö-
sorientiert (302 zulässige Gebote der Referenztrassen), Flexibilität: 3

Zugtypzuteilung:	ICE	IC	RE	RB	SB	ICG	Runden
Referenzfp.	e t	e t	e t	e t	e t	e	
	27 0	27 0	38 19	87 23	0 61	28	
Kategorie: Fernverkehr – Einzeltrassen (ICE, IC)							
+ 6	28 0	29 0	34 19	80 23	0 61	26	32
+12	30 0	29 0	34 19	78 23	0 61	26	33
Kategorie: Fernverkehr – Takttrassen (ICE, IC)							
+ 6	27 0	27 3	32 19	83 23	0 61	27	29
+12	27 3	27 3	32 19	83 23	0 61	27	29
Kategorie: Regionalverkehr – Einzeltrassen (RE, RB, SB)							
+ 9	27 0	27 0	36 19	84 23	3 54	27	15
+18	27 0	27 0	39 19	83 23	6 50	27	15
Kategorie: Regionalverkehr – Takttrassen (RE, RB, SB)							
+ 9	27 0	27 0	34 19	83 23	0 60	28	18
+18	27 0	27 0	34 19	81 26	0 60	27	18
Kategorie: Gütertransporttrassen (ICG)							
+ 3	27 0	27 0	34 19	83 23	0 61	31	1
+ 6	27 0	27 0	34 19	83 23	0 61	33	12

Tabelle 6.10:

Einnahmen des Auktionators pro Trassenkilometer am Auktionsende bezüglich der verschiedenen Zugtypen. Gebotsmodell: erlösorientiert (302 zulässige Gebote der Referenztrassen), Flexibilität: 3

km-Preise:	ICE		IC		RE		RB		SB		ICG
	e	t	e	t	e	t	e	t	e	t	
Kategorie: Fernverkehr – Einzeltrassen (ICE, IC)											
+ 6	2,16	–	1,79	–	1,29	1,06	0,84	0,89	–	0,84	1,14
+12	2,32	–	1,82	–	1,31	1,08	0,85	0,90	–	0,83	1,17
Kategorie: Fernverkehr – Takttrassen (ICE, IC)											
+ 6	1,92	–	1,52	3,26	1,04	1,05	0,89	0,90	–	0,85	1,11
+12	2,05	1,77	1,52	3,26	1,04	1,05	0,89	0,90	–	0,85	1,11
Kategorie: Regionalverkehr – Einzeltrassen (RE, RB, SB)											
+ 9	1,77	–	1,51	–	1,18	1,08	0,84	0,88	1,42	0,86	1,05
+18	1,83	–	1,51	–	1,25	1,09	0,86	0,85	1,27	0,91	1,08
Kategorie: Regionalverkehr – Takttrassen (RE, RB, SB)											
+ 9	1,78	–	1,52	–	1,17	1,07	0,85	0,90	–	0,87	1,08
+18	1,76	–	1,51	–	1,16	1,10	0,83	0,90	–	0,96	1,07
Kategorie: Gütertransporttrassen (ICG)											
+ 3	1,80	–	1,52	–	1,06	1,09	0,81	0,86	–	0,87	1,20
+ 6	1,80	–	1,55	–	1,07	1,09	0,81	0,86	–	0,85	1,27

6 Resultate der Auktionsrechnungen in den verkehrstechnischen Szenarien

Tabelle 6.11:

Einnahmen des Auktionators am Auktionsende bezüglich der verschiedenen Zugtypen. Gebotsmodell: erlöorientiert (302 zulässige Gebote der Referenztrassen), Flexibilität: 3

Einnahmen:	ICE			IC			RE		
	e	t	d	e	t	d	e	t	d
Kategorie: Fernverkehr – Einzeltrassen (ICE, IC)									
+ 6	12196	0	1274	5171	0	481	3680	1412	155
+12	13860	0	1328	4978	0	341	3716	1412	155
Kategorie: Fernverkehr – Taktrassen (ICE, IC)									
+ 6	10368	0	708	3653	1905	330	2737	1405	126
+12	11092	1556	870	3653	1905	330	2737	1405	126
Kategorie: Regionalverkehr – Einzeltrassen (RE, RB, SB)									
+ 9	9877	0	1101	3633	0	121	3862	1410	192
+18	9877	0	1101	3625	0	113	4467	1428	290
Kategorie: Regionalverkehr – Taktrassen (RE, RB, SB)									
+ 9	9624	0	1044	3653	0	141	3391	1437	147
+18	9624	0	1044	3653	0	141	3376	1437	132
Kategorie: Gütertransporttrassen (ICG)									
+ 3	9831	0	1251	3676	0	164	3010	1421	100
+ 6	9831	0	1251	3733	0	164	3036	1421	100

Einnahmen:	RB			SB			ICG		Gesamt-einnahmen
	e	t	d	e	t	d	e	d	
Kategorie: Fernverkehr – Einzeltrassen (ICE, IC)									
+ 6	3588	1214	85	0	1806	-4	3962	397	33029
+12	3568	1214	85	0	1806	-4	4268	296	34822
Kategorie: Fernverkehr – Taktrassen (ICE, IC)									
+ 6	3747	1214	107	0	1810	0	4244	398	31083
+12	3747	1214	107	0	1810	0	4232	386	33351
Kategorie: Regionalverkehr – Einzeltrassen (RE, RB, SB)									
+ 9	3731	1214	65	363	1684	13	3870	391	29644
+18	3764	1214	68	581	1678	27	3912	391	30546
Kategorie: Regionalverkehr – Taktrassen (RE, RB, SB)									
+ 9	3639	1214	69	0	1999	24	4150	483	29107
+18	3603	1405	53	0	2302	56	4040	484	29440
Kategorie: Gütertransporttrassen (ICG)									
+ 3	3613	1214	43	0	1806	-4	5107	1086	29678
+ 6	3613	1214	43	0	1806	-4	5578	1420	30232

Tabelle 6.12:

Trassenzuteilung am Auktionsende bezüglich der verschiedenen Zugtypen. Gebotsmodell: TPS 2005-orientiert (310 zulässige Gebote der Referenztrassen), Flexibilität: 3

Zugtypzuteilung:	ICE	IC	RE	RB	SB	ICG	Runden
Referenzfp.	e t	e t	e t	e t	e t	e	
	27 0	27 0	38 19	87 23	0 61	28	
Kategorie: Fernverkehr – Einzeltrassen (ICE, IC)							
+ 6	28 0	28 0	38 19	84 23	0 61	28	13
+12	30 0	29 0	38 19	82 23	0 61	26	15
Kategorie: Fernverkehr – Takttrassen (ICE, IC)							
+ 6	27 0	27 3	36 19	87 23	0 61	27	13
+12	27 3	27 3	36 19	87 23	0 61	27	13
Kategorie: Regionalverkehr – Einzeltrassen (RE, RB, SB)							
+ 9	27 0	27 0	40 19	88 23	2 58	27	19
+18	27 0	27 0	43 19	87 23	4 58	27	20
Kategorie: Regionalverkehr – Takttrassen (RE, RB, SB)							
+ 9	27 0	27 0	36 19	87 26	0 60	28	20
+18	27 0	27 0	36 19	85 29	0 60	27	22
Kategorie: Gütertransporttrassen (ICG)							
+ 3	27 0	27 0	38 19	87 23	0 61	31	1
+ 6	27 0	26 0	38 19	87 23	0 61	34	7

6 Resultate der Auktionsrechnungen in den verkehrstechnischen Szenarien

Tabelle 6.13:

Einnahmen des Auktionators pro Trassenkilometer am Auktionsende bezüglich der verschiedenen Zugtypen. Gebotsmodell: TPS 2005-orientiert (310 zulässige Gebote der Referenztrassen), Flexibilität: 3

km-Preise:	ICE		IC		RE		RB		SB		ICG
	e	t	e	t	e	t	e	t	e	t	e
Kategorie: Fernverkehr – Einzeltrassen (ICE, IC)											
+ 6	1,89	–	1,54	–	1,10	1,05	0,85	0,89	–	0,86	0,99
+12	1,93	–	1,60	–	1,11	1,07	0,85	0,90	–	0,82	0,90
Kategorie: Fernverkehr – Takttrassen (ICE, IC)											
+ 6	1,71	–	1,50	1,67	1,01	1,09	0,88	0,90	–	0,85	1,15
+12	1,79	1,89	1,48	1,67	1,01	1,09	0,87	0,90	–	0,82	0,89
Kategorie: Regionalverkehr – Einzeltrassen (RE, RB, SB)											
+ 9	1,72	–	1,47	–	1,14	1,08	0,86	0,88	1,22	0,94	1,12
+18	1,73	–	1,48	–	1,23	1,08	0,86	0,85	1,12	1,05	1,13
Kategorie: Regionalverkehr – Takttrassen (RE, RB, SB)											
+ 9	1,89	–	1,47	–	1,05	1,05	0,84	1,13	–	0,95	1,07
+18	2,02	–	1,49	–	1,03	1,08	0,83	1,11	–	1,13	1,06
Kategorie: Gütertransporttrassen (ICG)											
+ 3	1,67	–	1,44	–	1,05	1,08	0,83	0,86	–	0,87	1,24
+ 6	1,67	–	1,44	–	1,05	1,07	0,83	0,86	–	0,87	1,37

Tabelle 6.14:

Einnahmen des Auktionators am Auktionsende bezüglich der verschiedenen Zugtypen. Gebotsmodell: TPS 2005-orientiert (310 zulässige Gebote der Referenztrassen), Flexibilität: 3

Einnahmen:	ICE			IC			RE		
	e	t	d	e	t	d	e	t	d
Kategorie: Fernverkehr – Einzeltrassen (ICE, IC)									
+ 6	10700	0	611	4043	0	147	3383	1405	104
+12	11535	0	672	4381	0	155	3383	1405	104
Kategorie: Fernverkehr – Takttrassen (ICE, IC)									
+ 6	9269	0	688	3555	973	156	2885	1440	107
+12	9671	1665	1000	3555	973	156	2885	1440	107
Kategorie: Regionalverkehr – Einzeltrassen (RE, RB, SB)									
+ 9	9326	0	647	3563	0	52	3975	1417	161
+18	9326	0	647	3563	0	52	4627	1417	240
Kategorie: Regionalverkehr – Takttrassen (RE, RB, SB)									
+ 9	10253	0	364	3564	0	53	2968	1413	103
+18	11030	0	364	3564	0	53	2966	1413	101
Kategorie: Gütertransporttrassen (ICG)									
+ 3	9137	0	556	3515	0	4	3194	1408	68
+ 6	9137	0	556	3419	0	4	3194	1400	60
Einnahmen:	RB			SB			ICG		Gesamt- einnahmen
	e	t	d	e	t	d	e	d	
Kategorie: Fernverkehr – Einzeltrassen (ICE, IC)									
+ 6	3783	1216	113	0	1803	-6	4479	509	30812
+12	3763	1216	113	0	1803	-6	4047	353	31533
Kategorie: Fernverkehr – Takttrassen (ICE, IC)									
+ 6	3846	1216	109	0	1806	-3	4336	712	29326
+12	3846	1216	109	0	1806	-3	4268	644	31325
Kategorie: Regionalverkehr – Einzeltrassen (RE, RB, SB)									
+ 9	3927	1216	94	195	1923	18	4064	585	29606
+18	3960	1216	97	336	2217	32	4171	587	30833
Kategorie: Regionalverkehr – Takttrassen (RE, RB, SB)									
+ 9	3799	1786	80	0	2203	-6	4159	492	30145
+18	3767	1966	56	0	2690	28	4048	492	31444
Kategorie: Gütertransporttrassen (ICG)									
+ 3	3852	1216	115	0	1803	-6	5489	1468	29614
+ 6	3852	1216	115	0	1803	-6	6132	1862	30153

6.2 Interpretation der Auktionsresultate

An den Ergebnisstabellen der Auktionssimulationen sind einige eisenbahntechnisch interessante Effekte zu erkennen. Diese Beobachtungen werden im Folgenden vorgestellt. Desweiteren soll versucht werden, basierend auf den Charakteristiken der fünf verschiedenen Trassentypen und den unterschiedlichen Gebotsmodellen, Erklärungen für die Effekte zu finden. Zuerst werden die Allokationen in den einzelnen Szenarien betrachtet. Anschließend werden auch szenarienübergreifende Zusammenhänge in den Einnahmen untersucht. Unterstützend werden die Beobachtungen in Diagrammen veranschaulicht. Dabei stellen die Zuteilungsabbildungen die Anzahl der allozierten Trassen eines Typs bezüglich der vorhandenen Trassenanzahl des entsprechenden Typs im Referenzfahrplan dar. Bei diesen Allokationsdiagrammen ist außerdem zu beachten, dass unter Verwendung des erlösorientierten Gebotsmodells acht Trassen des Referenzfahrplans keine zulässigen Gebote erhalten. Die Zahlungsbereitschaften dieser Trassen (vier RE- und vier RB-Trassen) sind geringer als die zugehörigen Grundpreise. Da sich die hier betrachteten Allokationswerte nur auf Trassen mit zulässigen Geboten beziehen, werden folglich in den Auktionen des erlösorientierten Modells höchstens 302 Referenztrassen in den Fahrplan aufgenommen. Im TPS-Modell erhalten alle 310 Referenztrassen in der ersten Runde zulässige Gebote.

Zugtypenzuteilung

Die Auktionsergebnisse aller Beispiele des Szenarios Erhöhung der Einzeltrassen im Fernverkehr zeigen deutlich, dass diese Trassen vermehrt alloziert werden (dargestellt in den Abbildungen 6.1 und 6.2). Dies geschieht hauptsächlich zu Lasten der

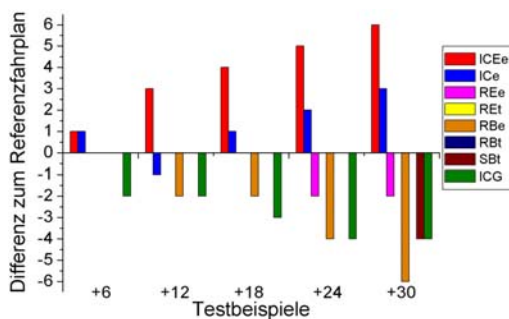


Abbildung 6.1:

Zugtypenzuteilung bei Erhöhung der Fernverkehrseinzeltrassen unter Verwendung des erlösorientierten Gebotsmodells

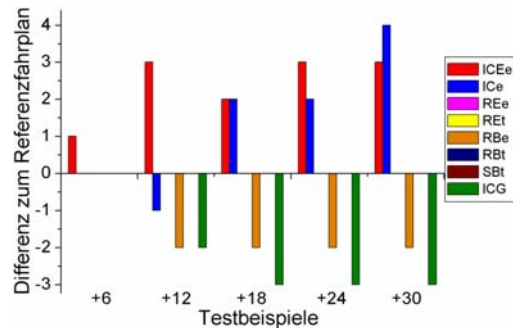


Abbildung 6.2:

Zugtypenzuteilung bei Erhöhung der Fernverkehrseinzeltrassen unter Verwendung des TPS-orientierten Gebotsmodell

Regionalverkehrseinzel- und Gütertrassen. Es ist zu vermuten, dass aufgrund der Flexibilität in der Trassenlinie des Fernverkehrs (wenige Zwischenhalte) die Regionalverkehrstrassen zu Kosten der Einzeltrassen verschont werden. Im Falle des erlösorientierten

Gebotsmodells wird weiterhin deutlich, dass der ICE stärker dominiert als der IC, was vermutlich auf die hohen Gebote zurückzuführen ist (siehe auch Kilometereinnahmen in Tabelle 6.2). Die Zahlungsbereitschaften des ICEs werden im erlösorientierten Modell höher gewichtet als im TPS-Modell, bedingt durch die hohen Investitionen in die benötigte Infrastruktur.

Die Fernverkehrtakttrassen verhalten sich bei einer leichten Erhöhung derselbigen ähnlich wie die Einzeltrassen (Abbildungen 6.3 und 6.4). Sie verdrängen jedoch bei einem

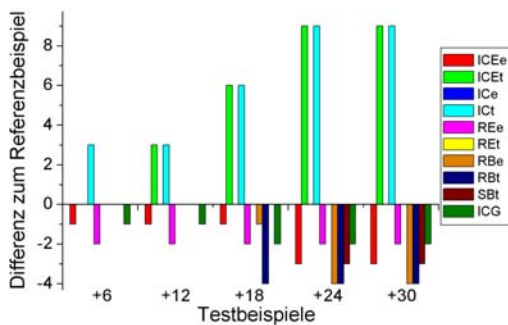


Abbildung 6.3:

Zugtypzuteilung bei Erhöhung der Fernverkehrtakttrassen unter Verwendung des erlösorientierten Gebotsmodells

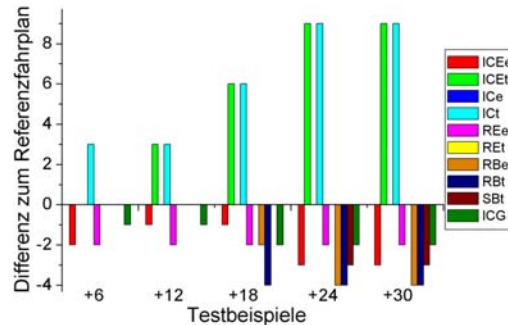


Abbildung 6.4:

Zugtypzuteilung bei Erhöhung der Fernverkehrtakttrassen unter Verwendung des TPS-orientierten Gebotsmodell

starken Anstieg (Beispiele +18, +24, +30) auch den Regionaltaktverkehr und Fernverkehrseinzeltrassen. Bemerkenswert sind hierbei die Preise, die von den simulierten Anbietern der IC-Takttrassen für die Allokationen zu zahlen sind. Diese Preise sind, auf einen Trassenkilometer bezogen, mehr als doppelt so teuer wie bei den ICE-Takten. Im Durchschnitt kostet der Kilometer eines IC-Zuges, der einem Takt angehört 4,79 €, während für einen Trassenkilometer im ICE-Takt nur 1,94 € gezahlt wird. Auch im TPS-Modell ist der Trassenkilometerpreis eines IC-Taktes erhöht (IC: 3,23 €, ICE: 1,91 €).

Im Szenario Erhöhung der Regionalverkehreinzeltrassen können sich dieselbigen ohne sichtbaren Anstieg (im Vergleich zu ihren Werten bei den bereits behandelten Szenarien) in den zu zahlenden Trassenkilometerpreisen durchsetzen (Abbildungen 6.5, 6.6 und Tabellen 6.2, 6.6). Die Hauptverlierer sind hier die SB-Takttrassen, aber auch der Güterverkehr muss einbüßen. bei großer Konkurrenz durch Einzeltrassen (Beispiele +36 und +45) werden trotz erhöhter Preise beziehungsweise Gebote (im Vergleich zu den kleineren Beispielen bei beiden Gebotsmodellen) sehr viele SB-Takte verdrängt. Mit zunehmender Allokation der RE-Einzeltrassen steigen bei Verwendung des erlösorientierten Gebotsmodells die Trassenkilometerpreise. Ein ähnlicher Effekt ist im TPS-Modell bei den SB-Einzeltrassen zu beobachten. Die Einzeltrassen des Zugtyps RB können sich im TPS-Modell besser durchsetzen als im erlösorientierten, was jedoch nicht auf die Gebote zurückzuführen ist, da die Trassenkilometereinnahmen in beiden Modellen annähernd identisch sind (Tabelle 6.2 und 6.6).

6 Resultate der Auktionsrechnungen in den verkehrstechnischen Szenarien

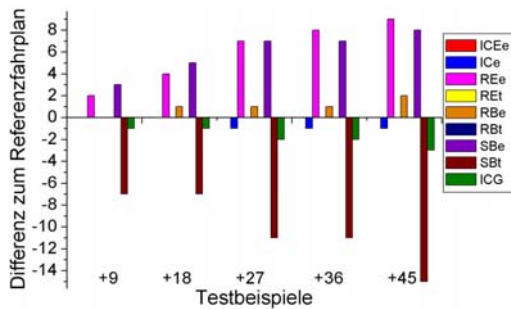


Abbildung 6.5: Zugtypzuteilung bei Erhöhung der Regionalverkehrseinzeltrassen unter Verwendung des erlösorientierten Gebotsmodells

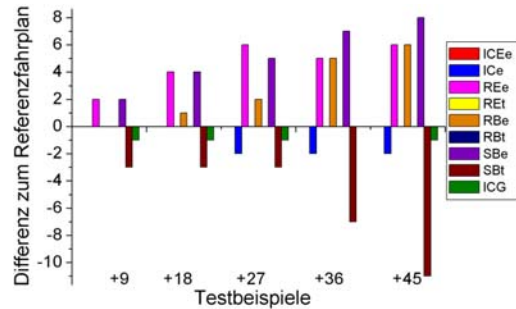


Abbildung 6.6: Zugtypzuteilung bei Erhöhung der Regionalverkehrseinzeltrassen unter Verwendung des TPS-orientierten Gebotsmodell

Bei der Erhöhung des Regionaltaktverkehrs können sich hauptsächlich die RB-Takttrassen durchsetzen (Abbildung 6.7). Im TPS-Gebotsmodell ist dies noch ausgeprägter

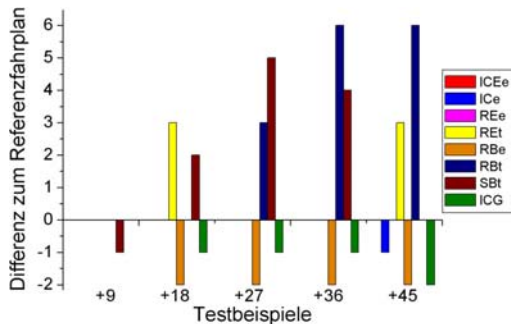


Abbildung 6.7: Zugtypzuteilung bei Erhöhung der Regionalverkehrtakttrassen unter Verwendung des erlösorientierten Gebotsmodells

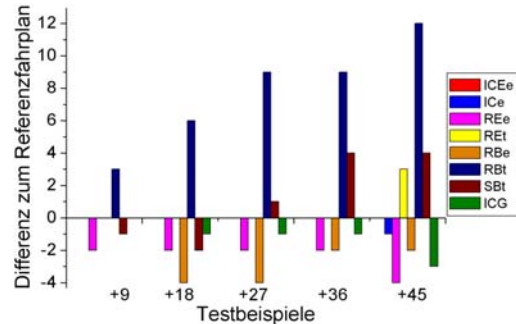
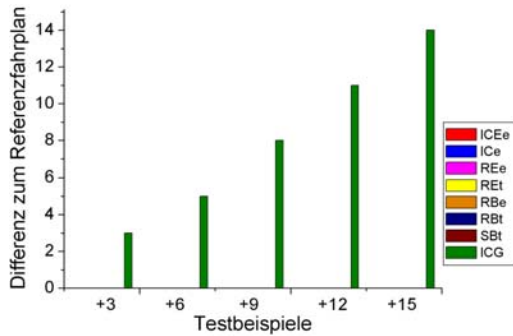


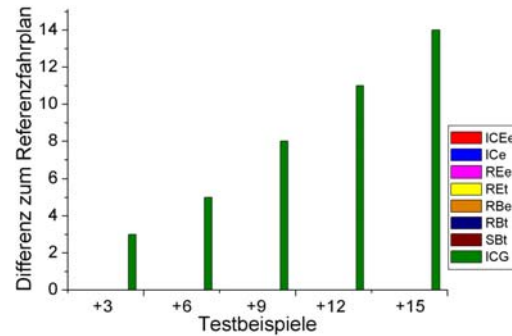
Abbildung 6.8: Zugtypzuteilung bei Erhöhung der Regionalverkehrtakttrassen unter Verwendung des TPS-orientierten Gebotsmodell

(Abbildung 6.8). Die Ursache dafür könnte in der Trassenlänge zu suchen sein. Während die Regionalbahnen kurze Strecken zurück legen, bewegen sich die Regionalexpresszüge interregional auf langen Strecken. Die RE-Takttrassen können ihre Anzahl nur in drei Fällen über die Anzahl der RE-Referenztakttrassen hinaus erhöhen. Die SB-Bahn kann sich demgegenüber etwas stärker behaupten. Sie fährt wie die Regionalbahn kurze Strecken. In diesem Szenario gibt es keinen Hauptverlierer. Verschiedene Einzeltrassen büßen nur minimal ein. Wahrscheinlich konkurrieren Regionaltaktverkehre auch unter einander und ein zusätzlicher Takt ersetzt einen Takt im Referenzfahrplan.

Die Trassenallokationen im Szenario Erhöhung des Güterverkehrs zeigen ein eindeutiges Bild. In jedem Beispiel dieses Szenarios können bezüglich beider Gebotsmodelle fast alle zusätzlichen Gütertransporttrassen in den Referenzfahrplan integriert werden (Abbil-

**Abbildung 6.9:**

Zugtypzuteilung bei Erhöhung der Gütertransporttrassen unter Verwendung des erlösorientierten Gebotsmodells

**Abbildung 6.10:**

Zugtypzuteilung bei Erhöhung der Gütertransporttrassen unter Verwendung des TPS-orientierten Gebotsmodell

dungen 6.9 und 6.10). Nur eine Trasse kann nicht alloziert werden. Der Güterverkehr kann sehr stark von seiner Flexibilität in der Trassenlinie profitieren. Bei der Formulierung des Trassengebots werden keine Zwischenhalte spezifiziert. Desweiteren ist an den Einnahmen für die Gütertrassen zu erkennen, dass ein Teil dieser Trassen mit einer kürzeren Fahrdauer als der geschätzten realisiert werden kann.² Insgesamt kann ein Fahrplan mit 324 Trassen erzeugt werden. Es geht deutlich hervor, dass es im Referenzfahrplan Kapazitäten für eine Erhöhung des Güterverkehrs gibt. Anhand der Rundenanzahl und der geringen Veränderungen in den zugtypspezifischen Auktionseinnahmen ist zu erkennen, dass es in den Beispielen dieses Szenarios wenige Konflikte gibt (Rundenspalte in Tabelle 6.1, 6.5 und ICG-Einnahmen in Tabelle 6.4, 6.8).

Bei der gleichzeitigen Erhöhung aller Trassentypen kann sich der Taktverkehr (S-Bahn ausgenommen) zusammen mit dem flexiblen Einzelverkehr der Zugtypen ICE und ICG behaupten (Tabelle 6.5). Während der S-Bahn-Taktverkehr bezüglich beider Gebotsmodelle einbüßt, ist ein leichter Anstieg der S-Bahn-Einzeltrassen zu verzeichnen. Bedingt durch die hohe Anzahl der zusätzlichen Trassen (im Vergleich zu den anderen Szenarien), ergibt sich vermutlich ein Anstieg in der Zahl der Konflikte, was die langen Rechenzeiten in diesem Szenario erklären würde.

Auktionseinnahmen

Die Einnahmen des Auktionators zum Ende der Auktionen sind für die Fernverkehrsszenarien in den Abbildungen 6.11 und 6.12, für die Regionalverkehrsszenarien in den Abbildungen 6.13 und 6.14 und für die Güterverkehrsszenarien in Abbildung 6.15 visualisiert. Fast alle Einnahmewerte in den Szenarien steigen monoton in der Trassenanzahl

²Die Fahrzeit der zusätzlich erzeugten Gütertrassen bestimmt sich aus der kürzest mögliche Fahrdauer und einer Erhöhung, in vier von fünf Fällen, um 50% und in einem von fünf Fällen um 10%.

6 Resultate der Auktionsrechnungen in den verkehrstechnischen Szenarien

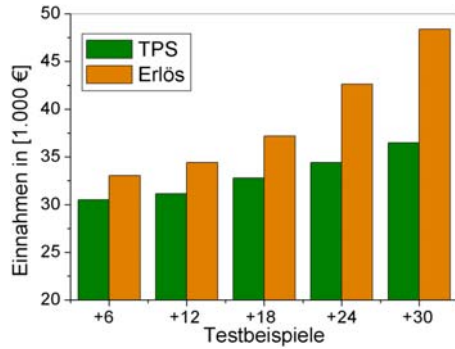


Abbildung 6.11:
Auktionseinnahmen im Szenario: Erhöhung der Fernverkehrseinzeltrassen

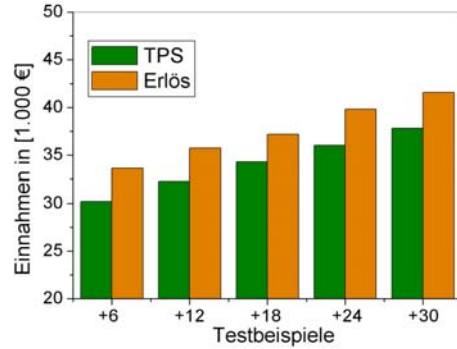


Abbildung 6.12:
Auktionseinnahmen im Szenario: Erhöhung der Fernverkehrtakttrassen

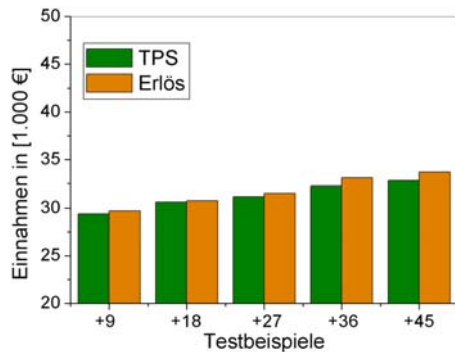


Abbildung 6.13:
Auktionseinnahmen im Szenario: Erhöhung der Regionalverkehrseinzeltrassen

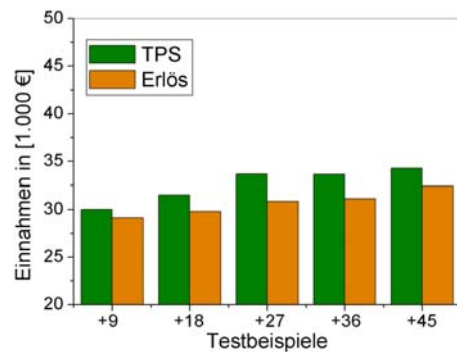


Abbildung 6.14:
Auktionseinnahmen im Szenario: Erhöhung der Regionalverkehrtakttrassen

der Beispiele, wie es zu erwarten ist. Eine Ausnahme bilden die Testbeispiele bei der Erhöhung der Regionalverkehrtakttrassen unter Verwendung des TPS-Gebotsmodells. Von Beispiel +27 zu +36 ist ein leichter Abfall in den Gesamteinnahmen zu verzeichnen (siehe auch Tabelle 6.8). Da in allen Szenarien die Gesamteinnahmen der Testbeispiele bezüglich der Allokation mit den maximalen Zahlungsbereitschaften monoton steigend sind, bleibt die Möglichkeit, dass es sich hierbei um einen Diskretisierungseffekt handelt. Durch das Auftreten neuer zusätzlicher Trassenwünsche (im Beispiel +36) wird der Gebotskampf in einem Konflikt, der im Beispiel +27 besteht, so beeinflusst, dass aufgrund der Wahl des Mindestinkrements die Allokation der am Konflikt beteiligten Trassen am Auktionsende nicht mehr so hohe Einnahmen verzeichnet wie im kleineren Beispiel. Ein solcher Fall wird an einem kleinen konstruierten Beispiel mit dem verwendeten Auktionsmechanismus gezeigt. Dazu werden zwei Trassenauktionen untersucht. In der ersten Auktion werden die Trassen A, B, und C mit den Zahlungsbereitschaften 65, 70 und 10 betrachtet. Dabei stehen A mit B und B mit C in Konflikt. Die zweite Auktion enthält neben den Trassen A, B

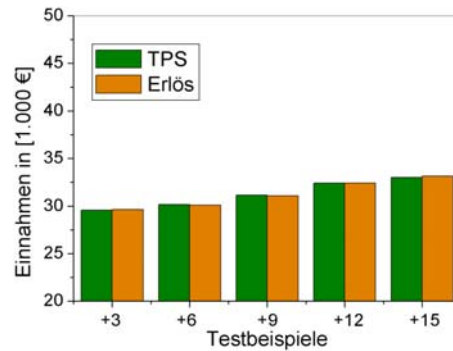


Abbildung 6.15:
Auktionseinnahmen im Szenario: Erhöhung der Gütertransporttrassen

und C zusätzlich die Trasse D, deren Zahlungsbereitschaft bei 10 liegt. Die Grundpreise ergeben in beiden Auktionen folgende Werte: 50 für A und B, 10 für C und D. Die Mindestinkremente sind jeweils 20% vom zugehörigen Grundpreis. Beide Auktionsabläufe sind mit ihren Einnahmewerten in der Tabelle 6.15 dargestellt. Dabei ist die Allokation in jeder Runde unterstrichen.

Tabelle 6.15: Zwei Auktionen zur Visualisierung des Diskretisierungseffekts

Auktion 1					Auktion 2					
Runde	A	B	C	Einnahmen	Runde	A	B	C	D	Einnahmen
1	<u>50</u>	50	<u>10</u>	60	1	<u>50</u>	50	<u>10</u>	<u>10</u>	70
2	<u>50</u>	60	<u>10</u>	60	2	<u>50</u>	60	<u>10</u>	<u>10</u>	70
3	50	<u>70</u>	10	70	3	<u>50</u>	70	<u>10</u>	<u>10</u>	70
4	60	<u>70</u>	10	70						
5	<u>65</u>	70	<u>10</u>	75						

Desweiteren ist ersichtlich, dass mit Zahlungsbereitschaften, die dem erlösorientierten Modell entsprechen, bei der Erhöhung des Fernverkehrs höhere Einnahmen erzielt werden können, als mit Zahlungsbereitschaften des TPS-Modells. Der Fernverkehr wird im nachfrageorientierten Gebotsmodell höher bewertet als mit dem Trassenpreissystem, begründet durch die teuren Investitionen in die benötigte Infrastruktur. Für die Verkehrsanbieter von Taktrassen im Fernverkehr bedeutet dies, dass sich der Ferntaktverkehr auch mit geringeren maximalen Zahlungsbereitschaften durchsetzen kann, denn die Allokation dieser Taktrassen ist bei beiden Gebotsmodellen gleich.

Bei der Erhöhung des Regionalverkehrs steigen die Einnahmewerte (bis auf den bereits geschilderten Fall) nur sehr schwach im Vergleich zum Fernverkehr. Die Zahlungsbereitschaften für Regionalverkehrsstrassen sind in der Regel geringer als für Fernverkehrsstrassen.

sen, bedingt durch die unterschiedlichen Trassenlängen. Desweiteren unterscheiden sich die Zahlungsbereitschaften beider Gebotsmodelle bezüglich der RB- und SB-Takttrassen (siehe Tabelle 4.11 auf Seite 59). Dieser Sachverhalt spiegelt sich auch in Abbildung 6.14 wieder. Die Auktionseinnahmen bezüglich des TPS-Modells sind bei allen Beispielen höher als mit dem Erlös-Modell, denn die Gewinner in den Endallokationen des Szenarios Regionaltaktverkehrrhöhung sind hauptsächlich die RB- und SB-Takttrassen. Die Werte der Auktionseinnahmen für die betrachteten Gebotsmodelle liegen in den Szenarien Erhöhung der Regionalverkehreinzel- und der Gütertrassen dicht beieinander (Abbildungen 6.13 und 6.15).

Trassenkilometereinnahmen

Aus den Werten der Trassenkilometereinnahmen können Informationen über Trassenkonflikte gewonnen werden. Erhöhte Trassenkilometerpreise eines bestimmten Trassentyps deuten darauf hin, dass viele Trassen dieses Typs in Konflikt mit anderen Trassen stehen und die zugehörige Trassenallokation zu diesem Typ nur durch Abgabe hoher Gebote erreicht werden konnte. Dieser Zusammenhang wird anhand der durchschnittlichen Trassenkilometerpreise der Regionalverkehrtakttrassen dargestellt. Diese Werte werden für jedes Gebotsmodell über alle Beispiele der einzelnen Szenarien gemittelt. Die durchschnittlichen Trassenkilometerpreise der allozierten RE-, RB- und SB-Taktzüge weisen im Szenario Erhöhung des Güterverkehrs (Abbildung 6.16) solche Werte auf, die für einen Trassenkilometer gezahlt werden müssen, wenn durch die zusätzlichen Gütertrassen keine oder nur sehr wenige Konflikte entstehen. Die über alle Beispiele im Güterverkehrsszenario konstan-

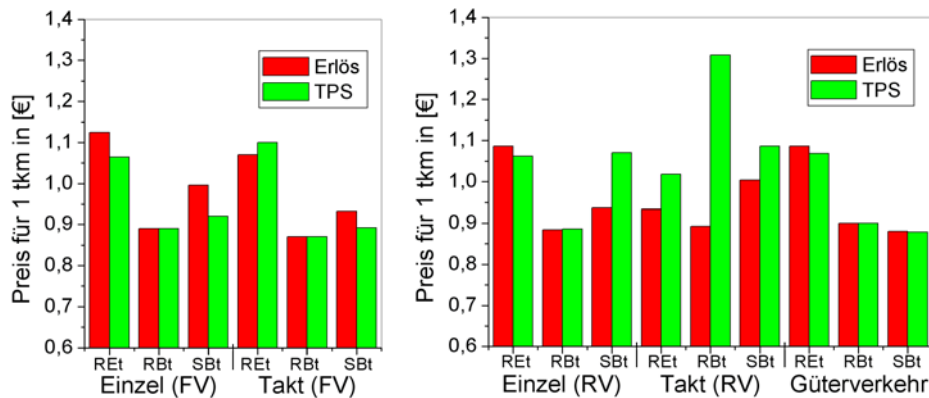


Abbildung 6.16:

Vergleich der durchschnittlichen Trassenkilometereinnahmen der verschiedenen Regionalverkehrtakttrassen bezüglich allen Szenarien

ten, nach den entsprechenden Zugtypen differenzierten Auktionseinnahmen bekräftigen diese Annahme. Während die Trassenkilometerpreise bei einer Erhöhung der Fernverkehr-

takttrassen ähnliche Werte wie im Szenario Güterverkehr annehmen, erhöht sich der Wert der SB-Takttrassen im erlösorientierten Modell bei zusätzlichen Fernverkehreinzeltrassen. Bei verstärkter Konkurrenz muss die SB ihr Bestehen durch hohe Gebote sichern. Deutlich teurere Trassenkilometerpreise für die Takte der Regional- und S-Bahn werden mit dem TPS-Gebotsmodell durch zusätzliche Konkurrenz von Regionalverkehrtakten und -einzeltrassen (nur SB) erreicht (Abbildung 6.16). Im letzten Fall werden mehrere SB-Takte trotz Gebotserhöhung durch Einzeltrassen verdrängt. Doch bei einem hohen Angebot von RB- und SB-Takten können diese in den Konflikten dominieren, indem hohe Preise bezahlt werden. Dieses Verhalten kann bei den RE-Takten nicht beobachtet werden, obwohl sich die RE-Takte des Referenzfahrplans in allen Szenarien als sehr stabil erweisen.

Höhere Flexibilität

An dieser Stelle wird auf Veränderungen in den Auktionsergebnissen eingegangen, die sich durch einen größeren Flexibilitätswert ergeben. Allerdings werden hierbei aus Laufzeitgründen in jedem Szenario nur zwei Beispiele betrachtet, in denen alle Trassenwünsche eine Flexibilität von drei erhalten. Zur Auswertung werden die +12-Beispiele herangezogen. Die Anzahl der insgesamt allozierten Trassen wird durch eine Flexibilitätserhöhung von 2 in einigen Fällen geändert. Während mit dem TPS-Gebotsmodell bei zwei Szenarien am Auktionsende mehr Trassen alloziert werden (Szenarien: Fernverkehrtakte: +1, Regionalverkehrtakte: +3), gibt es mit dem erlösorientierten Modell neben einer Erhöhung von einem Zug auch zwei Fälle, in denen drei Züge weniger alloziert werden (Szenarien: Regionalverkehreinzel- und Regionalverkehrtakttrassen). Die Auktionseinnahmen verringern sich bei der Hälfte der betrachteten Fälle infolge einer Flexibilitätserhöhung (Abbildungen 6.17 und 6.18). Dieser Sachverhalt bezieht sich hauptsächlich auf die Szenarien

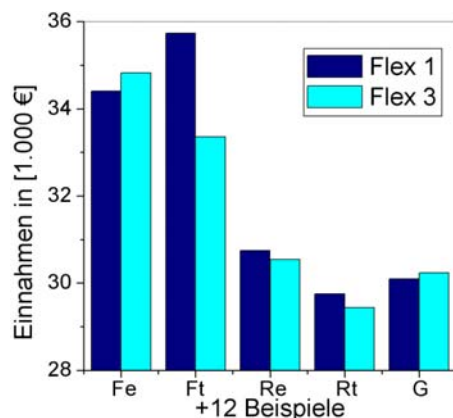


Abbildung 6.17:
Auktionseinnahmen bei Flexibilitäten 1 und 3 bezüglich des erlösorientierten Gebotsmodells

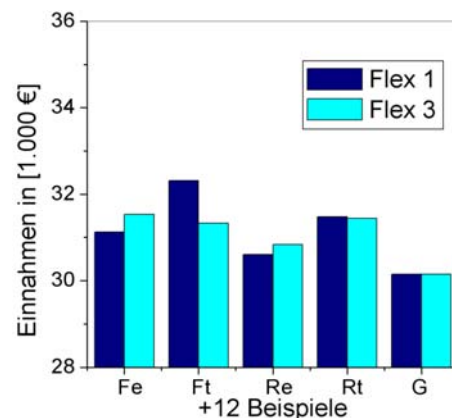


Abbildung 6.18:
Auktionseinnahmen bei Flexibilitäten 1 und 3 bezüglich des TPS-orientierten Gebotsmodells

6 Resultate der Auktionsrechnungen in den verkehrstechnischen Szenarien

der Takterhöhung. Bekommen die Referenztrassen zusätzliche Konkurrenz durch Einzeltrassen steigen die Auktionseinnahmen in fünf von sechs Szenarien (bezüglich beider Gebotsmodelle) an. Um den Einfluss der Flexibilität genauer untersuchen zu können, müssen weitere Auktionen simuliert werden. Dazu werden weitere Beispiele und zusätzliche höhere Flexibilitätsstufen benötigt.

Rundenanzahl

Die Anzahl der Runden bewegt sich bei den meisten Auktionsrechnungen zwischen 20 und 30. Eine Ausnahme bilden die Fernverkehrsszenarien mit dem erlösorientierten Gebotsmodell. Hier benötigen die Auktionen bis zu 44 Runden. Bedingt durch die hohen Zahlungsbereitschaften im Fernverkehr und die im Auktionsmechanismus vorgeschriebene Gebotserhöhung können zur Lösung von Konflikten lange Gebotskämpfe ausgetragen werden. Der Auktionsmechanismus sieht eine Gebotsanpassung in Höhe des Mindestinkrements vor, das vom Grundpreis und nicht von der Zahlungsbereitschaft abhängt. Die Rundenanzahl kann nicht nur durch Grundpreise und Mindestinkremente sondern auch durch den Flexibilitätswert beeinflusst werden. Bei fast allen betrachteten Testbeispielen kann durch eine Erhöhung der Flexibilität eine Konfliktvermeidung (durch Verschiebung oder Streckung der Trassen) oder eine frühere Lösung der Konflikte und folglich eine geringere Rundenanzahl erreicht werden (vergleiche dazu die Tabellen 6.1, 6.5 mit 6.9 und 6.12). Dieser Effekt könnte die Einnahmenminderung bei Flexibilitätserhöhung erklären.

Fazit

Zusammenfassend ist zu erwähnen, dass bei hoher Konkurrenz von Fernverkehrstrassen in der Auktion höhere Einnahmen erzielt werden können als bei einem vergrößerten Angebot an Regionalverkehrstrassen. In der Allokation, szenarienübergreifend betrachtet, ist der Taktverkehr (bis auf die S-Bahn) als sehr stabil hervorgegangen. In erster Linie werden Einzeltrassen verdrängt. Desweiteren bestehen im derzeitigen Fahrplan Kapazitäten für Trassenwünsche, die aufgrund weniger Zwischenhalte sehr flexibel in der Planung sind. Im Güterverkehrsszenario des TPS-Modells werden 324 von 325 Trassen alloziert. Der Flexibilitätswert kann sich positiv auf die Auktionsgeschwindigkeit (Rundenanzahl) auswirken, aber auch die Gewinnerbestimmung beziehungsweise die Fahrplanallokation erschweren. Abschließend ist festzuhalten, dass es im aktuellen Fahrplan Potentiale gibt, den Verkehr auf der Schiene zu erhöhen. Ein Auktionsverfahren kann wesentlich dazu beitragen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

An den Ergebnissen der durchgeführten Auktionssimulationen konnten einige bahntechnisch interessante Effekte beobachtet werden. Der nächste Schritt dazu wäre, diese Effekte durch detailliertere Untersuchungen zu analysieren und zu bestätigen. Weitere Auktionssimulationen müssen arrangiert werden. In dem Zusammenhang werden größere Testbeispiele benötigt. Außerdem sollte auch der Rundenverlauf innerhalb einer Auktion genauer betrachtet werden. Dazu ist ein Visualisierungstool sehr hilfreich, das in jeder Runde den allozierten Fahrplan abbildet. Durch die genaue räumliche und zeitliche Darstellung der einzelnen Trassen können Konflikte besser identifiziert und analysiert werden. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Verringerung der Optimierungszeit. Die Lösungszeit für eine Allokation ist unter anderem abhängig von der Anzahl der Trassen, den damit zusammenhängenden Trassenkonflikten und den Flexibilitätswerten zur Verschiebung und Streckung der Trassen. Selbst bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Auktionen gab es einzelne Runden, bei denen die Bestimmung der optimalen Trassenallokation bis zu einem Tag dauerte. Diese Untersuchungen sowie die Weiterentwicklung des OPTRA-Modells sind entscheidend auf dem Weg zur Entwicklung eines geeigneten Auktionsmechanismus für eine ökonomischere Vergabe von Trassenkapazitäten.

Um den Schienenverkehrssektor als Personen- und Güterbeförderung wieder attraktiver zu machen, ist nach Meinung vieler Experten die Erhöhung des Wettbewerbs unter den Eisenbahnverkehrsunternehmen grundlegend. Nur indem um die Gunst der Kunden geworben wird, kann sich die Eisenbahn als Verkehrsträger den herrschenden Bedürfnissen anpassen und mehr Wachstum verzeichnen. Ein Vorteil für die Verwendung eines Auktionsverfahrens zur Vergabe von Trassen, besteht darin, dass eine effiziente Allokation realisiert werden kann, beispielsweise mit dem iBundle-Verfahren. Indem Trassenkonflikte durch Gebotserhöhungen gelöst werden, wird, unter der Annahme, dass die maximalen Zahlungsbereitschaften den Nutzenniveaus der Verkehrsanbieter entsprechen, die Wohlfahrt und damit der soziale Wert für die Gesellschaft maximiert. Auktionen sind Ereignisse, die mit dem richtigen Design (Transparenz, Fairness) eine hohe Teilnahme erreichen können. Ein Nachteil der Trassenbörse könnte darin gesehen werden, dass in weniger dicht besiedelten Gebieten das Angebot des Schienenverkehrs vermutlich abnimmt. Hier könnte allerdings durch Subventionen gegengesteuert werden. Desweiteren sollte beim Design der Trassenbörseauktion auf die Gefahr der Monopolbildung eingegangen werden. Insgesamt ist die Trassenbörse meiner Meinung nach positiv zu bewerten.

A Anhang

Tabelle A.1:

Die Knotenliste des Trassenbörseauswahlnetzes mit Einwohner und Beschäftigtenzahlen im Verarbeitenden Gewerbe sowie Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden und zugehöriger Quellenangabe aus Tabelle A.2

Abkürzung	Ortsname	EW	Quelle	Beschäftigte	Quelle
DALT	Altenbeken	9663	1	120	11
DBEB	Bebra	15105	2	2043	12
DBHE	Bad Hersfeld	30650	2	2998	12
DBRS	Braunschweig	245392	2	21020	10
DBRW	Gr. Gleidingen	756	3	0	13
DCEL	Celle	71647	2	4267	10
DEIC	Eichenberg	2003	4	0	13
DELZ	Elze	9677	2	621	10
DFLL	Fallersleben	11936	5	0	13
DFUL	Fulda	63149	2	10781	12
DGIF	Gifhorn	42689	2	3437	10
DGOE	Göttingen	123698	2	11145	10
DHAI	Hannover-Hainholz	6738	6	0	13
DHAM	Hameln	59156	2	3942	10
DHAN	Hannover Hbf	517310	2	46442	10
DHIL	Hildesheim	103448	2	9899	10
DHLI	Hannover-Linden	37327	6	0	13
DHWU	Hannover-Wülfel	4287	6	0	13
DKAS	Kassel Hbf	194146	2	15605	12
DKAW	Kassel Wilhelmshöhe	11617	7	0	13
DKRS	Kreiensen	7613	2	309	10
DLEH	Lehrte	44285	2	1497	10
DLGH	Langenhagen	49652	2	4800	10
DMAL	Malsfeld	4342	2	245	12
DNOM	Northeim	31183	2	3267	10
DNST	Nordstemmen	13266	2	339	10
DSLZ	Seelze	33167	2	1419	10
DWAR	Warburg	24273	1	2944	11
DWDD	Weddel	3130	8	0	13
DWEE	Weetzen	2296	9	0	13

Tabelle A.2: Quellenangabe für die Einwohner- und Beschäftigtenzahlen

1. Landesamt für Datenverarbeitung und Statistik Nordrhein-Westfalen, Stand vom 31.12.2002
2. Statistische Ämter des Bundes und der Länder, Gemeindeverzeichnis, Stand vom 31.12.2002
3. Gemeindeteil von Vechelde: www.vechelde.de
4. Gemeindeteil von Neu-Eichenberg, Einwohnerzahl von Neu-Eichenberg wurde verwendet, Statistische Ämter des Bundes und der Länder, Gemeindeverzeichnis, Stand vom 31.12.2002
5. Stadtteil von Wolfsburg www.wolfsburg-citytour.de/Stadtteile/Fallersleben4/fallersleben4.html, Stand vom 31.10.2003
6. Stadtteile von Hannover, www.hannover.de/deutsch/politik/pol_lhh/rat_bez/bez_rat.htm, Stand vom 01.01.2004
7. Stadtteil von Kassel, www.kassel.de/stadtplan/stadtteile/html/wilhelmshoehe.html, Stand vom 01.01.2003
8. www.feuerwehr-weddel.de/freiwillige_feuerwehr_weddel_weddel.htm, Stand 01.07.2003
9. www.ronnenberg.de/deutsch/ronnenberg/zdf/statistik.htm
10. Niedersächsisches Landesamt für Statistik, Hannover, 2001, Tabelle K7700111, Jahresdurchschnitt 2002
11. Landesamt für Datenverarbeitung und Statistik Nordrhein-Westfalen, Ausgabe 2003 (WZ2003), Jahresdurchschnitt
12. Hessisches Statistisches Landesamt, Wiesbaden 2004, Hessische Gemeindestatistik Ausgabe 2003, Stand September 2002
13. keine Statistik verfügbar, da der Ort zu klein ist oder es sich um einen Stadtteil handelt (wird nicht extra gezählt)

Tabelle A.3:

**Berechtigung der Zugtypen an den Personen- beziehungsweise Güterbahnhöfen des Trans-
senbörnsenetzes zu halten**

Bahnhof	ICE	IC	RE	RB	SB	ICG
DALT		×	×	×		×
DBEB		×	×	×		×
DBHE	×	×	×	×		×
DBRS	×	×	×	×		×
DBRW				×		
DCEL	×	×	×	×	×	×
DEIC				×		
DELZ			×	×		×
DFLL	×	×	×	×		×
DFUL	×	×	×	×		×
DGIF		×	×	×		
DGOE	×	×	×	×		×
DHAI				×	×	
DHAM	×	×	×	×	×	×
DHAN	×	×	×	×	×	×
DHIK						
DHIL	×	×	×	×		×
DHLI			×	×	×	×
DHWU				×	×	×
DKAS			×	×		×
DKAW	×	×	×	×		×
DKRS			×	×		×
DLEH		×	×	×	×	×
DLGH		×	×	×	×	
DMAL				×		
DNOM		×	×	×		×
DNST			×	×		
DSLZ			×	×	×	×
DWAR	×	×	×	×		
DWDD				×		
DWEE				×	×	

Literaturverzeichnis

- [1] Prof. Dr. Hans-Jürgen Ewers, Dr. Gottfried Ilgmann. *Zukunft des Schienenverkehrs*. Gutachten im Auftrag der FDP-Bundestagsfraktion, Berlin und Hamburg, Juni 2001
- [2] Gottfried Ilgmann. *Bahnreform: Ziel verfehlt*. BAHN-REPORT, Heft 3/2003, Mai/Juni, www.G-Ilgmann.de
- [3] EU Kommission. *Weißbuch: Eine Strategie zur Revitalisierung der Eisenbahn in der Gemeinschaft*. Stand: Juli 1996, Seiten 3, 6
- [4] Eisenbahn-Bundesamt. *Information Aktuelle Probleme des Eisenbahnrechts*. www.eisenbahn-bundesamt.de/eba/allgemein/archiv/e_recht_1.htm Stand: Februar 2005
- [5] Claus-Friedrich Laaser, Astrid Rosenschon. *Verkehrsspezifische Ausgaben und Einnahmen der Gebietskörperschaften in Deutschland – eine empirische Analyse*. Kieler Arbeitspapier Nr. 1039, Institut für Weltwirtschaft, Kiel, Mai 2001
- [6] Prof. Dr.-Ing. Jürgen Siegmann. *Anmeldung von Fahrplantrassen*. Vortragsfolien, FG Schienenfahrwege und Bahnbetrieb
- [7] DB Netz AG. *Allgemeine Bedingungen für die Nutzung der Eisenbahninfrastruktur der DB Netz AG (ABN)*. Stand 01.10.2004
- [8] Nordwestbahn. *Pressemitteilungen 4. und 16.12.2002*. www.nordwestbahn.de
- [9] Sven de Vries, Rakesh Vohra. *Combinatorial Auctions: A Survey*. 28. August 2000
- [10] Alberto Caprara, Matteo Fischetti, Paolo Toth. *Modeling and solving the train timetabling problem*. Operations Research, Vol. 50, No. 5, September - Oktober 2002
- [11] Aleksandar Pekeč und Michael H. Rothkopf. *Combinatorial Auction Design*. Management Science, Vol. 49, No. 11, November 2003
- [12] Michael H. Rothkopf, Aleksandar Pekeč, Ronald M. Harstad. *Computationally Manageable Combinational Auctions*. Management Science, Vol. 44, No. 8, August 1998
- [13] David C. Parkes, Lyle H. Ungar. *Iterative Combinatorial Auctions: Theory and Practice*. American Association for Artificial Intelligence, 2000
- [14] David C. Parkes. *Iterative Combinatorial Auctions: Achieving Economic and Computational Efficiency*. Dissertation, 2001

Literaturverzeichnis

- [15] Ralf Borndörfer, Martin Grötschel, Sascha G. Lukac. *Das OPTRA-Modell zur optimalen Trassenvergabe*. Zuse-Institut Berlin, Februar 2004
- [16] Horst Hanusch, Thomas Kuhn. *Einführung in die Volkswirtschaftslehre*. Springer-Verlag, 1994
- [17] Andreas Brenck, Achim Czerny, Kay Mitusch, Benedikt Peter. *Markets and Auctions for German Railway Capacities*. Second version (preliminary) 7. März 2005
- [18] Andreas Brenck, Achim Czerny, Kay Mitusch, Benedikt Peter. *Ökonomische Studien zum Auktionsdesign*. Vortragsfolien, 12. Februar 2004
- [19] B. Korte, J. Vygen. *Combinatorial Optimization Theory and Algorithms*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2000, Seite 144ff
- [20] M. Schelter. *Siedlung und Landschaft in Westfalen, Öffentlicher Personen(inter)regionalverkehr: Angebotsplanung und Landesplanung*. Geographische Kommission für Westfalen, Aschendorff Verlag GmbH & Co. KG, Münster, 2003, Seiten 8-15
- [21] Deutschen Bahn AG. *Unsere Schienenfahrzeuge im Regional- und Stadtverkehr*. Kommunikation Personenverkehr, Stephensonstraße 1, 60326 Frankfurt am Main, Stand Dezember 2003
- [22] N. Ascheuer, Ch. Küttner, M. Proksch. *PROSA/prosimExpreß: A line-planning tool for Deutsche Bahn*. Intranetz Gesellschaft für Informationslogistik mbH, Vortragsfolien
- [23] DB Netz AG. *Modulares Trassenpreissystem*. Stand: Februar 2004, gültig ab 12.12.2004
- [24] DB Netz AG, Niederlassung Mitte. *Streckenategorienkarte Mitte 2005*. Stand: Januar 2005
- [25] DB Netz AG, Niederlassung Nord. *Streckenategorienkarte Nord 2005*. Stand: Januar 2005
- [26] DB Netz AG, Niederlassung West. *Streckenategorienkarte West 2005*. Stand: Januar 2005
- [27] DB Netz AG. *Modulares Trassenpreissystem (Anlage 2). Änderungen Streckenategorien und Auslastungsklassen (Stand Februar 2004), gültig ab 12.12.2004*
- [28] Deutsche Bahn AG. *Daten und Fakten 2003*. www.bahn.de/presse