

**Über die Bemessung
außerplanmäßiger Synchronzeiten
in einem periodischen Netz
des Eisenbahn-Personenverkehrs.
Eine Untersuchung mittels
objektorientierter Simulation.**

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Wirtschafts- und
Sozialwissenschaften des Fachbereichs Wirtschafts- und Organisationswissenschaften
der Universität der Bundeswehr Hamburg

vorgelegt von

Arne Steuer

aus Hamburg

Hamburg 2000

Erstgutachter: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Werner Junginger
Zweitgutachter: Univ.-Prof. Dr. rer. pol. Ulrich Tüshaus

Tag der mündlichen Prüfung: 07.03.2000

Meinen Eltern gewidmet.

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur für Betriebswirtschaftslehre, insbesondere Wirtschaftsinformatik, im Fachbereich Wirtschafts- und Organisationswissenschaften der Universität der Bundeswehr Hamburg.

Mein ganz besonders herzlicher Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr. Werner Junginger für die Übernahme des Referates und die intensive Betreuung. Ihm verdanke ich auch wesentliche Hinweise und Anregungen für eine exakte und möglichst verständliche Gestaltung dieser Arbeit. Mein herzlicher Dank gilt ebenfalls Herrn Univ.-Prof. Dr. Ulrich Tüshaus für die Übernahme des Koreferates.

Ich danke besonders Frau Dipl.-Bibl. Anneliese Ianigro für die Unterstützung bei den Literaturrecherchen. Meinem Kollegen Herrn Dr. Stefano Ianigro sage ich herzlichen Dank dafür, daß er mir jederzeit mit Rat und Tat zur Seite stand und mich in vielerlei Hinsicht entlastet hat, damit ich mich dieser Arbeit widmen konnte.

Ferner danke ich dem Bundesministerium der Verteidigung für die Möglichkeit, während meiner Dienstzeit als Zeitoffizier wissenschaftlich zu arbeiten.

Hamburg, im August 1999

Arne Steuer

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Grundbegriffe des Eisenbahnverkehrs	5
3. Problemstellung	19
3.1. Reisezeitoptimierung als Teil der Verkehrsplanung	19
3.2. Zielsetzung dieser Arbeit	23
4. Überblick über verwandte Lösungsansätze	27
4.1. Reisezeitoptimierung in der Praxis der Bahnbetriebssteuerung	27
4.1.1. Bildfahrpläne	27
4.1.2. Betriebsdienstvorschriften zur Regelung außerplanmäßiger Syn- chronzeiten	34
4.1.3. Einsatz der rechnerunterstützten Zugüberwachung zur Betriebs- steuerung	38
4.2. Ausgewählte Veröffentlichungen zu Problemen der hierarchischen Ver- kehrsplanung	40
4.3. Ausgewählte Veröffentlichungen zu Verspätungen und Synchronzeiten . .	43
4.3.1. Überblick	43
4.3.2. Optimierung planmäßiger Synchronzeiten mittels Linearer Opti- mierung	44
4.3.3. Die Bemessung von Pufferzeiten zur Gewährleistung von Anschlüssen	45
4.4. Zusammenfassung	46
5. Modellierung und Darstellung des Systems „Eisenbahnnetz“	48
5.1. Grundbegriffe der Graphentheorie	48
5.2. Darstellung eines Streckennetzes	50
5.3. Darstellung eines Liniennetzes	52
5.4. Darstellung der Verbindungen	57
5.5. Modellierung des Eisenbahnbetriebes	61
5.5.1. Verspätungen	61
5.5.2. Anschlüsse an Umsteigebahnhöfen	64

5.5.3. Reisendenströme	79
5.5.4. Kriterien und Kennzahlen für die Bewertung der Beförderungs- qualität	87
5.6. Formulierung des Optimierungsproblems	91
6. Simulation des Systems	95
6.1. Überblick und Zielsetzung	95
6.2. Die Klassen der Simulation	97
6.2.1. Bahnhöfe	97
6.2.2. Linien	99
6.3. Ablauf der Simulation	102
6.3.1. Die funktionalen Bestandteile	102
6.3.2. Initialisierung des Systems	103
6.3.3. Belastungssimulation	107
6.3.4. Ablauf der Belastungssimulation	115
6.3.5. Initialisierung der Betriebssimulation	117
6.3.6. Betriebssimulation	117
6.3.7. Kennzahlenerstellung und Ausgabe der Kennzahlen	134
7. Anwendung der Simulation	138
7.1. Das Beispielnetz	138
7.2. Lösung der Optimierungsprobleme	142
7.3. Ergebnisse	144
8. Zusammenfassung und Ausblick	171
A. Anhang	174
A.1. Verzeichnis der Symbole	174
A.1.1. Streckennetz und Liniennetz	174
A.1.2. Soll-Fahrplan	175
A.1.3. Ist-Fahrplan	177
A.1.4. Reisendenströme	179
A.1.5. Kennzahlen und Parameter der Simulation	181
A.1.6. Parametrisierung und Ablauf der Simulation	183
A.2. Zuggattungen der Deutschen Bahn AG	184
A.2.1. Zuggattungen des Fernverkehrs der Deutschen Bahn AG	184
A.2.2. Zuggattungen des Nahverkehrs der Deutschen Bahn AG	185
Literaturverzeichnis	186
Index	199

Abbildungsverzeichnis

2.1. Zusammenhänge zwischen den Zeitanteilen der planmäßigen Beförderungszeit	10
2.2. Ermittlung der Synchronzeit	14
2.3. Zusammenhänge zwischen den Zeitanteilen der realisierten Beförderungszeit	15
3.1. Ablauf einer hierarchischen Verkehrsplanung	20
4.1. Ausschnitt des Bildfahrplannetzes einer Strecke	29
4.2. Darstellung von Anschlüssen im Bildfahrplannetz	32
4.3. Verspätungsbedingt geändertes Bildfahrplannetz	35
4.4. Konzept der rechnerunterstützten Zugüberwachung	39
5.1. Streckennetz-Graph	51
5.2. Darstellung eines Bahnhofsknotens im Streckennetz-Graph	52
5.3. Streckennetz- und Liniennetz-Graph	54
5.4. Graph der Reiseverbindungen: Soll-Zeiten	59
5.5. Graph der Reiseverbindungen: Verkehrsnachfrage	60
5.6. Verspätungsabbau durch das Ausschöpfen des Fahrzeitzuschlags	65
5.7. Zeitanteile der an einem Anschluß beteiligten Zugfahrten	67
5.8. Graph der Reiseverbindungen: Darstellung des Beispiels	86
6.1. Flußdiagramm des Simulationsprogrammes	104
6.2. Flußdiagramm der Systeminitialisierung	108
6.3. Höhe der Verkehrsnachfrage in Abhängigkeit von der Tageszeit auf einer bestimmten Relation	112
6.4. Dichtefunktion für die Wahrscheinlichkeit, daß Reisende zu einem bestimmten Zeitpunkt einen Startbahnhof verlassen	114
6.5. Flußdiagramm der Belastungssimulation	118
6.6. Flußdiagramm für die Initialisierung der Betriebssimulation	119
6.7. Flußdiagramm für die Betriebssimulation	126
7.1. Abweichungen der Beförderungszeitanteile bei vorgegebenem $\overline{ID} = 1$, abhängig von $T_{Sy_{max}}$: Symmetrische Synchronzeitregelung – alle Zugattungen warten aufeinander	148

7.2.	Abweichungen der Beförderungszeitanteile bei vorgegebenem $\overline{ID} = 1.5$, abhängig von $T_{Sy_{max}}$: Symmetrische Synchronzeitregelung – alle Zuggattungen warten aufeinander	149
7.3.	Abweichungen der Beförderungszeitanteile bei vorgegebenem $\overline{ID} = 2$, abhängig von $T_{Sy_{max}}$: Symmetrische Synchronzeitregelung – alle Zuggattungen warten aufeinander	150
7.4.	Abweichungen der Beförderungszeitanteile bei vorgegebenem $\overline{ID} = 2.5$, abhängig von $T_{Sy_{max}}$: Symmetrische Synchronzeitregelung – alle Zuggattungen warten aufeinander	151
7.5.	Abweichungen der Beförderungszeitanteile bei vorgegebenem $\overline{ID} = 1$, abhängig von $T_{Sy_{max}}$: Asymmetrische Synchronzeitregelung – Nahverkehr wartet auf verspäteten Fernverkehr (nicht jedoch umgekehrt), gleiche Zuggattungen warten aufeinander	152
7.6.	Abweichungen der Beförderungszeitanteile bei vorgegebenem $\overline{ID} = 1.5$, abhängig von $T_{Sy_{max}}$: Asymmetrische Synchronzeitregelung – Nahverkehr wartet auf verspäteten Fernverkehr (nicht jedoch umgekehrt), gleiche Zuggattungen warten aufeinander	153
7.7.	Abweichungen der Beförderungszeitanteile bei vorgegebenem $\overline{ID} = 2$, abhängig von $T_{Sy_{max}}$: Asymmetrische Synchronzeitregelung – Nahverkehr wartet auf verspäteten Fernverkehr (nicht jedoch umgekehrt), gleiche Zuggattungen warten aufeinander	154
7.8.	Abweichungen der Beförderungszeitanteile bei vorgegebenem $\overline{ID} = 2.5$, abhängig von $T_{Sy_{max}}$: Asymmetrische Synchronzeitregelung – Nahverkehr wartet auf verspäteten Fernverkehr (nicht jedoch umgekehrt), gleiche Zuggattungen warten aufeinander	155
7.9.	Abweichungen der Beförderungszeitanteile bei vorgegebenem $\overline{ID} = 1$, abhängig von $T_{Sy_{max}}$: Asymmetrische Synchronzeitregelung – Fernverkehr wartet auf verspäteten Nahverkehr (nicht jedoch umgekehrt), gleiche Zuggattungen warten aufeinander	156
7.10.	Abweichungen der Beförderungszeitanteile bei vorgegebenem $\overline{ID} = 1.5$, abhängig von $T_{Sy_{max}}$: Asymmetrische Synchronzeitregelung – Fernverkehr wartet auf verspäteten Nahverkehr (nicht jedoch umgekehrt), gleiche Zuggattungen warten aufeinander	157
7.11.	Abweichungen der Beförderungszeitanteile bei vorgegebenem $\overline{ID} = 1$, abhängig von $T_{Sy_{max}}$: Asymmetrische Synchronzeitregelung – Fernverkehr wartet auf verspäteten Nahverkehr (nicht jedoch umgekehrt), gleiche Zuggattungen warten aufeinander	158
7.12.	Abweichungen der Beförderungszeitanteile bei vorgegebenem $\overline{ID} = 1$, abhängig von $T_{Sy_{max}}$: Asymmetrische Synchronzeitregelung – Fernverkehr wartet auf verspäteten Nahverkehr (nicht jedoch umgekehrt), gleiche Zuggattungen warten aufeinander	159

7.13. Netzweiter Pünktlichkeitsgrad: Symmetrische Synchronzeitregelung – alle Zuggattungen warten aufeinander	162
7.14. Netzweiter Pünktlichkeitsgrad: Asymmetrische Synchronzeitregelung – Nahverkehr wartet auf verspäteten Fernverkehr (nicht jedoch umgekehrt), gleiche Zuggattungen warten aufeinander	163
7.15. Netzweiter Pünktlichkeitsgrad: Asymmetrische Synchronzeitregelung – Fernverkehr wartet auf verspäteten Nahverkehr (nicht jedoch umgekehrt), gleiche Zuggattungen warten aufeinander	164
7.16. Abhängigkeit der optimalen außerplanmäßigen Synchronzeit vom Verspätungsniveau: Symmetrische Synchronzeitregelung – alle Zuggattungen warten aufeinander	168
7.17. Abhängigkeit der optimalen außerplanmäßigen Synchronzeit vom Verspätungsniveau: asymmetrische Synchronzeitregelung – Nahverkehr wartet auf verspäteten Fernverkehr (nicht jedoch umgekehrt), gleiche Zuggattungen warten aufeinander	169
7.18. Abhängigkeit der optimalen außerplanmäßigen Synchronzeit vom Verspätungsniveau: asymmetrische Synchronzeitregelung – Fernverkehr wartet auf verspäteten Nahverkehr (nicht jedoch umgekehrt), gleiche Zuggattungen warten aufeinander	170

Tabellenverzeichnis

2.1.	Die Regelzuschläge für Reisezüge bei Bespannung mit elektrischem Triebfahrzeug	12
2.2.	Regelwartezeiten (in Minuten) bei der Deutschen Bahn AG	18
3.1.	Die fahrplantechnische Bindung des Anschlusses	24
6.1.	Empirische Häufigkeiten der Zuwachsverspätungen im Nahverkehr	128
6.2.	Empirische Häufigkeiten der Zuwachsverspätungen im Fernverkehr	129
6.3.	Empirische Häufigkeiten der Zuwachsverspätungen insgesamt	130
6.4.	χ^2 -Anpassungstest für den Nahverkehr	133
6.5.	χ^2 -Anpassungstest für den Fernverkehr	133
6.6.	χ^2 -Anpassungstest für alle positiven Zuwachsverspätungen	133
7.1.	Abweichungen der Beförderungszeitanteile: Symmetrische Synchronzeitregelung – alle Zuggattungen warten aufeinander	160
7.2.	Abweichungen der Beförderungszeitanteile: asymmetrische Synchronzeitregelung – Nahverkehr wartet auf verspäteten Fernverkehr (nicht jedoch umgekehrt), gleiche Zuggattungen warten aufeinander	160
7.3.	Abweichungen der Beförderungszeitanteile: asymmetrische Synchronzeitregelung – Fernverkehr wartet auf verspäteten Nahverkehr (nicht jedoch umgekehrt), gleiche Zuggattungen warten aufeinander	160
7.4.	Netzweiter Pünktlichkeitsgrad in Abhängigkeit von \overline{ID} und $T_{Sy_{max}}$: Symmetrische Synchronzeitregelung – alle Zuggattungen warten aufeinander	161
7.5.	Netzweiter Pünktlichkeitsgrad in Abhängigkeit von \overline{ID} und $T_{Sy_{max}}$: asymmetrische Synchronzeitregelung – Nahverkehr wartet auf verspäteten Fernverkehr (nicht jedoch umgekehrt), gleiche Zuggattungen warten aufeinander	161
7.6.	Netzweiter Pünktlichkeitsgrad in Abhängigkeit von \overline{ID} und $T_{Sy_{max}}$: asymmetrische Synchronzeitregelung – Fernverkehr wartet auf verspäteten Nahverkehr (nicht jedoch umgekehrt), gleiche Zuggattungen warten aufeinander	161
7.7.	Abweichungen der Beförderungszeitanteile: asymmetrische Synchronzeitregelung – Nahverkehr wartet auf verspäteten Fernverkehr (nicht jedoch umgekehrt), gleiche Zuggattungen warten aufeinander. Suboptimale maximale außerplanmäßige Synchronzeit.	166

7.8. Netzweiter Pünktlichkeitsgrad in Abhängigkeit von \overline{ID} und $T_{Sy_{max}}$: asymmetrische Synchronzeitregelung – Nahverkehr wartet auf verspäteten Fernverkehr (nicht jedoch umgekehrt), gleiche Zuggattungen warten aufeinander. Suboptimale maximale außerplanmäßige Synchronzeit. 166

1. Einleitung

In der Bundesrepublik Deutschland wurden 1997 rund 1,735 Milliarden Personen mit der Eisenbahn befördert. Die dabei erbrachte Verkehrsleistung umfaßte rund 64 Milliarden Personenkilometer.¹ Wegen des grundsätzlich wachsenden Verkehrsaufkommens verzeichnet auch das Verkehrsmittel Eisenbahn im Personenverkehr weiterhin Zuwächse. Die Bahnreisenden haben meist den Wunsch, einerseits pünktlich und zuverlässig und andererseits schnell befördert zu werden. Die Eisenbahninfrastruktur- und Eisenbahnverkehrsunternehmen stellen hierzu Infrastruktur, Anlagen (Eisenbahnstrecken, Bahnhöfe und Züge) und Personal zur Verfügung. Diese Produktionsmittel für Eisenbahnverkehrsleistungen können als knappe Güter angesehen werden: Gleise lassen sich nicht unbegrenzt verlegen, ihre Kapazität für die Abwicklung von Zugfahrten ist aus unterschiedlichen Gründen begrenzt, Fahrzeuge besitzen begrenzte Beförderungskapazität. Es existieren im Eisenbahnverkehr grundsätzlich drei Möglichkeiten, das wachsende Verkehrsaufkommen unter Berücksichtigung der Qualitätswünsche der Kunden mit der Knappheit der Produktionsmittel in Übereinstimmung zu bringen:

1. Planung und Bau von Neubaustrecken sowie Ausbau bestehender Strecken. Insbesondere Planung und Bau von Neubaustrecken erfordern – sofern überhaupt die Möglichkeit dazu besteht – einen hohen zeitlichen und finanziellen Aufwand. Häufig ist dies mit kostspieligen Tunnel- oder Brückenneubauten verbunden, weil im Schienenverkehr nur geringe Steigungen bewältigt werden können. Der Ausbau bestehender Strecken – beispielsweise mehrgleisiger Ausbau oder Ertüchtigung für höhere Geschwindigkeiten – ist zwar weniger aufwendig als ein Streckenneubau, erfordert aber dennoch recht hohe zeitliche und finanzielle Mittel.
2. Erwerb neuer oder Ertüchtigung vorhandener Fahrzeuge. Durch den Ersatz oder die Modernisierung vorhandener Fahrzeuge soll zum einen die technische Störanfälligkeit der Transportmittel gesenkt und zum anderen ein bequemes Reisen gewährleistet werden. Besonders bei Fahrzeug-Neuentwicklungen kann der Planungs- und Finanzaufwand beträchtlich sein. Zudem kann der Einsatz neuer Technologien

¹Vgl. [Sta98, S. 301f.]. Dabei wurden grundsätzlich beförderte Personen „als Beförderungsfälle erfaßt, d.h. eine Person, die im Berichtszeitraum mehrere Fahrten unternommen hat, wird mehrfach gezählt.“

zu Problemen führen, wenn sich im Betrieb unverhoffte technische Schwierigkeiten ergeben.

3. Geeignete Planung und Steuerung des Eisenbahnverkehrs mit Verfahren der Fahrplanoptimierung und der Betriebssteuerung. Fahrpläne legen Orte und Zeiten fest, zu denen Fahrzeuge die Eisenbahn-Infrastruktur beanspruchen. Sie stellen quasi das Produktionsprogramm eines Eisenbahnverkehrsunternehmens dar und haben damit zentrale Bedeutung für alle Bereiche des Eisenbahnverkehrs. Bereits bei der Planung dieses Produktionsprogrammes kommt es darauf an, Aspekte der Wirtschaftlichkeit, der Sicherheit, der Pünktlichkeit und der Leistungsfähigkeit zu beachten. Unter bestimmten Gesichtspunkten optimierte Fahrpläne gestatten eine effiziente Nutzung bestehender Ressourcen. Verfahren der Betriebssteuerung stellen eine adäquate Realisierung des Produktionsprogrammes sicher. Insbesondere wenn unterschiedliche Einflußfaktoren zu Zugverspätungen führen, die eine Abweichung von ursprünglich geplanten Orten oder Zeiten erfordern, ist es Aufgabe der Betriebssteuerung, unter den geänderten Rahmenbedingungen weiterhin eine effiziente, sichere und weitgehend pünktliche Verkehrsdurchführung sicherzustellen.

Die vorliegende Arbeit widmet sich einem Teilaspekt des dritten Ansatzes: Der Bemessung außerplanmäßiger Synchronzeiten in einem Liniennetz des Eisenbahn-Personenverkehrs. Außerplanmäßige Synchronzeiten dienen dazu, die Abfahrt von Anschlußzügen an Umsteigebahnhöfen über den Zeitpunkt der frühestmöglichen Abfahrt hinaus absichtlich so zu verzögern, daß umsteigende Reisende von verspäteten Zubringerzügen ihren Anschlußzug noch erreichen können. Bereits hier wird ein zentrales Problem dieses Aspektes der Fahrplanoptimierung deutlich: Einerseits werden Zugfahrten absichtlich in ihrer Abfahrt verzögert. Dies widerspricht prinzipiell der Forderung nach möglichst pünktlicher Abwicklung des Eisenbahnverkehrs. Andererseits erreichen umsteigende Reisende gerade dadurch ihren gewünschten Anschlußzug. Somit kann eine Reise trotz Verspätungen mit denjenigen Zugfahrten durchgeführt werden, die auch der Reiseplanung zugrundeliegen – dies ist häufig die Sicht, mit der Reisende die Begriffe Pünktlichkeit und Zuverlässigkeit interpretieren.

Um dies zu untersuchen, wird der Zugverkehr in einem Liniennetz mittels Simulation abgebildet, um darauf aufbauend

- zu einem gegebenen Verspätungsniveau eine optimale Regelung für die Bemessung außerplanmäßiger Synchronzeiten zu finden,
- Zusammenhänge zwischen dem Verspätungsniveau, der Höhe außerplanmäßiger Synchronzeiten, der Pünktlichkeit und weiteren ausgewählten Kennzahlen der Beförderungsqualität aufzuzeigen.

An eine Regelung zur Gewährung außerplanmäßiger Synchronzeiten sind dabei folgende Anforderungen zu stellen:

1. Die Pünktlichkeit des Zugverkehrs darf nicht zu stark beeinträchtigt werden,
2. insgesamt sollen für Reisende die Abweichungen der tatsächlichen Reisezeiten von den geplanten Reisezeiten möglichst gering sein.

Aus Sicht der Reisenden sind auch folgende psychologische und ökonomische Aspekte zu berücksichtigen: Wenn ein Anschlußzug aufgrund der Verspätung des Zubringerzuges versäumt wird, verlängert sich die Umsteigezeit und damit die Reisezeit deutlich, wenn Züge auf der Anschlußlinie selten verkehren. Eine zweiminütige Verspätung bei der Ankunft des Zubringerzuges kann unter Umständen bewirken, daß die Reise nach langer Aufenthaltszeit auf dem Umsteigebahnhof erst eine oder zwei Stunden später als geplant beendet werden kann. Diese übermäßig nachteiligen Auswirkungen einer Verspätung auf die Reisezeit führen häufig dazu, daß Reisende das Verkehrsmittel Eisenbahn als ineffizient wahrnehmen, obwohl für die Fahrten leistungsfähige Strecken vorhanden sind und schnelle Fahrzeuge eingesetzt werden. Geschwindigkeitsvorteile der Zugfahrten gehen verloren, wenn die Koordination der Zugfahrten an den Umsteigebahnhöfen nicht angemessen ist. Die Attraktivität des Verkehrsmittels Eisenbahn wird aus Sicht der Reisenden dann sinken.

In der eisenbahnbetrieblichen Praxis gibt es Vorschriften zur Bemessung außerplanmäßiger Synchronzeiten.² Es ist jedoch nicht klar erkennbar, ob und nach welchen Kriterien diese Synchronzeitregelungen optimiert sind. Ferner gibt es eine Vielzahl von verwandten Problemstellungen, die bereits untersucht wurden.³ Diese Untersuchungen widmen sich jedoch anderen Aspekten der Fahrplanerstellung, grundsätzlichen Aspekten von Zugverspätungen oder sie beschränken sich auf die Betrachtung einzelner Bahnhöfe oder Strecken. Nach Strube⁴ liegen zum Gebiet der außerplanmäßigen Synchronzeiten nur wenige Erkenntnisse vor. Eine netzweite Untersuchung der zeitlichen Auswirkungen außerplanmäßiger Synchronzeiten bei unterschiedlichen Verspätungsniveaus auf die Pünktlichkeit und die Abweichungen der tatsächlichen Reisezeiten von den geplanten Reisezeiten in einem Liniennetz ist bislang noch nicht vorgenommen worden.

Deshalb geschieht dies in der vorliegenden Arbeit. Aufbauend auf einer Modellierung mit Hilfe von Graphen wird ein Liniennetz mit mehreren Bahnhöfen (nicht lediglich ein einzelner Bahnhof oder nur eine bestimmte Strecke) betrachtet. In diesem Liniennetz werden Reisen durchgeführt. Mittels einer Simulation wird das Geschehen in diesem Liniennetz, insbesondere an den Umsteigebahnhöfen, über einen bestimmten Zeitraum hinweg nachgebildet. Die dadurch gewonnenen Daten werden verwendet, um zu Aussagen zu den oben genannten Aspekten zu gelangen. Als Basis für die Anwendung der Simulation dient ein Ausschnitt des Liniennetzes der Deutschen Bahn AG mit 34 Linien und 119 Bahnhöfen.

Hierzu werden in Kapitel 2 vorab die grundlegenden Begriffe aus dem Bereich des Eisenbahnverkehrs erläutert. Die Problemstellung der vorliegenden Arbeit beschreibt Ka-

²Vgl. [Deu95c, S. 3f.], [Deu96a, S. 2527]

³Vgl. z.B. [Men91], [BH86], [Dom89], [HH87], [Vog95], [Car94], [Hei79], [Müh90], [Str96], [Kri96]

⁴Vgl. [Str96, S. 96ff.]

pitel 3. Kapitel 4 schildert zunächst, auf welche Weise die Bahnbetriebssteuerung in der Praxis eines Eisenbahnverkehrsunternehmens erfolgt. Dann folgt ein Überblick über ausgewählte Veröffentlichungen zu solchen Problemstellungen, die mit der Problemstellung der vorliegenden Arbeit verwandt sind. In Kapitel 5 wird die Modellierung eines Eisenbahn-Liniennetzes, der Zugfahrten in diesem Netz, möglicher Verspätungen, des planmäßigen und außerplanmäßigen Anschlußgeschehens an den Umsteigebahnhöfen und der dazugehörigen Reisendenströme dargestellt. Kapitel 6 zeigt, wie dieses Modell in eine Simulation des Geschehens in einem Liniennetz umgesetzt wird. Die Anwendung des Simulationsmodells auf ein realitätsnahes Liniennetz-Beispiel und die Ergebnisse dieser Simulation sind Gegenstand des Kapitels 7. Kapitel 8 setzt sich abschließend mit den Ergebnissen dieser Arbeit kritisch auseinander und gibt einen Ausblick auf mögliche Erweiterungen des Simulationsmodells.

2. Grundbegriffe des Eisenbahnverkehrs

Im Allgemeinen läßt sich Verkehr – hier verstanden als Gesamtheit der technischen, organisatorischen und ökonomischen Maßnahmen zur Ortsveränderung von Menschen – unterteilen in Nah- und in Fernverkehr.¹ Eine präzise Abgrenzung ist abhängig von der Zielsetzung und der Perspektive, aus der Verkehr betrachtet wird. Die Begriffe Nahverkehr und Fernverkehr lassen sich deshalb nicht nur aus der zurückgelegten Entfernung und der Dauer einer Reise, sondern auch nach den Verkehrsströmen erklären, die sich entsprechend der Verkehrsnachfrage ergeben.

Orte, die Ursprung bzw. Ziel von Verkehrsnachfrage sind, lassen sich nach Raumordnungsbegriffen klassifizieren:²

- *Unterzentren*. Das sind im allgemeinen Orte mit bis zu 25000 Einwohnern.
- *Mittelzentren*. Das sind im allgemeinen Orte mit über 25000 und bis zu 500000 Einwohnern.
- *Oberzentren*. Das sind im allgemeinen Orte mit über 500000 Einwohnern.

Verkehrsströme finden dann allgemein statt

1. zwischen verschiedenen Mittel- bzw. Oberzentren,
2. zwischen Mittel- bzw. Oberzentren und dem ländlichen Raum,
3. innerhalb der Mittel- bzw. Oberzentren,
4. innerhalb des ländlichen Raumes.

Zur Unterscheidung hinsichtlich der Dauer und der Entfernung können juristische Definitionen herangezogen werden.³ Danach kann unter *Nahverkehr* die Personenbeförderung

¹Vgl. [Adl90, S. 824f.]. Weitere Definitionen und Unterteilungen des Begriffes Verkehr sind in [Voi73, S. 34 ff.] zu finden.

²Vgl. zum Raumordnungsbegriff des Zentrums [LWV79, S. 67ff.]. An die Zentrumsbegriffe sind ferner infrastrukturelle und organisatorische Ausstattungsmerkmale geknüpft. Diese können hier aber vernachlässigt werden.

³Vgl. hierzu [Gra92, S. 3ff.]

auf Linien verstanden werden, wenn die Mehrzahl der Reisenden nicht länger als eine Stunde oder nicht weiter als 50 km fährt. Werden diese zeitlichen und räumlichen Grenzen überschritten, handelt es sich um *Fernverkehr*.

Darüber hinaus ist jedoch auch der Verkehrszweck von Bedeutung: Deshalb soll in dieser Arbeit unter *Fernverkehr* die Personenbeförderung mit schienengebundenen Verkehrsmitteln verstanden werden, die den Zweck hat, Entfernungen zwischen verschiedenen Mittel- bzw. Oberzentren zu überbrücken. Die schienengebundene Personenbeförderung, die den Zweck hat, Entfernungen zwischen Mittel- bzw. Oberzentren und ihrem Umland zu überbrücken und den ländlichen Raum durch die Verbindung von Unterzentren zu erschließen, wird als *Nahverkehr* bezeichnet. Die Anbindung von Unter- und kleinen Mittelzentren an größere Mittelzentren und Oberzentren sowie die Verbindung kleinerer Mittel- und Unterzentren untereinander ist damit Aufgabe des Nahverkehrs. Die obigen zeitlichen und räumlichen Grenzen können dabei als Größenordnungshinweise herangezogen werden, sie müssen jedoch nicht präzise eingehalten werden. Verkehrsströme innerhalb der Mittel- bzw. Oberzentren werden allgemein auch als Nahverkehr bezeichnet. Diese innerörtlichen Verkehrsströme werden jedoch in dieser Arbeit nicht berücksichtigt. In einem bestimmten geographischen Raum gibt es *Trassen* zur Abwicklung des schienengebundenen Verkehrs. Solche Trassen sind Geländeabschnitte, die für die Verlegung von Gleisen in besonderer Weise vorbereitet sind. Auf diesen Trassen sind *Gleise*⁴ vorhanden, die voneinander abzweigen und einander kreuzen können. Die Verbindung zweier Orte mittels einer Trasse, auf der eines oder mehrere Gleise vorhanden sind, wird *Strecke* genannt. Strecken lassen sich zu verschiedenen Zwecken weiter in *Streckenabschnitte* unterteilen. Mehrere miteinander verbundene Strecken bilden ein *Streckennetz*. Derartige Streckennetze lassen sich als Graph darstellen.⁵ Je nach dem verfolgten Zweck können Einrichtungen zur Durchführung des Eisenbahnverkehrs (z.B. Abzweigstellen, Bahnhöfe, Haupt- oder Umsteigebahnhöfe großer Städte) in entsprechender Abstraktion als Knoten dargestellt werden. Vorhandene Gleisverbindungen zwischen diesen Knoten werden als Kanten dargestellt. Die Darstellung erfolgt ungerichtet.⁶

Für die Durchführung des schienengebundenen Personenverkehrs sind Anlagen an den Strecken erforderlich, die den Zu- und Abgang der Reisenden zu und von den Zügen ermöglichen oder fördern. Dies sind die *Bahnhöfe*.⁷

Die eigentliche Ortsveränderung erfolgt im Eisenbahnverkehr mittels geeigneter schienengebundener Fahrzeuge. Fahrzeuge des Schienenverkehrs werden allgemein in *Triebfahrzeuge* (Lokomotiven und Triebwagen) und *Wagen* (Reisezugwagen und Güterwagen) unterschieden. Zu den Reisezugwagen zählen Personen-, Reisezuggepäck-, Autoreisezug-

⁴Gleise werden umgangssprachlich häufig auch *Schienen* genannt

⁵Vgl. den Streckennetz-Graph in Abbildung 5.1 auf Seite 51

⁶Vgl. [Deu96a, S. 2f.] und [Wei81, S. 15]

⁷Vgl. [EBO67, S. 3f.] In [EBO67] wird an den Begriff des Bahnhofes das Vorhandensein einer Gleisabzweigung (Weiche) geknüpft. Dies bleibt aufgrund der Problemstellung in dieser Arbeit unberücksichtigt.

und Postwagen.⁸ Eine Zusammenstellung von mindestens einer Lokomotive und mindestens einem Wagen heißt *Zug*. Ist das Triebfahrzeug ein Triebwagen, gilt dieser auch ohne weitere Wagen als Zug. Züge, in die ausschließlich Reisezugwagen eingestellt sind, werden als *Reisezüge* bezeichnet. In dieser Arbeit wird ausschließlich der schienengebundene Personenverkehr betrachtet. Daher werden hier die Begriffe Reisezug und Zug synonym verwendet. Die Überbrückung von räumlichen Entfernungen mit Reisezügen wird in dieser Arbeit *Reise* genannt. In diesem Sinne beginnen und enden Reisen an Bahnhöfen. Abzielend auf die Durchführung von Reisen soll der Begriff des Bahnhofes in dieser Arbeit weiter unterschieden werden. Bahnhöfe, an denen Reisen begonnen werden, werden hier als *Startbahnhöfe* bezeichnet, solche, an denen Reisen beendet werden, werden *Zielbahnhöfe* der Reise genannt. Die Dauer einer Reise vom Startbahnhof zum Zielbahnhof wird *Reisezeit* genannt.

Räumliche und zeitliche Bewegungen der Züge, d.h. ihre Abfahrts-, Ankunfts- und Durchfahrtszeiten entlang der zu befahrenden Strecke, werden vorab geplant und festgelegt. Eine solche Festlegung heißt allgemein *Fahrplan*.

In einem Fahrplan wird der Einsatz der Produktionsmittel eines Eisenbahnunternehmens koordiniert. Derartige Produktionsmittel sind

- die Eisenbahnstrecken unter Berücksichtigung der Streckenkapazitätsrestriktionen,
- die Fahrzeuge,
- das Personal.

Ein Fahrplan soll die sichere und wirtschaftliche Nutzung dieser Ressourcen zur Deckung der Verkehrsnachfrage gewährleisten. Aus Sicht der Reisenden, die die Nachfrageseite des Verkehrsmarktes bilden, verkörpert der Fahrplan das Angebot der Eisenbahnunternehmen. Konkret bedeutet dies, daß Fahrtmöglichkeiten grundsätzlich nur zu den vom Fahrplan vorgegebenen Zeiten von und zu den im Fahrplan vorgegebenen Orten bestehen.⁹ Es kann nach der Verwendung zwischen Fahrplänen für den öffentlichen Gebrauch (öffentlichen Fahrplänen) und Dienstfahrplänen für den Dienstgebrauch unterschieden werden.¹⁰

Fährt längs einer Strecke ein Zug nach einem bestimmten Fahrplan, dann bildet diese Strecke, die Folge der dazu gehörenden Bahnhöfe, der Fahrplan und dieser Zug eine *Zugfahrt*. Gleichwertig sind die Begriffe *Zuglauf* oder *Laufweg* dieses Zuges. Zugläufe können zu Identifikationszwecken beispielsweise durch eine natürliche Zahl gekennzeichnet werden. Eine derartige Kennzeichnung heißt *Zugnummer*.

Verschiedentlich werden die Begriffe Zug und Zugfahrt synonym verwendet. Der Begriff Zug wird dann im Sinne einer Zugfahrt verstanden. *Haltebahnhöfe* sind diejenigen Bahnhöfe einer Zugfahrt, an denen der Zug hält.

⁸Vgl. [EBO67, S. 15]

⁹Vgl. [Wei81, S. 1] und [Adl90, S. 288, 579]

¹⁰Vgl. [Deu44, S. 2] und [Adl90, S. 275]

Züge, die hinsichtlich ihrer Verkehrsaufgabe, ihrer Reisegeschwindigkeit, ihrer Fahrgeschwindigkeit, ihrer Haltehäufigkeit, des räumlichen Abstands zwischen zwei Halten an Bahnhöfen (Haltestellenabstand) und der Komfortmerkmale der eingestellten Wagen ähnliche Eigenschaften besitzen, lassen sich in Gruppen zusammenfassen. Solche Gruppen werden *Zuggattungen* genannt.

Im Reiseverkehr können Zuggattungen des Nah- und des Fernverkehrs unterschieden werden. Die Zuggattungen des Fernverkehrs verbinden in ihrer Verkehrsaufgabe nur Mittel- bzw. Oberzentren miteinander. Zuggattungen des Nahverkehrs stellen hingegen die Verbindung des ländlichen Raumes mit Mittel- bzw. Oberzentren sicher, erschließen den ländlichen Raum oder erschließen städtische Ballungsräume. Die Fahrtgeschwindigkeit sowie Haltestellenabstand sind bei Zuggattungen des Fernverkehrs größer, die Haltehäufigkeit pro Zeiteinheit ist geringer als bei Zuggattungen des Nahverkehrs. Zuggattungen des Fernverkehrs sind gegenüber den Zuggattungen des Nahverkehrs meist mit zusätzlichen Komfortmerkmalen ausgestattet. Als Beispiele für solche zusätzlichen Komfortmerkmale können größere Laufruhe der Fahrzeuge und Speise- und Getränkeangebot im Zug genannt werden. Die Tabellen A.2.1 und A.2.2 auf den Seiten 184 und 185 im Anhang¹¹ zeigen beispielhaft die Zuggattungen der Deutschen Bahn AG mit ihren Verkehrsaufgaben.

Zur Fahrplanerstellung und bei Entscheidungen im Rahmen der Betriebssteuerung im Eisenbahnverkehr ist es zweckmäßig, schneller fahrenden Zügen beim Befahren von Streckenabschnitten einen Vorrang vor langsamer fahrenden Zügen einzuräumen, um gegenseitige Behinderungen zu vermeiden. Hierzu erhält jede Zuggattung eine Rangeinstufung, die beispielsweise durch eine Ordnungszahl angezeigt wird. Zuggattungen des Fernverkehrs erhalten meist höhere Rangeinstufungen, Zuggattungen des Nahverkehrs nehmen im Reiseverkehr im Regelfall die niedrigen Ränge ein.¹²

Mehrere Zugfahrten einer Zuggattung, die auf einer bestimmten Strecke dieselbe Folge von Haltebahnhöfen gemeinsam haben, werden unter dem Begriff *Linie* zusammengefaßt. Linien können zu Identifikationszwecken mit natürlichen Zahlen gekennzeichnet werden (*Liniennummern*). Linien aus Zuggattungen des Nahverkehrs heißen *Nahverkehrslinien*, solche aus Zuggattungen des Fernverkehrs heißen *Fernverkehrslinien*. Mehrere miteinander verbundene Linien bilden ein *Liniennetz*. Ein Liniennetz ist also eine Menge von Linien in einem Streckennetz. Bahnhöfe, an denen Linien beginnen bzw. enden, werden *Anfangs- bzw. Endbahnhöfe* der Linien genannt. Liniennetze lassen sich, ähnlich wie Streckennetze, graphisch darstellen. In der graphischen Darstellung sind im Regelfall die den Zugfahrten zugeordneten Fahrpläne aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht angegeben. Die Linienführung mit der Richtung der Zugfahrten, ihren Anfangs-, End- und Haltebahnhöfen kann durch einen gerichteten Kantenzug dargestellt werden, die Anfangs-, End- und Haltebahnhöfe werden durch Knoten abgebildet. Auch für diese graphische Darstellung werden oft die Begriffe *Linie* und *Liniennetz* verwendet. Ein Beispiel für die

¹¹Vgl. [Deu96a, S. 4f.], [Sch93, S. 368ff.]

¹²Vgl. [Sch94, S. 99]

graphische Darstellung eines Liniennetzes mit drei Linien und sechs Bahnhöfen zeigt der Liniennetz-Graph in Abbildung 5.3 auf Seite 54.¹³

Mehrere Zugfahrten einer Richtung auf einer Linie können in festem zeitlichen Abstand zueinander und regelmäßig wiederkehrend stattfinden. Dieser feste zeitliche Abstand zwischen zwei Zugfahrten wird *Taktzeit* genannt. Die Züge verkehren entsprechend im Takt. Ein *Taktfahrplan* ist ein Fahrplan, in dem Zugfahrten im Takt verkehren. Sind die Taktfahrpläne mehrerer Linien systematisch (z.B. hinsichtlich der Umsteigemöglichkeiten) aufeinander abgestimmt, liegt ein integraler oder integrierter Taktfahrplan vor.¹⁴

Ist es erforderlich, daß Reisende zum Erreichen des Zielbahnhofes an einem Bahnhof die Linie wechseln müssen, weil keine direkte Verbindung einer Linie zwischen Start- und Zielbahnhof besteht, wird dieser Linienwechsel *Umsteigen* genannt. Bahnhöfe, an denen Reisende umsteigen können, werden *Umsteigebahnhöfe* genannt. Ein Umsteigebahnhof kann gleichzeitig Anfangs- bzw. Endbahnhof einer oder mehrerer Linien sein. Die für das Umsteigen planmäßig zur Verfügung stehende Zeit soll *planmäßige Umsteigezeit* heißen. Eine den Reisenden in öffentlichen Fahrplänen bekanntgegebene, zeitlich günstige Möglichkeit, nach dem Umsteigen von Zugfahrt 1 mit einer Zugfahrt 2 einer anderen Linie die Reise fortzusetzen, wird *Anschluß* genannt. Die Zugfahrt, mit der die Reise so fortgesetzt werden soll, heißt *Anschlußzug*. Da die Umsteigezeit ausreichen soll, um unter Berücksichtigung der baulichen Gegebenheiten eines Bahnhofes und des Standortes der am Linienwechsel beteiligten Züge im Bahnhof einen Anschlußzug zu erreichen, ist es sinnvoll, für jeden Bahnhof eine untere Schranke für die Umsteigezeit festzulegen. Diese Schranke heißt *Mindestübergangszeit*. Der individuelle körperliche Zustand einzelner Reisender wird bei der Festlegung der Mindestübergangszeit aus Gründen der Vereinfachung nicht berücksichtigt.¹⁵ Ein Anschluß ist demnach auch eine fahrplantechnische Bindung derart, daß die Differenz aus der Abfahrtszeit der Zugfahrt 2 und der Ankunftszeit der Zugfahrt 1 die Mindestübergangszeit nicht unterschreiten darf.¹⁶

Die von der Abfahrt am Startbahnhof bis zur Ankunft am Zielbahnhof planmäßig zu veranschlagende Zeit (einschließlich der Unterwegaufenthalte) heißt *planmäßige Beförderungszeit*. Die planmäßige Beförderungszeit enthält Zeitanteile für die Haltezeit an den Haltebahnhöfen zwischen dem Start- und dem Zielbahnhof, Zeitanteile für betriebsbedingt notwendige Halte auf der Strecke zwischen zwei Haltebahnhöfen sowie Zeitanteile für die Fahrten auf Strecken zwischen den Halten. Die Haltezeitanteile sind für alle Unterwegaufenthalte, die Fahrzeitanteile für alle Fahrten auf Strecken zwischen den Halten zu summieren. Die Zusammenhänge zwischen den Zeitanteilen der planmäßigen Beförderungszeit zeigt Abbildung 2.1 auf Seite 10.¹⁷

Die *reine Fahrzeit* ist dabei die Zeit, die Züge unter normalen Bedingungen bei Beachtung eisenbahntechnischer und eisenbahnbetrieblicher Vorschriften und bei vorschrifts-

¹³Zu den bereits hier verwendeten Begriffen aus der Graphentheorie siehe Abschnitt 5.1.

¹⁴Vgl. u.a. [Göb93, S. 358], [Dir77, S. 9], [Vog95, S. 30f.]

¹⁵Vgl. [Adl90, S. 42, 528] und [Her77]

¹⁶Vgl. zur fahrplantechnischen Bindung „Anschluß“ auch [Bär96, S. 140f.] und Tabelle 3.1 auf Seite 24

¹⁷Vgl. [HK96, S. 52] und [Kri96, S. 8f.]

2. Grundbegriffe des Eisenbahnverkehrs

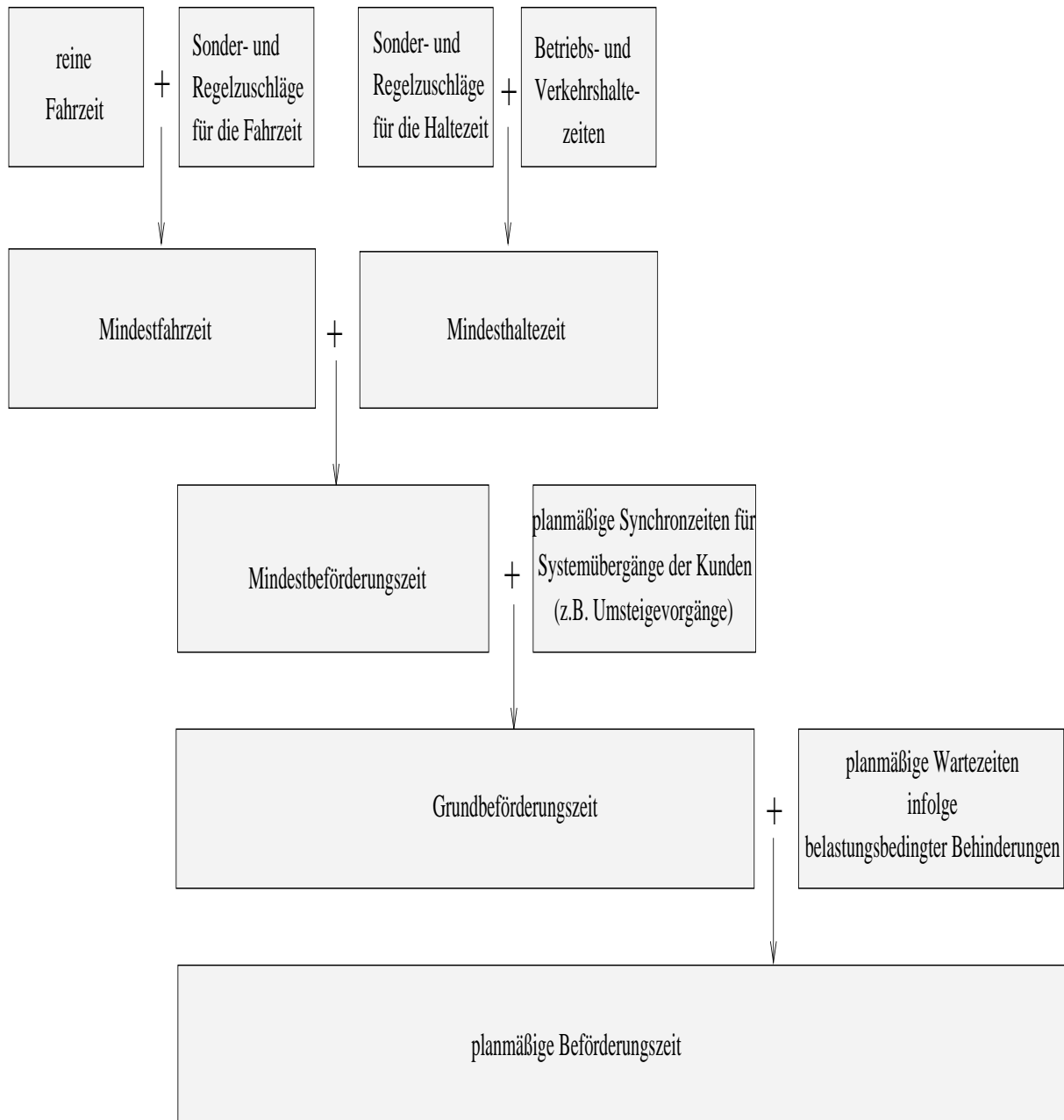


Abbildung 2.1.: Zusammenhänge zwischen den Zeitanteilen der planmäßigen Beförderungszeit

mäßiger Ausnutzung der Antriebs- und Bremsfähigkeiten der Fahrzeuge benötigen, um von Ort *A* zu Ort *B* zu gelangen. Die reine Fahrzeit wird mit Verfahren der Fahrzeitermittlung festgestellt. Sie enthält keine Haltezeiten¹⁸. Die *Verkehrshaltezeiten* sind die Aufenthaltszeiten eines Zuges für verkehrliche Zwecke. Verkehrshalte gibt es ausschließlich an Bahnhöfen. Gründe für Verkehrshaltezeiten sind beispielsweise

- das Ein- und Aussteigen von Reisenden,
- das Be- und Entladen von Gepäck, Post, Expreßgut.

Diese Zeit wird durch das Reisendenaufkommen und die Bauart der Fahrzeuge (z.B. durch die Anzahl der zum Fahrgastwechsel verfügbaren Türen) beeinflußt. Die Verkehrshaltezeiten können einen Mindestwert, beispielsweise zwei Minuten, nicht unterschreiten.¹⁹

Betriebshaltezeiten sind die Aufenthaltszeiten eines Zuges, die ausschließlich betrieblichen Zwecken dienen. Dies ist beispielsweise der Zeitbedarf für

- die Abwicklung betrieblich notwendiger Überholungen²⁰ und Zugkreuzungen²¹ (jeweils auch auf der Strecke zwischen zwei Bahnhöfen),
- das Ab- oder Ansetzen des Triebfahrzeuges,
- Bremsproben,
- Veränderungen des Zugverbandes durch An- oder Abhängen von Wagen,
- Personalwechsel.²²

Um Abweichungen zwischen den tatsächlichen Bedingungen der Zugfahrten und den idealtypischen Bedingungen bei der Bestimmung der reinen Fahrzeit und der Betriebs- und Verkehrshaltezeiten auszugleichen, werden *Zeitzuschläge* festgelegt. Der *Regelzuschlag* dient allgemein dem Ausgleich geringfügiger Fahr- bzw. Haltezeitüberschreitungen und wird abhängig von der Triebfahrzeugart, dem Zuggewicht und der Höchstgeschwindigkeit festgelegt. Demgegenüber dienen *Sonderzuschläge* dem Ausgleich von Fahr- bzw. Haltezeitverlusten aus Langsamfahrstellen bei Streckenbauarbeiten. Meist ist der Zeitzuschlag ein Prozentwert der reinen Fahrzeit bzw. der Betriebs- und Verkehrshaltezeit.²³

Eine Übersicht der Regelzuschläge für Reisezüge im Bereich der Deutschen Bahn AG, die mit elektrischem Triebfahrzeug bespannt sind, enthält Tabelle 2.1. Bei der Bespannung

¹⁸Vgl. [Adl90, S. 617]. Zu Verfahren der Fahrzeitermittlung vgl. u.a. [JG95b], [JG95a]

¹⁹Vgl. [Adl90, S. 827f.], [Kri96, S. 8] und [EGGS83, S. 154]

²⁰Eine Überholung ist das Ausweichen zweier Züge, die in gleicher Fahrtrichtung mit unterschiedlicher Geschwindigkeit fahren oder einer der beiden Züge hält. Überholungen sind nur auf mehrgleisigen Streckenabschnitten möglich. Vgl. dazu [Pac99, S. 264]

²¹Eine Zugkreuzung ist ein eisenbahnbetrieblicher Vorgang, bei dem zwei auf eingleisiger Strecke in entgegengesetzter Richtung fahrende Züge einander auf einem mehrgleisigen Streckenabschnitt ausweichen. Dabei muß einer der beteiligten Züge halten (stehende Kreuzung). Vgl. dazu [Adl90, S. 460]

²²Vgl. [Pac99, S. 183ff.], [Kri96, S. 8] und [EGGS83, S. 154]

²³Vgl. [Adl90, S. 289], [Kri96, S. 8] und [KW87, S. 1002]

Höchstgeschwindigkeit des Zuges in km/h	Anhängelast ≤ 350 t \leq ca. 8 Wagen	351–500 t ca. 8–11 Wagen	501–600 t ca. 11–13 Wagen	> 600 t $>$ ca. 14 Wagen
$v_{\max} \leq 120$	3%	3%	3%	4%
$120 < v_{\max} \leq 140$	3%	4%	4%	5%
$v_{\max} > 140$	3%	4%	5%	5%

Tabelle 2.1.: Die Regelzuschläge für Reisezüge bei Bespannung mit elektrischem Triebfahrzeug

des Reisezuges mit einem Triebfahrzeug mit Verbrennungsmotor (Diesellokomotive) sind die Regelzuschläge nur von der Anhängelast abhängig. Sie betragen im Bereich der Deutschen Bahn AG bei einer Anhängelast von bis zu 400 t einschließlich 3% und darüber 6% der reinen Fahrzeit.

Die *Mindestfahrzeit* setzt sich zusammen aus der reinen Fahrzeit und den Regel- und Sonderzuschlägen für die Fahrzeit. Die *Mindesthaltezeit* ergibt sich entsprechend aus den Betriebs- und Verkehrshaltezeiten und den Sonder- und Regelzuschlägen für die Haltezeit. Die *Mindestbeförderungszeit* von einem Startbahnhof zu einem Zielbahnhof ergibt sich dann aus der Summe der Mindestfahrzeiten auf den Streckenabschnitten zwischen den Halten und der Mindesthaltezeiten.

Es kann vorkommen, daß die Mindesthaltezeit eines Zuges nicht ausreicht, um für die Reisenden unter Berücksichtigung von Mindestübergangszeiten einen Anschluß auf diesen Zug sicherzustellen. Um in solchen Fällen dennoch Anschlüsse zu ermöglichen, kann die Mindesthaltezeit überschritten werden. Der Zeitraum, um den die Mindesthaltezeit eines Zuges überschritten wird, um einen planmäßigen Anschluß auf diesen Zug sicherzustellen, heißt *planmäßige Synchronzeit*. Planmäßige Synchronzeiten dienen dazu, die planmäßigen Abfahrtszeiten der Züge an Umsteigebahnhöfen unter Berücksichtigung ihrer Ankunftszeiten so zu koordinieren, daß den Reisenden das Umsteigen zwischen diesen Zügen ermöglicht wird. Die Summe aus den Mindestbeförderungszeiten und den planmäßigen Synchronzeiten heißt *Grundbeförderungszeit*.

Die Zusammenhänge bei der Ermittlung planmäßiger Synchronzeiten zeigt Abbildung 2.2 anhand des folgenden Beispiels:²⁴ Zug 1 erreicht um 10.00 Uhr den dargestellten Bahnhof. Er könnte – wenn nur betriebliche und verkehrliche Notwendigkeiten berücksichtigt zu werden bräuchten – frühestens nach Ablauf einer Mindesthaltezeit von 2 Minuten seine Fahrt um 10.02 Uhr fortsetzen. Zug 2 erreicht den Bahnhof um 10.01 Uhr. Seine Mindesthaltezeit beträgt ebenfalls 2 Minuten, so daß dieser Zug frühestens um 10.03 Uhr seine Fahrt fortsetzen könnte. Zwischen beiden Zügen soll jedoch ein Anschluß

²⁴Vgl. [Her95b, S. 92]

sichergestellt werden. Die Mindestübergangszeit beträgt für alle Umsteigevorgänge an diesem Bahnhof 8 Minuten. Damit Umsteigende von Zug 2 unter Berücksichtigung der Mindestübergangszeit den Zug 1 erreichen können, darf Zug 1 nicht vor 10.09 Uhr abfahren. Die planmäßige Synchronzeit, die deshalb Zug 1 eingeräumt werden muß, um den Anschluß von Zug 2 sicherzustellen, beträgt also 7 Minuten. Entsprechend darf Zug 2 nicht vor 10.08 Uhr abfahren, wenn ein Anschluß von Zug 1 gewährleistet sein soll. Die planmäßige Synchronzeit des Zuges 2 beträgt somit 5 Minuten.

Planmäßige Wartezeiten entstehen, wenn es durch mindestens zwei planmäßige Zugfahrten zu einer gleichzeitigen Belegung desselben Streckenabschnittes käme. Da dies eisenbahnbetrieblich nicht möglich ist, können Streckenabschnitte nur nacheinander belegt werden. Um dies zu erreichen, wird mindestens eine der an diesem Belegungskonflikt beteiligten Zugfahrten durch planmäßige Wartezeiten zeitlich verlegt. Planmäßige Wartezeiten müssen insbesondere an Umsteigebahnhöfen (wie in Abbildung 2.2) berücksichtigt werden, wenn Züge zur Gewährleistung eines Anschlusses zeitgleich halten sollen, die Strecken im Bahnhofsvorfeld jedoch nur nacheinander befahren werden können. Im Beispiel zu Abbildung 2.2 ist ein Anschluß sichergestellt, wenn Zug 1 um 10.09 Uhr und Zug 2 um 10.08 Uhr abfährt. Zu diesen Zeitpunkten komme es jedoch bei der Ausfahrt aus dem Bahnhof jeweils zu Belegungskonflikten mit anderen planmäßigen Zugfahrten. Um dies zu verhindern, werden die Abfahrten beider Züge um eine planmäßige Wartezeit von jeweils 3 Minuten verlegt, so daß schließlich Zug 1 um 10.12 Uhr und Zug 2 um 10.11 Uhr den Bahnhof verlassen. Diese Abfahrtszeiten werden in den Soll-Fahrplänen ausgewiesen. Die planmäßige Umsteigezeit für Reisende, die von Zug 2 auf Zug 1 umsteigen, beträgt dann 11 Minuten. Für Reisende, die von Zug 1 auf Zug 2 umsteigen, beträgt sie ebenfalls 11 Minuten.

Die Grundbeförderungszeit und die planmäßigen Wartezeiten ergeben die *planmäßige Beförderungszeit*. Werden zwei unmittelbar aufeinanderfolgende Bahnhöfe (d.h. Bahnhöfe, zwischen denen es keine weiteren Verkehrshalte gibt) betrachtet, so brauchen wegen der nicht vorhandenen Verkehrshalte die Zeitanteile der planmäßigen Synchron- und Wartezeiten nicht berücksichtigt zu werden. Für zwei aufeinanderfolgende Bahnhöfe, zwischen denen es keine weiteren Verkehrshalte gibt, ist die planmäßige Beförderungszeit und die Grundbeförderungszeit gleich der Mindestbeförderungszeit zwischen diesen Bahnhöfen. Zwischen den in öffentlichen Fahrplänen ausgewiesenen Verkehrshalten an diesen aufeinanderfolgenden Bahnhöfen kann es Betriebshalte geben. Betriebshalte sind in öffentlichen Fahrplänen nicht ausgewiesen. Die dort ausgewiesenen Zeitangaben enthalten die Zeitanteile für Betriebshaltezeiten zwischen zwei Verkehrshalten jedoch implizit. Den Fahrplänen im Sinne dieser Arbeit liegen die Angaben der öffentlichen Fahrpläne zugrunde. Auch in dieser Arbeit werden die Betriebshaltezeiten zwischen zwei Verkehrshalten daher auch implizit berücksichtigt.

Bei einem Fahrplan handelt es sich um geplante (planmäßige) Zeiten, bei denen es bei der tatsächlichen Verkehrsdurchführung zu Abweichungen aufgrund unterschiedlicher Ursachen kommen kann. Daher wird in dieser Arbeit zur Verdeutlichung dieses Sachverhaltes dafür die Bezeichnung *Soll-Fahrplan* verwendet. Bei den in einem Soll-Fahrplan

2. Grundbegriffe des Eisenbahnverkehrs

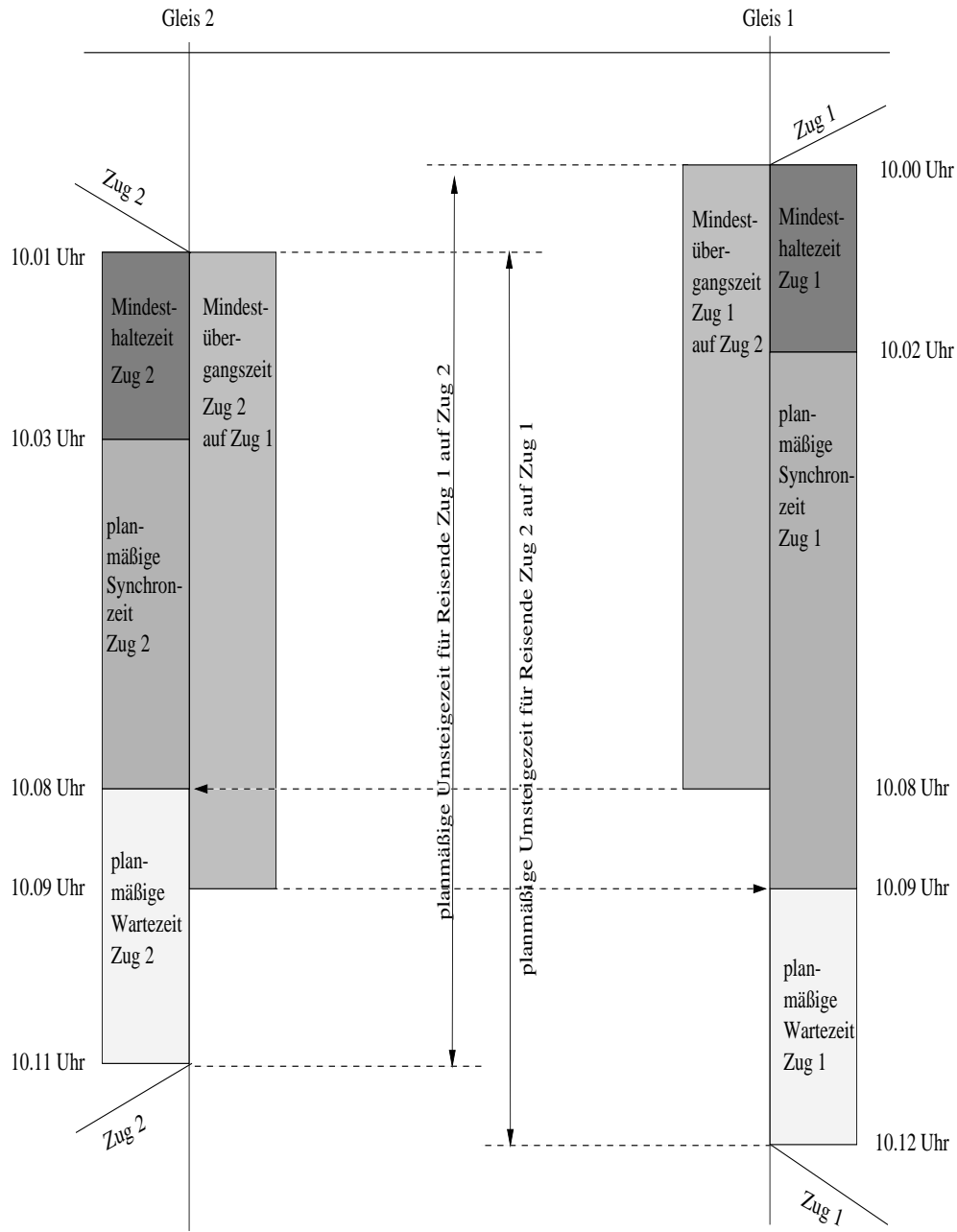


Abbildung 2.2.: Ermittlung der Synchronzeit

angegebenen Zeiten sind Regelzuschläge, Sonderzuschläge (insoweit sie für die gesamten Gültigkeitszeitraum des Soll-Fahrplanes bestehen), Betriebs- und Verkehrshaltezeiten planmäßige Synchronzeiten und planmäßige Wartezeiten berücksichtigt und enthalten. Damit weist der Soll-Fahrplan die planmäßigen Beförderungszeiten aus.

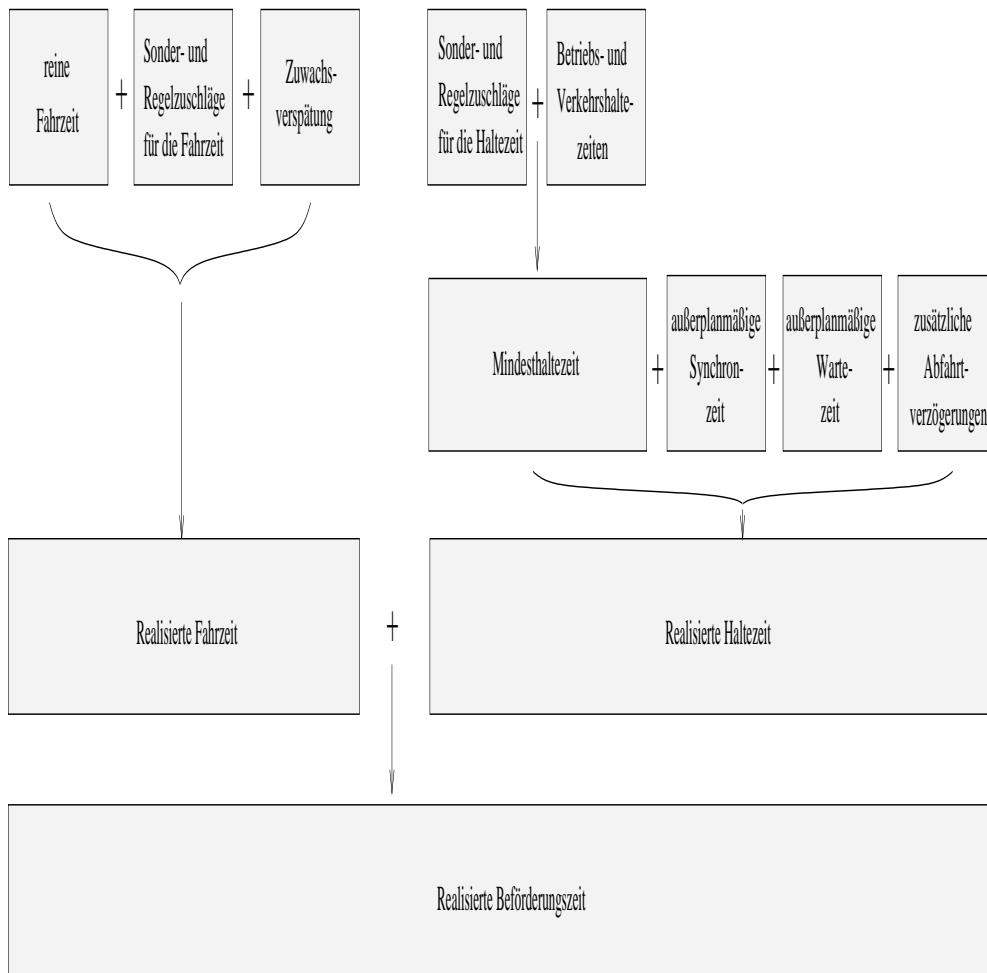


Abbildung 2.3.: Zusammenhänge zwischen den Zeitanteilen der realisierten Beförderungszeit

Die auf Basis der planmäßigen Beförderungszeit von der Abfahrt am Startbahnhof bis zur Ankunft am Zielbahnhof tatsächlich in Anspruch genommene Zeit wird *realisierte Beförderungszeit* genannt.

Diese realisierte Beförderungszeit kann von den Soll-Zeiten abweichen. Verkehrt eine Zugfahrt abweichend von den in ihrem Soll-Fahrplan vorgegebenen Zeiten, so wird diese

zeitliche Abweichung, die sich auf einen bestimmten Ort bezieht, *Verspätung* genannt.²⁵ Verspätungen werden begrifflich in verschiedene Verspätungsarten²⁶ unterteilt:

- *Einbruchsverspätung* ist die Verspätung, die Zugfahrten beim Einfahren in einen betrachteten Streckenabschnitt haben. Die Einbruchsverspätung haben diese Zugfahrten außerhalb des betrachteten Streckenabschnittes erhalten.
- *Zuwachsverspätung* ist die Verspätung, die Zugfahrten auf dem betrachteten Streckenabschnitt selbst erhalten. Zuwachsverspätungen können weiter in Erst- und Folgeverspätungen unterschieden werden:
 - Wird die Zuwachsverspätung unmittelbar durch auftretende technische Mängel, menschliche Fehler oder sonstige Fremdeinwirkungen im betrachteten Streckenabschnitt verursacht, wird diese Zuwachsverspätung *Erstverspätung* genannt.
 - Wird ein Zug im betrachteten Streckenabschnitt durch einen vorausfahrenden, verspäteten oder langsamer fahrenden Zug aufgehalten und somit verspätet, wird diese Zuwachsverspätung *Folgeverspätung* genannt.
- *Ausbruchsverspätung* ist die Verspätung, die Zugfahrten beim Verlassen eines betrachteten Streckenabschnittes haben.

Verspätungen werden grundsätzlich als Ist-Zeit abzüglich der Soll-Zeit berechnet. Verkehrt eine Zugfahrt später als in ihrem Soll-Fahrplan vorgegeben, werden sich also positive Zahlenwerte für die Einbruchs-, Zuwachs- und Ausbruchsverspätungen ergeben. Es kann jedoch auch vorkommen, daß die durch Regel- und Sonderzuschläge vorgesehenen Zeitreserven nicht ausgeschöpft werden und eine Zugfahrt daher einen Streckenabschnitt in kürzerer Zeit durchfährt, als es im Soll-Fahrplan vorgesehen ist. In solchen Fällen verkehrt eine Zugfahrt früher als im Soll-Fahrplan vorgegeben. Einbruchs-, Zuwachs- und Ausbruchsverspätung nehmen dann negative Werte an. Solche „Verfrühungen“ sind eisenbahnbetrieblich Verspätungen mit negativem Wert.

Die reine Fahrzeit, die Regel- und Sonderzuschläge und die Zuwachsverspätungen bilden zusammen die *realisierte Fahrzeit* (vgl. hierzu und zu den folgenden Ausführungen Abbildung 2.3 auf Seite 15, die die Zusammenhänge zwischen den Zeitanteilen der realisierten Beförderungszeit zeigt).

Ist der Ort, auf den sich die Verspätung einer Zugfahrt bezieht, ein Haltebahnhof dieser Zugfahrt, finden weitere Verspätungsbegriffe Anwendung. Es gebe hierzu zwei Streckenabschnitte: Streckenabschnitt 1 münde in diesen Bahnhof ein und ende dort, wo sich die Zugspitze²⁷ befindet, wenn der Zug im Bahnhof hält.²⁸ An dieser Stelle beginnt Streckenabschnitt 2. Die Verspätung, die Zugfahrten beim Halt am Ende des Streckenabschnittes

²⁵Vgl. [Adl90, S. 837f.]

²⁶Vgl. u.a. [Zeh76] und [Hei79]

²⁷Die *Zugspitze* ist in Fahrtrichtung das erste Fahrzeug eines Zuges. Siehe [Adl90, S. 919]

²⁸Dies kann beispielsweise der Ort des Signals Ne 5 (Haltetafel) sein. Siehe zu den Signalbegriffen [Deu95a]

1 und damit beim Eintreffen in diesem Bahnhof haben, wird als *Ankunftsverspätung* bezeichnet. Als *Abfahrtsverspätung* wird die Verspätung bezeichnet, die Zugfahrten beim Einfahren in den aus dem Bahnhof herausführenden Streckenabschnitt 2 und damit beim Verlassen dieses Bahnhofes haben.

Bei der Untersuchung von Ankunftsverspätungen ist der Pünktlichkeitsgrad von Interesse. Hierzu wird ein oberer Grenzwert für die Ankunftsverspätung (z.B. 5 Minuten) festgelegt. Dann hat ein gewisser Anteil aller in einem bestimmten Zeitraum an einem Bahnhof ankommenden Züge eine Ankunftsverspätung, die kleiner oder gleich diesem Grenzwert ist. Die relative Größe dieses Anteils ist der *Pünktlichkeitsgrad* d_P . Ein Wert von $d_P = 0,85$ für den Pünktlichkeitsgrad bedeutet dann, daß 85% aller betrachteten Züge eine Ankunftsverspätung von bis zu 5 Minuten hatten. Als *Verspätungsgrad* $d_D = 1 - d_P$ wird der relative Anteil aller in einem bestimmten Zeitraum an einem Bahnhof ankommenden Züge, deren Ankunftsverspätung größer als der Grenzwert ist, festgelegt.²⁹

Wenn der zubringende Zug eine Ankunftsverspätung hat und der Anschlußzug zum frühestmöglichen Zeitpunkt abfährt (dies kann frühestens zum Zeitpunkt seiner planmäßigen Abfahrtszeit oder anderenfalls nach Ablauf der Mindesthaltezeit sein), kann es passieren, daß der planmäßig vorgesehene Anschlußzug innerhalb der Mindestumsteigezeit nicht mehr erreicht werden kann. Es kann im Rahmen des Bahnbetriebes in solchen Fällen entschieden werden, daß die Abfahrt des Anschlußzuges über den Zeitpunkt der frühestmöglichen Abfahrt hinaus absichtlich verzögert wird, um auch bei Ankunftsverspätungen Anschlüsse zu gewährleisten. Diese Verzögerung der Abfahrt über den frühestmöglichen Zeitpunkt hinaus wird *außerplanmäßige Synchronzeit* genannt. Die Gewährung einer außerplanmäßigen Synchronzeit führt dann bei diesem Anschlußzug zu einer synchronisationsbedingten Abfahrtsverspätung.

Die außerplanmäßige Synchronzeit wird nach Möglichkeit so groß bemessen, daß ein Anschluß noch möglich ist. Es gibt allerdings für die außerplanmäßige Synchronzeit eine obere Schranke, die maximale außerplanmäßige Synchronzeit. Hinsichtlich des Zeitpunktes, ab dem die außerplanmäßige Synchronzeit zählt, gibt es zwei verschiedene Möglichkeiten: Bei einer *relativen Wartestrategie* wird eine maximale außerplanmäßige Synchronzeit bezogen auf die frühestmögliche Abfahrtszeit vorgegeben. Der frühestmögliche Abfahrtszeitpunkt liegt um die Dauer der Mindesthaltezeit nach der tatsächlichen Ankunftszeit, frühestens ist dies der Zeitpunkt der planmäßigen Abfahrt. Bei einer *absoluten Wartestrategie* wird hingegen eine maximale außerplanmäßige Synchronzeit bezogen auf die planmäßige Abfahrtszeit vorgegeben.³⁰ In dieser Arbeit werden die außerplanmäßigen Synchronzeiten ausschließlich im Sinne einer relativen Wartestrategie betrachtet.

Kommt es bei Verspätungen zusätzlich zu (außerplanmäßigen) Belegungskonflikten auf einem Streckenabschnitt, kann dies zusätzlich zu *außerplanmäßigen Wartezeiten* führen.³¹

²⁹Vgl. [Sch94, S. 99]

³⁰Vgl. [Deu95c, S. 2f.] und [Men91]

³¹Entsprechend zur planmäßigen Wartezeit in Abbildung 2.2 auf Seite 14

Es kann darüber hinaus zu weiteren (außerplanmäßigen) Abfahrtverzögerungen kommen, die ihre Ursache weder in außerplanmäßigen Synchronzeiten noch in außerplanmäßigen Wartezeiten haben. Solche zusätzlichen Abfahrtverzögerungen treten beispielsweise auf, wenn während des Haltes eine Störung an den Gleis- und Signalanlagen oder am Triebfahrzeug auftritt, die die Abfahrt zum beabsichtigten Zeitpunkt unmöglich macht.

Die Mindesthaltezeit, außerplanmäßige Synchronzeiten, außerplanmäßige Wartezeiten und sonstige zusätzliche Abfahrtverzögerungen ergeben zusammen die *realisierte Haltezeit*. Die realisierte Beförderungszeit setzt sich dann zusammen aus den realisierten Fahrzeiten und den realisierten Haltezeiten.

In Abgrenzung zum Soll-Fahrplan werden die tatsächlichen Abfahrts-, Ankunfts- und Durchfahrtszeiten eines oder mehrerer Züge mit *Ist-Fahrplan* bezeichnet.

Der Umfang der außerplanmäßigen Synchronzeiten wird in der bahnbetrieblichen Praxis häufig zuggattungsbezogen durch entsprechende Vorschriften geregelt. Im Bereich der Deutschen Bahn AG erfolgt dies beispielsweise in [Deu95c]. Dort wird der Wartezeitbegriff jedoch abweichend verwendet: Im Sinne dieser Vorschrift wird unter *Wartezeit* die synchronisationsbedingt zu vertretende maximale Abfahrtverspätung eines Anschlußzuges verstanden. Diese Wartezeit beginnt mit der planmäßigen Abfahrtszeit des wartenden Zuges, und sie endet mit seiner Abfahrt.³² Die Wartezeitvorschriften sind Teil der Fahrplanvorschriften. Die Wartezeiten, wie sie in den Wartezeitvorschriften geregelt sind, heißen *Regelwartezeiten*. Sie dürfen nur unter besonderen Bedingungen und auf besondere Anordnung überschritten werden. Somit werden in den Wartezeitvorschriften die Zeitpunkte der spätesten Abfahrt eines Zuges bezogen auf seine planmäßige Abfahrtszeit vorgegeben. Die Regelwartezeiten der Deutschen Bahn AG zeigt beispielhaft Tabelle 2.2. Die Abkürzungen der Zuggattungen bei der Deutschen Bahn AG sind den

Es warten	auf			
	ICE, IC, EC, IR, best. D	EN, ICN, best. D	S	übrige Züge
ICE, IC, EC, IR, best. D	5	–	–	–
EN, ICN, best. D	10	5	–	5
S	–	–	–	–
übrige Züge	5	5	–	5

Tabelle 2.2.: Regelwartezeiten (in Minuten) bei der Deutschen Bahn AG

Tabellen A.2.1 und A.2.2 auf den Seiten 184 und 185 zu entnehmen. Der Wartezeitbegriff der Deutschen Bahn AG im Sinne der Wartezeitvorschriften aus [Deu95c] findet in dieser Arbeit keine Anwendung. Seine Verwendung würde zu Verwechslungen mit Wartezeiten aufgrund belastungsbedingter Gleisbelegungskonflikte führen.

³²Vgl. [Deu95c, S. 2f.] und [Adl90, S. 864].

3. Problemstellung

3.1. Reisezeitoptimierung als Teil der Verkehrsplanung

Grundsätzlich unterliegt das Verkehrsgeschehen im schienengebundenen öffentlichen Verkehr einem Planungsprozeß. Diese Verkehrsplanung erfolgt mit der Absicht, bestimmte Ziele zu erreichen. Ein mögliches Ziel der Verkehrsplanung ist es, die Reisezeiten nach bestimmten Gesichtspunkten zu optimieren. Hierbei können einzelne Reisen, aber auch die Gesamtheit von Reisen, die in einem bestimmten Zeitraum in einem Liniennetz durchgeführt werden, betrachtet werden. Ein mögliches Ziel der Reisezeitoptimierung für diesen Betrachtungsgegenstand ist die Minimierung der Reisezeit. Ein anderes Optimierungsziel ist es, die zeitlichen Abweichungen tatsächlich durchgeführter Reisen von den geltenden Soll-Fahrplänen zu minimieren, indem beispielsweise die Auswirkungen von Verspätungen auf die Reisezeiten möglichst gering gehalten werden. Dieser Zielsetzung ist die vorliegende Arbeit gewidmet. Dabei wird eine Gesamtheit von Reisen betrachtet, die in einem bestimmten Zeitraum in einem Liniennetz durchgeführt werden.

Der Prozeß der Verkehrsplanung wird häufig als hierarchisch angesehen. Den schematischen Ablauf einer hierarchischen Verkehrsplanung zeigt Abbildung 3.1.¹ Im schienengebundenen öffentlichen Verkehr geht eine solche hierarchische Verkehrsplanung von einer *Verkehrsnachfrage* aus, d.h. einer Nachfrage nach Beförderungsleistung zwischen mehreren Orten. Die Daten der Verkehrsnachfrage können entweder durch Zählungen oder durch Prognoseverfahren erhoben werden.

Darauf aufbauend erfolgt im Rahmen der *Angebotsdefinition* eine Konzeption eines Angebotes an Beförderungsleistung. Dies schließt Überlegungen zur Gestaltung des Streckennetzes und zum Angebot bestimmter Zuggattungen ein. Jede Zuggattung stellt dabei eine Ausprägung des Beförderungsangebotes und damit ein Produkt eines Eisenbahnunternehmens dar. Ist ein derartiges Angebot grundsätzlich definiert und liegt ein Streckennetz fest, wird im Rahmen der *Netzstrukturplanung* beispielsweise bestimmt, an welchen Bahnhöfen die Züge der einzelnen Zuggattungen halten sollen und wo Umsteigemöglichkeiten zwischen verschiedenen Zuggattungen bestehen sollen.

Unter Berücksichtigung der Daten der Verkehrsnachfrage erfolgt die *Linienplanung*, d.h. es werden für die Zuggattungen die Linienführungen nach örtlichen Gesichtspunkten ge-

¹Darstellung entnommen aus [Bus95, S. 3]

3. Problemstellung

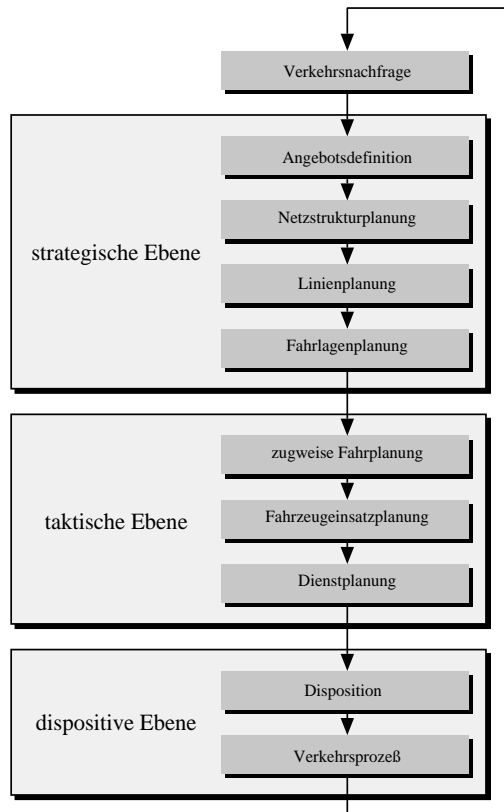


Abbildung 3.1.: Ablauf einer hierarchischen Verkehrsplanung

plant. Daraus resultieren die jeweiligen Liniennetze für die Zuggattungen. Darauf aufbauend werden die Soll-Fahrpläne, die auf den Linien gelten sollen, geplant. Die entsprechende Festlegung der Abfahrts-, Durchfahrts- und Ankunftszeiten für die Bahnhöfe jeder Linie erfolgt im Rahmen der *Fahrlagenplanung*². Sie ist eng mit der Linienplanung verknüpft. Die Fahrlagenplanung schließt Überlegungen zur Gestaltung eines (integralen) Taktfahrplanes ein. Ergebnis der Fahrlagenplanung sind linienbezogene Soll-Fahrpläne. Eisenbahnbetriebliche Erfordernisse werden bei der *zugweisen Fahrplanung* berücksichtigt. Dies erfordert u.a. die Planung der Zugkreuzungen³, der Bahnsteigbelegungen in Bahnhöfen und die Festlegung des zeitlichen und räumlichen Mindestabstandes, mit dem Züge einander auf Strecken folgen dürfen (Mindestzugfolgezeit).

Bei der *Fahrzeugeinsatzplanung* wird eine Zuordnung der Triebfahrzeuge und Wagen zu einzelnen Zugfahrten vorgenommen. Die *Dienstplanung* legt zeitlich und örtlich den Einsatz des Personals auf Bahnhöfen, in Zügen und in Betriebsstellen (z.B. in Stellwerken, an Bahnübergängen) an Strecken fest.

Auf der dispositiven Ebene sind alle Planungen und Entscheidungen anzusiedeln, die das Ziel haben, laufend einen reibungsarmen Eisenbahnbetrieb sicherzustellen.

Diese Planungsstufen ermöglichen schließlich die Befriedigung der Verkehrsnachfrage. Sie erscheint in Form der tatsächlich auftretenden Verkehrsprozesse (z.B. durchgeführte Reisen). Erfahrungen aus den in der Vergangenheit abgelaufenen Verkehrsprozessen bestimmen u.a. wiederum die zukünftige Verkehrsnachfrage, so daß hier eine Rückkopplung des Verkehrsplanungsprozesses erfolgt.

Der Verkehrsprozeß kann als „Verkehrsmarkt“ interpretiert werden.⁴ In diesem Sinne und bezogen auf den Gegenstand dieser Arbeit kann unter einem Verkehrsmarkt derjenige ökonomische Ort verstanden werden, an dem Eisenbahnverkehrsleistungen gegen Geldleistungen ausgetauscht werden.

Für die Durchführung des Eisenbahnverkehrs stellen Eisenbahninfrastrukturunternehmen ein entsprechendes Streckennetz und Bahnhöfe bereit. Auf dieser Grundlage erfolgt durch die Eisenbahnverkehrsunternehmen als Anbieter von Beförderungsleistungen die Planung der Soll-Fahrpläne und der Linien.⁵ Aus der Sicht der Reisenden als Nachfrager der Beförderungsleistungen repräsentieren die Soll-Fahrpläne das wesentliche Produkt eines Eisenbahnverkehrsunternehmens, sie bilden gleichsam eine Brücke zwischen Angebots- und Nachfrageseite⁶. Die Verkehrsnachfrage wird nur zu den Zeitpunkten und an den Orten befriedigt, die in den Soll-Fahrplänen angegeben sind.

²Unter einer *Fahrlage* ist die zeitliche Lage einer Zugfahrt zu verstehen.

³Eine Zugkreuzung ist ein eisenbahnbetrieblicher Vorgang, bei dem zwei auf eingleisiger Strecke in entgegengesetzter Richtung fahrende Züge einander ausweichen. Dabei muß einer der beteiligten Züge in einem Bahnhof halten (stehende Kreuzung). Vgl. dazu [Adl90, S. 460]

⁴Vgl. die umfassenden Ausführungen zu Begriff und Eigenschaften des Verkehrsmarktes in [Voi73, S. 235 ff.]

⁵Als Oberbegriff für Eisenbahninfrastrukturunternehmen und Eisenbahnverkehrsunternehmen wird der Begriff Eisenbahnunternehmen oder kurz: Eisenbahnen verwendet. Vgl. dazu [AEG93, S. 1]

⁶Vgl. [Göb93, S. 358]

Ein Soll-Fahrplan stellt für beide Seiten ferner eine wichtige Planungs- und Entscheidungsgrundlage dar: Durch Fahrpläne für den öffentlichen Gebrauch werden Reisende in die Lage versetzt, die Zeitpunkte und Orte des Beginns, des Endes und des Verlaufes einer Reise vorab bestimmen zu können. Somit können Planung und Durchführung einer Reise an den individuellen Erfordernissen und Vorlieben der Reisenden ausgerichtet werden, Reisende können für ihre Reisen einen Reisefahrplan festlegen.

Die Eisenbahnverkehrsunternehmen müssen auf Basis der Soll-Fahrpläne unter anderem den Fahrzeug- und Personaleinsatz sowie Maßnahmen der Betriebsführung und der Betriebsüberwachung in entsprechende Entscheidungen umsetzen, die die Realisierung des Soll-Fahrplanes in Form eines Angebotes an Beförderungsleistung als Ziel haben.⁷

Reisende und Eisenbahnverkehrsunternehmen haben hinsichtlich einer Gestaltung der Soll-Fahrpläne unterschiedliche Zielvorstellungen: So wünschen Reisende

- möglichst kurze Beförderungszeiten, z.B. durch
 - kurze Fahrzeiten, die durch optimal ausgebaute Strecken und schnelle Fahrzeuge erzielt werden,
 - Linien, die auf kürzesten Wegen geführt werden,
 - eine möglichst geringe Anzahl von Umsteigevorgängen,
 - einen integrierten Taktfahrplan, der verzugarmes Umsteigen ermöglicht,
 - eine optimale Abstimmung der Anschlüsse, falls ein Umsteigen erforderlich ist.

- Soll-Fahrpläne mit möglichst gleichbleibenden und kleinen Taktzeiten.

Eisenbahnunternehmen stellen Wirtschaftlichkeitsforderungen, die sich beispielsweise in der Zielvorstellung einer Deckung der Verkehrsnachfrage auf einem gegebenen Streckennetz mit geringstmöglichem baulichen und betrieblichen Aufwand konkretisieren.⁸

Ein Soll-Fahrplan wird in der Praxis so geplant, daß diese beiden Zielvorstellungen in ihm Berücksichtigung finden.

Die Umsetzung des Soll-Fahrplanes in Zugfahrten unterliegt verschiedenen Einflüssen, deren Eintrittszeitpunkte, Dauern und Auswirkungen meist nicht vorhergesehen werden können. So können z.B. Witterungseinflüsse, der technische Zustand der Fahrzeuge und der Eisenbahninfrastruktur, die Verfügbarkeit des Personals sowie technische und menschliche Eingriffe in den Betriebsablauf dazu führen, daß die zeitlichen Vorgaben der Soll-Fahrpläne und damit der Reisefahrpläne nicht mehr eingehalten werden können. Es können als Folge solcher Zufallseinflüsse Verspätungen von nicht vorbestimmbarer Dauer auftreten. Müssen Reisende umsteigen, ist die Betrachtung von Anschlußbindungen (eine Anschlußbindung ist ein bindender Zusammenhang zwischen zwei Zugfahrten zur

⁷Vgl. zum Zweck der Fahrpläne [Bön84, S. 81ff.], [Deu44], [LOBW84]

⁸Vgl. [Weg74, S. 4f.]

Gewährleistung von Anschlüssen) von besonderer Bedeutung. Die wichtigsten Faktoren, die die fahrplantechnische Bindung des Anschlusses bestimmen, sind in Tabelle 3.1 dargestellt. Es ist Ausdruck der Kundenorientierung, an Umsteigebahnhöfen (Bezugsort der Anschlußbindung) zeitlich günstige Möglichkeiten für das Umsteigen von einem Zug z_1 auf einen Zug z_2 vorzusehen. Dabei muß berücksichtigt werden, daß die zum Umsteigen vorhandene Zeit (Bindungszeit bei der Anschlußbindung) einer Bedingung derart genügt, daß die Differenz aus der tatsächlichen Abfahrtszeit eines Anschlußzuges z_2 (Bezugszeit z_2) und der tatsächlichen Ankunftszeit des Zubringerzuges z_1 (Bezugszeit z_1) mindestens so groß ist, wie die zum Umsteigen am Bezugsort benötigte Mindestumsteigezeit (Mindestbindungszeit). Wird diese zeitliche Bedingung für einen Anschluß aufgrund von Verspätungen verletzt, kommt es zu einem Anschlußkonflikt. Zur Lösung dieses Anschlußkonfliktes gibt es entweder die Möglichkeit, den Anschluß aufzugeben oder die Abfahrt des Anschlußzuges durch eine außerplanmäßige Synchronzeit solange zu verzögern, bis die zeitliche Bedingung wieder erfüllt ist. Verspätungen einzelner Zugfahrten können also dazu führen, daß Reisende ihre Anschlüsse an Umsteigebahnhöfen nicht mehr erreichen. Wenn ursprünglich geplante Anschlüsse aufgrund von Verspätungen aufgegeben werden müssen, kann dies zu deutlich höheren Umsteigezeiten, als planmäßig im Reisefahrplan⁹ vorgesehen, führen. Insbesondere auf Linien mit großen Taktzeiten (z.B. 60 Minuten und länger) hat dies in der Regel eine deutliche Verlängerung der Reisezeit zur Folge. Die Zielvorstellung der möglichst kurzen Reisezeiten wird nur noch suboptimal verwirklicht (siehe auch Tabelle 3.1). Eisenbahnverkehrsunternehmen müssen nun unter Berücksichtigung dieser eingetretenen Abweichungen vom Soll-Fahrplan ihre Planungen auf der dispositiven Ebene fortschreiben und erneute Entscheidungen treffen. Solche Maßnahmen der Eisenbahnverkehrsunternehmen haben dabei auch Einfluß auf die Planungen und Entscheidungen der Reisenden.¹⁰

Abweichungen vom Reisefahrplan stellen für die Reisenden eine Verschlechterung dar, wenn sich durch Verspätungen die Reisezeit erhöht. In diesem Falle wird es das Bestreben der Reisenden sein, die Abweichung zwischen der im Reisefahrplan geplanten Beförderungszeit und der realisierten Beförderungszeit zu minimieren.

3.2. Zielsetzung dieser Arbeit

In dieser Arbeit soll der Zusammenhang zwischen den Beförderungszeiten und ihren Komponenten (Fahrzeiten, Haltezeiten, Umsteigezeiten) in einem realitätsnahen Modell eines Eisenbahn-Liniennetzes näher untersucht werden. Zufallseinflüsse mit ihren Auswirkungen auf Fahr-, Halte-, Umsteige- und damit Beförderungszeiten sollen dabei berücksichtigt werden. Gegenstand der Betrachtung sind Reisen, bei denen Zuggattungen des Nahverkehrs und des Fernverkehrs benutzt werden können. Die Nutzung der Zuggattungen des Nahverkehrs in der Funktion als Zubringer und Abbrin-

⁹Ein *Reisefahrplan* ist ein Soll-Fahrplan für eine Reise.

¹⁰Vgl. [Car94, S. 51f.]

Anschlußbindung

Ursache:	Kundenorientierung
Zweck:	Kunden können von einem Zug z_1 auf einen Zug z_2 umsteigen
Bezugsort:	Umsteigebahnhöfe
Bezugszeit z_1:	Ankunftszeit am Umsteigebahnhof s : $t_{An,z_1,s}$
Bezugszeit z_2:	Abfahrtszeit am Umsteigebahnhof s : $t_{Ab,z_2,s}$
Bindungszeit:	Umsteigezeit: $t_{Um,s} = t_{Ab,z_2,s} - t_{An,z_1,s}$
Mindestbindungszeit:	Mindestübergangszeit $T_{MÜZ,s}$
Zeitliche Bedingung:	$t_{Um,s} \geq T_{MÜZ,s}$
mögliche Konfliktlösungen bei An- kunftsverspätung des zubringenden Zu- ges:	Der Anschluß von z_1 an z_2 wird aufgege- ben oder $t_{Ab,z_2,s}$ wird später gelegt, indem z_2 in s eine außerplanmäßige Synchronzeit eingeräumt wird.

Tabelle 3.1.: Die fahrplantechnische Bindung des Anschlusses

ger zu Zuggattungen des Fernverkehrs und die entsprechenden Anschlüsse soll in dem Eisenbahn-Liniennetz Berücksichtigung finden. Entfernungen zwischen verschiedenen Mittel- bzw. Oberzentren¹¹ werden mit Zuggattungen des Fernverkehrs zurückgelegt. Gegeben ist dazu ein Liniennetz mit Linien des Nah- und des Fernverkehrs. In diesem Liniennetz existieren mehrere Bahnhofsarten: Anfangs-, End- und Umsteigebahnhöfe. An Anfangsbahnhöfen beginnen Linien, an Endbahnhöfen enden Linien, Umsteigebahnhöfe gestatten ein Umsteigen von Linien des Nahverkehrs auf Linien des Fernverkehrs und umgekehrt sowie ein Umsteigen zwischen verschiedenen Fernverkehrs- und Nahverkehrslinien untereinander. Ein Umsteigebahnhof kann gleichzeitig auch Anfangs- bzw. Endbahnhof sein.

Gegeben sind ferner Soll-Fahrpläne für Zugfahrten aller Linien. Diese Soll-Fahrpläne sind so aufeinander abgestimmt, daß im betrachteten Liniennetz ein integrierter Taktfahrplan vorliegt. Die Soll-Fahrpläne seien bereits hinsichtlich möglichst geringer planmäßiger Beförderungszeiten optimiert. Die dazu notwendigen Fahrzeugumläufe und der Personaleinsatz im Eisenbahnunternehmen werden als gegeben angenommen und sollen keine entscheidungsrelevanten Größen darstellen.

In diesem Liniennetz gebe es Reisende, die von einem gegebenen Startbahnhof bis zu einem anderen Bahnhof dieser Linie fahren wollen, um dort die Reise zu beenden oder auf eine andere Linie umzusteigen. Die Anzahl dieser Reisenden und der Anteil der Reisen-

¹¹Vgl. zum Raumordnungsbegriff des Zentrums [LWV79, S. 67ff.] und S. 5 dieser Arbeit

den, die auf andere Linien umsteigen wollen, seien bekannt und gegeben. Diese Größen können z.B. bei der Ermittlung der Verkehrsnachfrage im Rahmen der hierarchischen Verkehrsplanung¹² festgestellt werden oder durch Auswertung von Buchungsdaten elektronischer Reservierungs- und Fahrscheinverkaufssysteme bestimmt werden, bevor die Reisen tatsächlich durchgeführt werden.

Es wird angenommen, daß bei der Umsetzung der Soll-Fahrpläne in Zugfahrten Verspätungen auftreten, die Einfluß auf die Ankunftszeiten der Zugfahrten an den Haltebahnhöfen haben. Handelt es sich um Umsteigebahnhöfe, so haben Verspätungen von dort eintreffenden Zugfahrten Auswirkungen auf die tatsächlichen Umsteigezeiten, die Reisenden zur Verfügung stehen, um Anschlußzüge zu erreichen. Das Erreichen bzw. Nichterreichen eines Anschlußzuges hat wiederum Auswirkungen auf die realisierten Beförderungszeiten im Liniennetz.

Die Darstellung des Liniennetzes und der darin durchgeführten Reisen erfolgt mit Hilfe der Graphentheorie. Anhand des so modellierten Liniennetzes soll das Geschehen in einem Eisenbahn-Liniennetz, in dem alle Linien nach einem Taktfahrplan verkehren, realitätsnah simuliert werden. Insbesondere sollen zufällige Einflüsse, die Auswirkungen auf Fahr-, Umsteige- und Reisezeiten haben, mittels einer Simulation erfaßt und ausgewertet werden.

Von zentraler Bedeutung dabei ist die Betrachtung der außerplanmäßigen Synchronzeiten. Es lassen sich grundsätzlich folgende Regelungen unterscheiden:

- Anschlußzügen wird grundsätzlich keine außerplanmäßige Synchronzeit eingeräumt,
- für alle Zuggattungen werden gleiche Obergrenzen für außerplanmäßige Synchronzeiten festgelegt, die nicht überschritten werden sollen,
- es werden zuggattungsabhängig unterschiedliche Obergrenzen für außerplanmäßige Synchronzeiten festgelegt, die nicht überschritten werden sollen.

Alle drei Möglichkeiten werden in dieser Arbeit in Betracht gezogen. Als weitere Möglichkeit ist denkbar, daß die außerplanmäßige Synchronzeit vollständig variabel ist, d.h. Anschlußzüge in jedem Fall so lange warten, wie es erforderlich ist, um Anschlüsse zu gewährleisten. Dieser Fall wird nicht in Betracht gezogen, denn dies würde bedeuten, daß sich Verspätungen der Zubringerzüge immer in vollem Umfang auf Anschlußzüge übertragen. In einem Liniennetz mit vielen Umsteigebahnhöfen würde das Fahrplangefüge dadurch schnell durcheinandergeraten. Eine derartige Option würde der grundsätzlichen Zielsetzung der Eisenbahnverkehrsunternehmen und der Gesamtheit der Reisenden zuwiderlaufen, die Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Fahrplänen möglichst gering zu halten.

Gesucht sind optimale Regelungen und zeitliche Obergrenzen für außerplanmäßige Synchronzeiten in dem Sinne, daß in einem Eisenbahn-Liniennetz unter Berücksichtigung

¹²Vgl. dazu Abschnitt 3.1 dieser Arbeit

3. Problemstellung

auftretender Verspätungen die Abweichung zwischen dem netzweiten *planmäßigen Gesamtbeförderungszeitvolumen*¹³ und dem netzweiten *realisierten Gesamtbeförderungszeitvolumen*¹⁴ nicht über eine bestimmte Grenze hinaus ansteigt bzw. der Pünktlichkeitsgrad nicht unter eine bestimmte Grenze abfällt. Es wird dazu die Anwendung der genannten Regelungen mit unterschiedlichen zeitlichen Obergrenzen und unter verschiedenen mittleren Zuwachsverspätungen simuliert und die jeweiligen Auswirkungen auf die Beförderungszeit und ihre Komponenten (Fahrzeiten, Haltezeiten, Umsteigezeiten) sowie den Pünktlichkeitsgrad untersucht. Kriterien sind dabei nicht die zeitlichen Auswirkungen auf einzelne Reisen, sondern die zeitlichen Auswirkungen auf die Gesamtheit der in einem bestimmten Zeitraum im Liniennetz durchgeführten Reisen.

Diese Problemstellung kann als Teilproblem der Fahrplanoptimierung angesehen werden, da Synchronzeitregelungen Teil der Fahrplanvorschriften sind. Probleme der Soll-Fahrplanerstellung und der Fahrplanoptimierung sind auf der strategischen Ebene der Verkehrsplanung angesiedelt. Damit ist das Auffinden optimaler Synchronzeiten ein Problem der strategischen Verkehrsplanung. Die Anwendung der Regelungen für die Gewährung außerplanmäßiger Synchronzeiten fällt in die dispositive Ebene der Verkehrsplanung. Dabei kann die Anwendung einer Regelung, die netzweit günstige Auswirkungen auf das Beförderungszeitvolumen und den Pünktlichkeitsgrad hat, dennoch bei einzelnen Reisen durchaus zu suboptimalen Reisezeiten führen. Da für diese Arbeit jedoch die Leistungsfähigkeit des gesamten Liniennetzes von vorrangiger Bedeutung ist, soll dieser mögliche Zielkonflikt hier vernachlässigt werden.

¹³Produkt aus der planmäßigen Beförderungszeit und der Anzahl der in einem bestimmten Zeitraum im gesamten Netz beförderten Reisenden

¹⁴Produkt aus der realisierten Beförderungszeit und der Anzahl der in einem bestimmten Zeitraum im gesamten Netz beförderten Reisenden

4. Überblick über verwandte Lösungsansätze

Die folgende Darstellung verwandter Lösungsansätze bezieht sich auf die in Kapitel 3 gezeigte Problemstellung. Dazu wird zunächst am Beispiel der Deutschen Bahn AG (DB AG) geschildert, auf welche Weise die Bahnbetriebssteuerung in der Praxis erfolgt. Anschließend wird ein Überblick ausgewählter Veröffentlichungen zu verwandten Problemstellungen gegeben.

4.1. Reisezeitoptimierung in der Praxis der Bahnbetriebssteuerung

Die laufende Gewährleistung eines reibungsarmen Eisenbahnbetriebes durch geeignete Steuerungsmaßnahmen (Bahnbetriebssteuerung) ist auf der dispositiven Ebene der Verkehrsplanung angesiedelt.¹ In der Praxis der Bahnbetriebssteuerung bei der DB AG werden unter anderem Bildfahrpläne² verwendet, und es bestehen Betriebsdienstvorschriften, die die Gewährung von außerplanmäßigen Synchronzeiten regeln. Dispositive Maßnahmen im Eisenbahnverkehr, die grundsätzlich geeignet sind, die Beförderungszeiten auf einer Strecke unter Berücksichtigung möglicher Verspätungen zu optimieren, d.h. Abweichungen von den Soll-Fahrplänen zu minimieren, werden durch das Personal der Betriebssteuerung auf Basis dieser Organisationsmittel getroffen.

4.1.1. Bildfahrpläne

Der Bildfahrplan gehört zu den Dienstfahrplänen. Er enthält unter anderem in einem Weg-Zeit-Diagramm alle auf einer entsprechenden Strecke innerhalb von 24 Stunden verkehrenden Reise- und Güterzüge. Ihm ist der gesamte Zugverkehr einer Strecke zu entnehmen. Es ist daher aus dem Bildfahrplan unter anderem ersichtlich, welchen Einfluß verspätungsbedingte Verlegungen vorhandener Zugfahrten auf die übrigen Zugfahrten der Strecke und auf Anschlüsse auf Zugfahrten anderer Strecken haben.

¹Vgl. Abbildung 3.1 auf Seite 20

²Vgl. zu Zweck und Aufbau des Bildfahrplanes u.a. [LOBW84, S. 45-68]

4.1.1.1. Aufbau des Bildfahrplanes

Der Bildfahrplan besteht aus einer Menge von Bildfahrplanblättern. Ein Bildfahrplanblatt ist dabei einer bestimmten Strecke oder einem bestimmten Streckenabschnitt zugeordnet. Das Bildfahrplanblatt besteht aus dem *Bildfahrplankopf* und dem *Bildfahrplannetz*. Der Bildfahrplankopf enthält detaillierte Informationen über die Bedeutung der Strecke (Hauptbahn- oder Nebenbahnstrecke), über Streckenhöchstgeschwindigkeiten und Bremswege sowie über Lage und Bezeichnung der Eisenbahninfrastruktur und Betriebsstellen entlang der Strecke. Der Bildfahrplankopf wird hier nicht weiter betrachtet. Ein Beispiel für einen Ausschnitt eines Bildfahrplannetzes zeigt Abbildung 4.1.

Im Bildfahrplannetz ist ausgehend von der linken oberen Ecke des Weg-Zeit-Diagrammes auf der Senkrechten die Zeit abgetragen. Auf der Waagerechten sind maßstäblich die Entfernungen und die Bezeichnungen der auf der Strecke befindlichen *Betriebsstellen* abgetragen. Betriebsstellen können Bahnhöfe, *Blockstellen*³, *Abzweigstellen*⁴, *Anschlußstellen*⁵, *Haltepunkte*⁶ und *Haltestellen*⁷ sein. Die Zeit ist in Intervallen von zehn Minuten eingetragen. Durch diese Orts- und Zeitpunkte sind senkrechte und waagerechte Weglinien bzw. Zeitlinien gezogen. Zeitlinien zu vollen Stunden und zu wichtigen Bahnhöfen, insbesondere zu solchen, auf denen Strecken abzweigen, sind stärker ausgezeichnet. Links und rechts der senkrechten Außenlinien des Diagrammes stehen die Stundenzahlen.

Zur Darstellung einer Zugfahrt im Bildfahrplannetz werden auf den senkrechten Weglinien die geplanten Ankunfts-, Abfahrts- oder Durchfahrtszeiten des betreffenden Zuges vermerkt. Diese Abfahrts- oder Durchfahrtszeit eines Zuges an einem Ort wird mit der Ankunfts- oder Durchfahrtszeit des Zuges an einem anderen Ort verbunden. Diese Abbildung einer Zugfahrt wird Zeit-Weg-Linie oder Zuglinie genannt. Die Zeit-Weg-Linie gibt senkrecht die für eine Zugfahrt benötigte Zeit und waagerecht den in dieser Zeit zurückgelegten Weg an. Je nachdem, ob ein Zuglauf von einem Ort *A* zu einem Ort *B* oder umgekehrt erfolgt, verläuft die Zeit-Weg-Linie fallend oder steigend. Eine durchgezogene Zeit-Weg-Linie zeigt eine Durchfahrt eines Zuges ohne oder nur mit kurzem Halt (Haltezeit nicht länger als 2 Minuten) an. Bei längeren Halten ist die Zeit-Weg-Linie am entsprechenden Ort unterbrochen.

Die Zahlen am Schnittpunkt der Zeit-Weg-Linien der Zugfahrten mit den Weglinien be-

³Blockstellen sind Bahnanlagen, die einen Streckenabschnitt begrenzen, in den ein Zug nur dann einfahren darf, wenn er frei von Fahrzeugen ist. Solche Streckenabschnitte heißen *Blockstrecken*. Vgl. dazu [EBO67, §§ 4(3), 4(4)]

⁴Abzweigstellen sind Blockstellen auf der freien Strecke (außerhalb von Bahnhöfen), an denen Züge von einer auf eine andere Strecke übergehen können

⁵„Anschlußstellen sind Bahnanlagen der freien Strecke, wo Züge ein angeschlossenes Gleis als Rangierfahrt befahren können, ohne daß die Blockstrecke für einen anderen Zug freigegeben wird.“[EBO67, § 4(7)]

⁶„Haltepunkte sind Bahnanlagen ohne Weichen, wo Züge planmäßig halten, beginnen oder enden dürfen.“[EBO67, § 4(8)]

⁷„Haltestellen sind Abzweigstellen oder Anschlußstellen, die mit einem Haltepunkt örtlich verbunden sind.“[EBO67, § 4(9)]

4. Überblick über verwandte Lösungsansätze

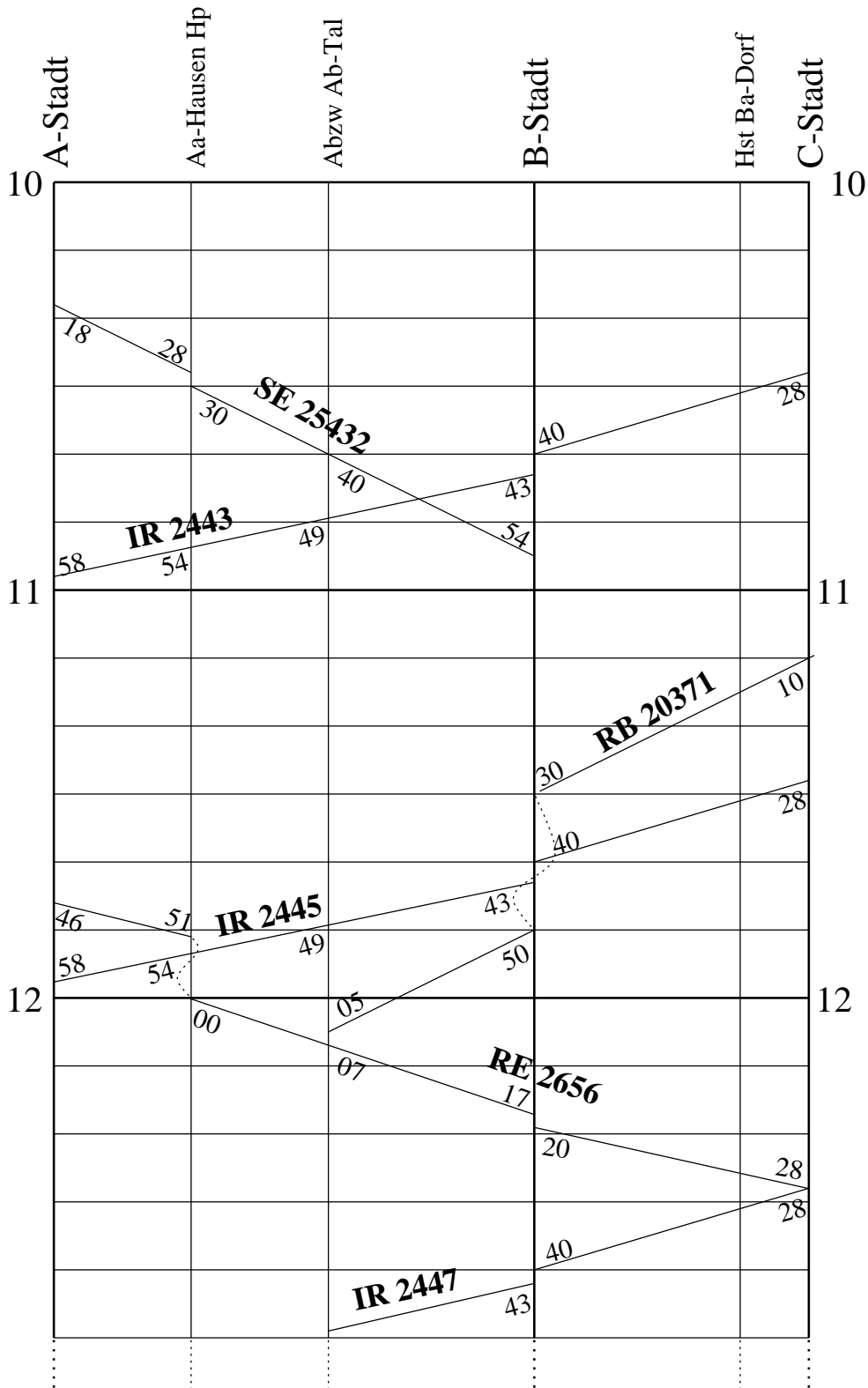


Abbildung 4.1.: Ausschnitt des Bildfahrplannetzes einer Strecke

zeichnen in Richtung der Zugfahrt die Ankunftszeiten (vor der Weglinie und über der Zeit-Weg-Linie) sowie die Abfahrts- und Durchfahrtszeiten (hinter der Weglinie und unter der Zeit-Weg-Linie). Diese Angaben können, wie in Abbildung 4.1 an der Haltestelle Ba-Dorf, aus Platzgründen teilweise weggelassen werden. Bei längeren Halten an einem Ort kann eine gestrichelte, gebogene Linie die Ankunfts- und Abfahrtszeitschnittpunkte miteinander verbinden.

Die Zugnummer ist oberhalb der Zeit-Weg-Linie angegeben. In den Ausführungen dieses Kapitels wird die Zugnummernsystematik der DB AG verwendet.⁸ Der Zugnummer ist die Abkürzung der Zuggattung⁹ vorangestellt. Besondere Zeichen, Zusätze sowie verschiedene Färbungen und Gestaltungen der Zeit-Weg-Linien ermöglichen Unterscheidungen zwischen verschiedenen Zuggattungen und lassen bestimmte Verkehrstage oder Verkehrsbeschränkungen für einzelne Zugfahrten erkennen. Dies ist in Abbildung 4.1 nicht dargestellt.

Neben den Zeit-Weg-Angaben der Zugfahrten können einem Bildfahrplannetz weitere Informationen über die Zugfahrten auf einer Strecke entnommen werden. Im Beispiel der Strecke zwischen A-Stadt und C-Stadt im Zeitraum von 10.00 Uhr bis 12.50 Uhr aus Abbildung 4.1 sind dies folgende Informationen:

- Zwischen der Abzweigstelle Ab-Tal und B-Stadt findet um 10.47 Uhr eine Begegnung von SE 25432 und IR 2443 statt. Unter einer Begegnung ist das Aneinander vorbeifahren zweier in entgegengesetzter Richtung fahrender Züge zu verstehen. Begegnungen sind nur auf mehrgleisigen Strecken möglich.¹⁰
- Im Haltepunkt Aa-Hausen kreuzt IR 2445 den haltenden RE 2656. Beim Vorgang der Kreuzung weicht ein Zug einem anderen, auf demselben Gleis in entgegengesetzter Richtung fahrenden Zug aus, indem einer der beiden Züge auf ein anderes Gleis wechselt.¹¹
- IR 2445 überholt RB 20371 im Bahnhof B-Stadt.
- RB 20371 zweigt an der Abzweigstelle Ab-Tal auf eine andere Strecke ab.
- Die Interregio-Züge von C-Stadt nach A-Stadt verkehren im 60-Minuten-Takt.

Die Darstellung von Anschlüssen im Reisezugverkehr erfolgt abhängig von Anzahl und Ort der abzweigenden Strecken auf drei Arten (vgl. Abbildung 4.2):

1. Zweigt nur eine Strecke ab, werden die Zugfahrten eingezeichnet wie die Zugfahrten Richtung Ca-Heim in Abbildung 4.2 an der Haltestelle Ba-Dorf.

⁸Vgl. dazu [Bön94, S. 107] und [LOBW84, Abschnitt 3.4]

⁹Vgl. dazu Abbildung A.2.1 und A.2.2 auf den Seiten 184 und 185 dieser Arbeit

¹⁰Vgl. [Adl90, S. 92]

¹¹Vgl. [Adl90, S. 462]

2. Wenn mehrere Strecken abzweigen, wird das Weg-Zeit-Diagramm am betreffenden Bahnhof unterbrochen, und die Anschlüsse werden als Einschub dargestellt. Dies zeigt Abbildung 4.2 für den Bahnhof B-Stadt mit abzweigenden Strecken und den Zugfahrten Richtung Bb-Hofen und Bc-Berg.
3. Sollen Anschlüsse an den Enden der dargestellten Strecke im Bildfahrplannetz abgebildet werden, kann ein vereinfachtes Weg-Zeit-Diagramm der Anschlußstrecken angefügt werden. Ein Beispiel zeigt Abbildung 4.2 für die Anschlüsse in C-Stadt aus Richtung D-Stadt.

Die jeweils vollständigen Darstellungen der Anschlußzugfahrten sind den Bildfahrplanblättern der Anschlußstrecken zu entnehmen. Ihr Aufbau entspricht dem der Abbildung 4.1 oder 4.2.

4.1.1.2. Die Anwendung des Bildfahrplanes zur Betriebssteuerung

Die Informationen, die dem Bildfahrplannetz eines Bildfahrplanes zu entnehmen sind, finden Verwendung in der Steuerung des Eisenbahnbetriebes. Wenn Zugverspätungen aufgetreten sind, ist eines der Ziele der Betriebssteuerung, die Auswirkungen solcher Verspätungen auf Zugfahrten möglichst gering zu halten. Dabei sind folgende Bedingungen des Bahnbetriebes zu berücksichtigen:

- Zugfahrten auf gleicher Strecke in gleicher Richtung müssen einen zeitlichen und örtlichen Mindestabstand (*Mindestzugfolgezeit*) haben. Sie dürfen sich nicht zugleich innerhalb derselben Blockstrecke befinden. Dies ist insbesondere von Bedeutung, wenn ein schnellfahrender Zug einem langsamer fahrenden Zug folgen soll.
- Kreuzungen und Überholungen können nur in bestimmten Streckenabschnitten erfolgen. Begegnungen sind nur auf mehrgleisigen Strecken möglich.
- Zugfahrten sollen möglichst ungehindert, d.h. möglichst ohne zusätzliche, außerplanmäßige Halte und mit maximal möglicher Fahrtgeschwindigkeit durchgeführt werden können.
- Eine eventuell vorhandene Rangfolge der Zuggattungen ist zu berücksichtigen.
- Anschlüsse sollen möglichst erreicht werden.

Es ist möglich, aus dem Bildfahrplannetz die Auswirkungen eines verspäteten Zuges auf die übrigen Zugfahrten derselben Strecke und auf Zugfahrten auf Anschlußstrecken abzulesen. Daher ist der Bildfahrplan als wichtiges Organisationsmittel der Betriebssteuerung anzusehen.

Ein Fallbeispiel soll zeigen, wie der Eisenbahnbetrieb unter Verwendung des Bildfahrplanes bei einer Verspätung einer Zugfahrt geregelt werden kann. Hierzu wird angenommen,

4. Überblick über verwandte Lösungsansätze

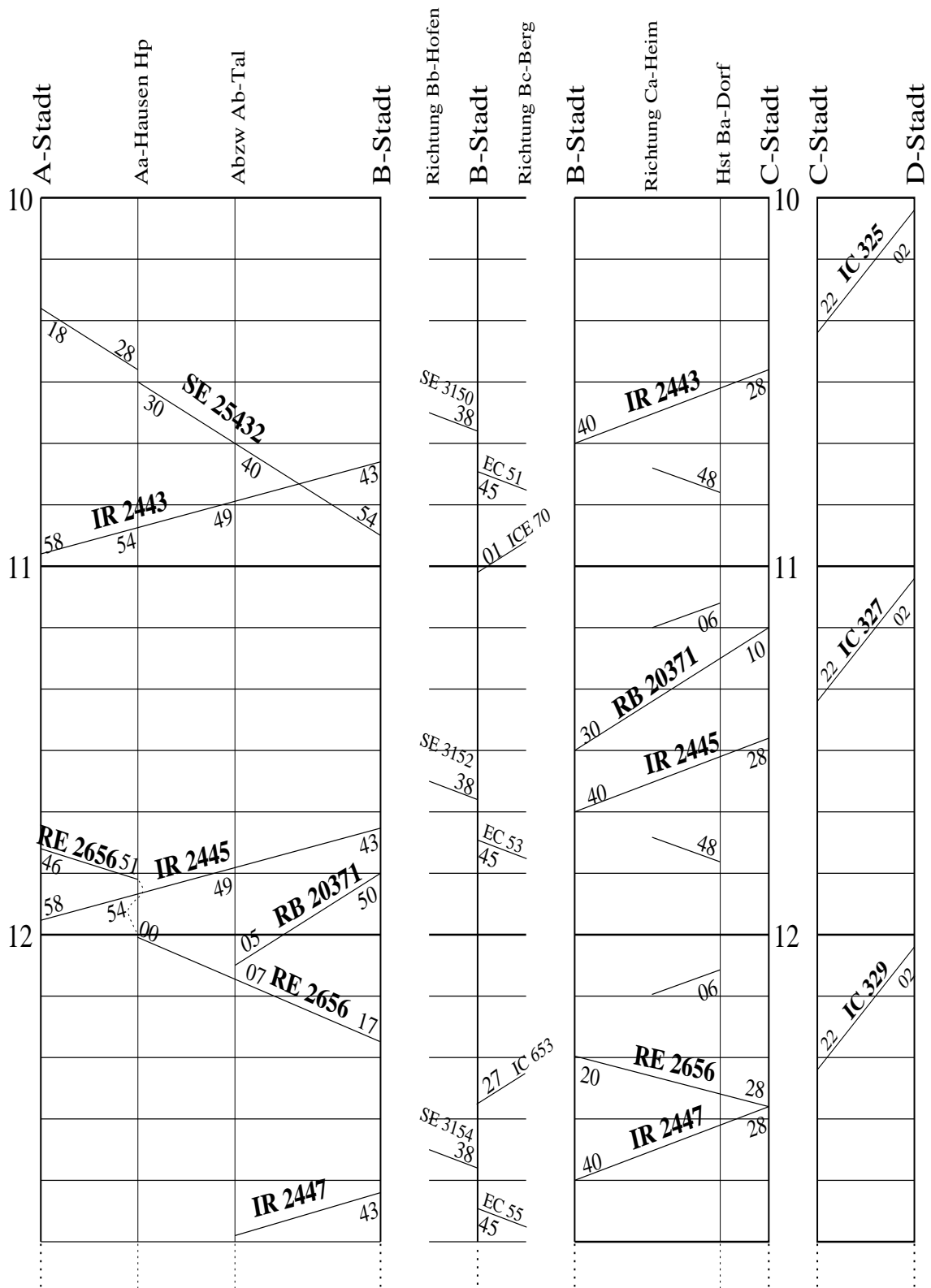


Abbildung 4.2.: Darstellung von Anschlüssen im Bildfahrplannetz

der IR 2445 habe ab C-Stadt eine Abfahrtverspätung von 10 Minuten. Bei der Ankunft in B-Stadt soll er dieselbe Verspätung haben. RB 20371 sei planmäßig. Es sei möglich, den Aufenthalt von IR 2445 in B-Stadt um 2 Minuten zu verkürzen. IR 2445 kann demnach B-Stadt frühestens um 11.51 Uhr verlassen. Aufgabe der Betriebssteuerung ist es nun, die Zugfahrten unter den oben genannten Bedingungen und unter Berücksichtigung dieser Verspätung zu planen und ggf. zeitlich zu verlegen.

Hierzu wird zunächst die aktuelle zeitliche Lage des IR 2445 zwischen C-Stadt und B-Stadt im Bildfahrplannetz visualisiert. Das weitere Vorgehen kann grob in den folgenden Algorithmus gefaßt werden:

1. Lokalisieren der Blockstrecken, bei deren Befahren Konflikte auftreten können.
2. Ermittlung möglicher zeitlicher Verlegungen von Zugfahrten, so daß Konflikte beim Befahren dieser Blockstrecken vermieden werden.
3. Realisierung derjenigen zeitlichen Verlegungen von Zugfahrten, die geringste Folgeverspätungen bewirken. Dabei ist die Rangfolge der einzelnen Zuggattungen zu berücksichtigen.
4. Ermittlung der Anschlüsse, die aufgrund der zeitlichen Verlegungen nicht mehr erreicht werden können.
5. Prüfung: Können Anschlüsse abgewartet werden? Dabei finden die Bildfahrpläne der Anschlußstrecken sowie Betriebsdienstvorschriften zur Wartezeitregelung Anwendung.
6. Gegebenenfalls Anschlußzügen eine außerplanmäßige Synchronzeit gewähren.
7. Solange nicht alle beteiligten Zugfahrten betrachtet sind: Gehe zu 1, sonst Ende.

Die Blockstrecke B-Stadt–Abzw Ab-Tal kann nicht gleichzeitig von IR 2445 und RB 20371 befahren werden. Es kommt zu einem Belegungskonflikt zwischen beiden Zugfahrten auf dieser Blockstrecke. Mögliche zeitliche Verlegungen beider Zugfahrten sind also zu prüfen.

Fährt IR 2445 um 11.51 ab B-Stadt, kann RB 20371 frühestens um 11.58 ab B-Stadt fahren, weil die Blockstrecke B-Stadt–Abzw Ab-Tal erst um 11.57 Uhr von IR 2445 verlassen wird. Der Fall, daß RB 20371 planmäßig verkehrt, hätte zur Folge, daß IR 2445 erst frühestens um 12.06 ab B-Stadt fahren könnte, damit ein Konflikt auf der Blockstrecke B-Stadt–Abzw Ab-Tal ausgeschlossen wird. Dies würde die Verspätung des in der Rangfolge gegenüber der RB höheren IR weiter erhöhen. Daher ist die Realisierung dieses Falles nicht zweckmäßig. Es wird also eine Folgeverspätung der RB 20371 ab B-Stadt von 8 Minuten in Kauf zu nehmen sein, damit die Fahrten der Regionalbahn und des Interregios ungehindert ablaufen können und ein Anschluß zwischen beiden Zügen gewährleistet bleibt.

Bedingt durch die Verspätung des Interregios kann ein Anschluß auf EC 53 in B-Stadt nicht aufrechterhalten werden, wenn EC 53 planmäßig verkehrt. Anhand des Bildfahrplannetzes der Strecke B-Stadt–Bc-Berg und anhand der Betriebsdienstvorschriften zur Wartezeitregelung ist also zu prüfen, ob EC 53 eine außerplanmäßige Synchronzeit eingeräumt werden darf und wie lang diese bemessen ist. Dieses Vorgehen wird im nächsten Abschnitt geschildert.

Das aufgrund obiger Maßnahmen wegen der Verspätung geänderte Bildfahrplannetz zeigt Abbildung 4.3. Die neuen zeitlichen Lagen der beteiligten Zugfahrten sind gestrichelt eingezeichnet.¹²

4.1.2. Betriebsdienstvorschriften zur Regelung außerplanmäßiger Synchronzeiten

Für die Gewährung von außerplanmäßigen Synchronzeiten liegen eisenbahnbetriebliche Regelungen vor.¹³ Sie legen fest,

- unter welchen betrieblichen und verkehrlichen Bedingungen außerplanmäßige Synchronzeiten eingeräumt werden können,
- welchen Zuggattungen außerplanmäßige Synchronzeiten eingeräumt werden können,
- wie lang diese außerplanmäßigen Synchronzeiten maximal sein dürfen, ohne einer Sondergenehmigung übergeordneter Dienststellen zu bedürfen (Regelwartezeiten).

Die Entscheidung über das Einräumen außerplanmäßiger Synchronzeiten läßt sich grob mittels des folgenden Algorithmus ausdrücken:

1. Abwägung der verkehrlichen Notwendigkeit (z.B. Anzahl der Übergangsreisenden, die aus dem verspäteten Zug in den Anschlußzug umsteigen wollen; mögliche andere Zugfahrten, die diese Reisenden nutzen könnten; Takt des Anschlußzuges) und den betrieblichen Möglichkeiten. Letztere können aus den Informationen des Bildfahrplannetzes der Anschlußstrecke in der geschilderten Weise entnommen werden.
2. Ermittlung der beteiligten Zuggattungen und Feststellung der maximalen außerplanmäßigen Synchronzeiten aus der entsprechenden Betriebsdienstvorschrift.
3. Berechnung des Zeitpunktes, bis zu dem der verspätete Zug spätestens am Umsteigebahnhof eingetroffen sein muß, damit unter Berücksichtigung einer außerplanmäßigen Synchronzeit der Anschluß noch erreicht wird.
4. Gegebenenfalls Einholung der Genehmigung zur Überschreitung der Regelwartezeit von der übergeordneten Dienststelle.

¹²Vgl. zum Einsatz des Bildfahrplanes im Eisenbahnbetrieb [Deu44]

¹³Vgl. [Deu95c, S. 3f.], [Deu96a, S. 2527]

4. Überblick über verwandte Lösungsansätze

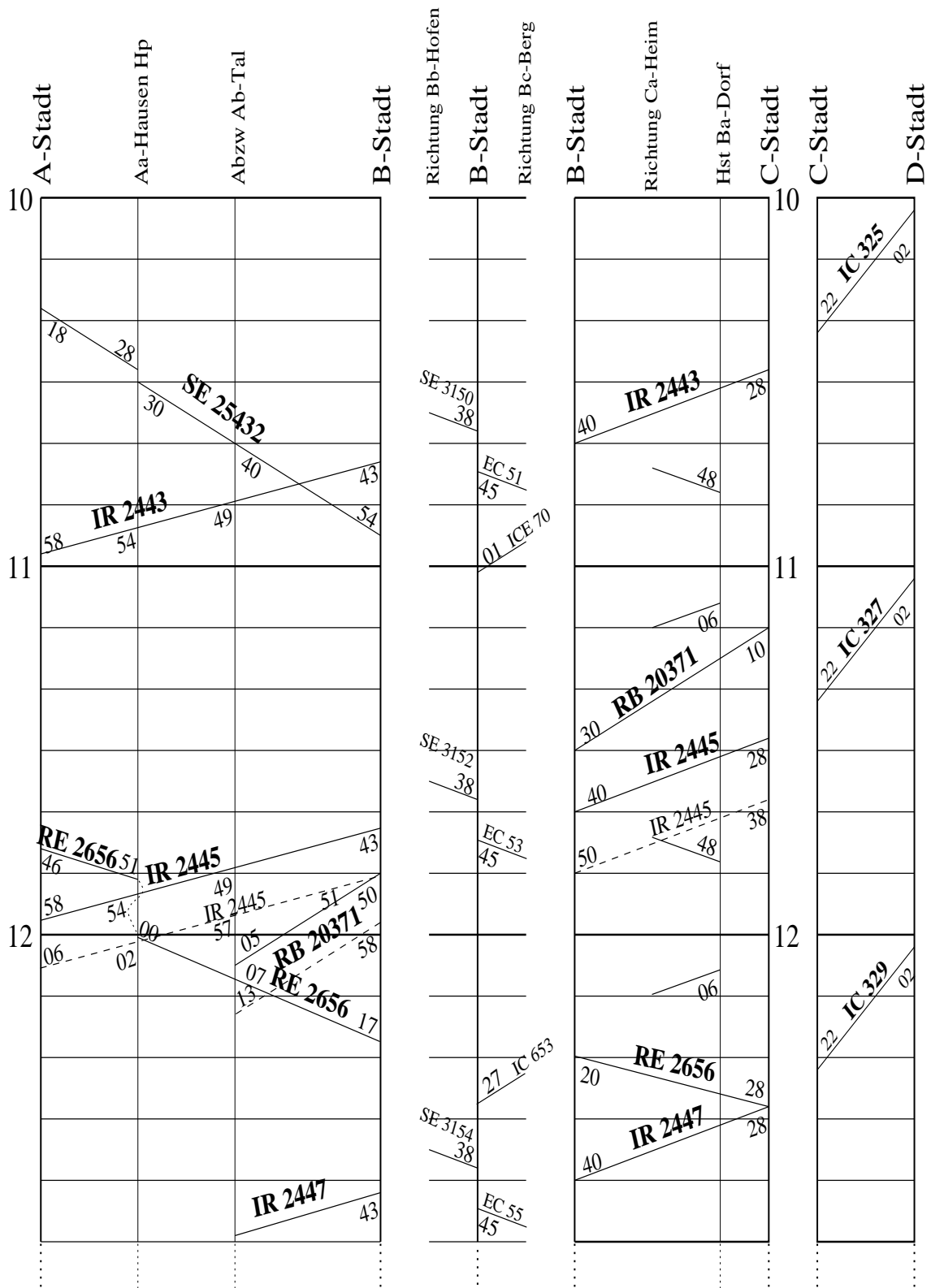


Abbildung 4.3.: Verspätungsbedingt geändertes Bildfahrplannetz

5. Wenn alle bisherigen Schritte die Gewährung einer außerplanmäßigen Synchronzeit zulassen, wird dem Anschlußzug diese eingeräumt. Anderenfalls verkehrt der Anschlußzug planmäßig.

Für diesen Entscheidungsprozeß bleibt dem Personal der Eisenbahnverkehrsunternehmen häufig nur ein Zeitraum von wenigen Minuten. Der Entscheidungsprozeß muß abgeschlossen sein, und die Reisenden im verspäteten Zug müssen über das Ergebnis der Entscheidung informiert worden sein, bevor der verspätete Zug den nächsten Umsteigebahnhof erreicht hat.

Für das Fallbeispiel wird angenommen, daß Reisende in B-Stadt vom verspäteten IR 2445 auf den EC 53 Richtung Bc-Berg umsteigen möchten. EC 53 Richtung Bc-Berg verkehrt von B-Stadt im Ein-Stunden-Takt. Diese große Taktzeit sowie nicht vorhandene alternative Reisemöglichkeiten innerhalb der Taktzeit würden die Gewährung einer außerplanmäßigen Synchronzeit für EC 53 rechtfertigen. Gemäß der geltenden Wartezeitregelung beträgt die Regelwartezeit der Zuggattung EC auf einen verspäteten Zug der Gattung IR 5 Minuten.¹⁴ Die Mindestübergangszeit am Bahnhof B-Stadt betrage ebenfalls 5 Minuten. Mit diesen Angaben kann nun sehr einfach der Zeitpunkt berechnet werden, bis zu dem IR 2445 in B-Stadt eintreffen muß, damit der Anschluß auf EC 53 innerhalb der Regelwartezeit erreicht wird. Dies geschieht wie folgt:

planmäßige	Abfahrtszeit des Anschlußzuges:	11.45 Uhr
plus	Regelwartezeit:	5 Min.
minus	Mindestübergangszeit:	5 Min.
gleich	späteste Ankunftszeit:	11.45 Uhr

Aus dem Bildfahrplannetz (Abbildung 4.3) ist ersichtlich, daß die Ankunft des verspäteten IR 2445 in B-Stadt frühestens für 11.50 Uhr zu erwarten ist. Innerhalb der Regelwartezeit wird der Anschluß also nicht erreicht. Um einen Anschluß zu gewährleisten, müßte eine in Fragen der Disposition übergeordnete Dienststelle (z.B. Zentrale Betriebsleitung) für diesen Einzelfall eine Überschreitung der Regelwartezeit für EC 53 um 5 Min. genehmigen. Diese Genehmigung werde jedoch hier nicht erteilt, so daß EC 53 planmäßig ab B-Stadt verkehrt. Diese Entscheidung hat zur Folge,

- daß die Übergangreisenden Richtung Bc-Berg erst mit EC 55, der planmäßig 60 Minuten nach EC 53 verkehrt, ihre Reise fortsetzen können,
- daß die in EC 53 verbleibenden Reisenden ihre Reise planmäßig fortsetzen können,
- daß Reisende mit B-Stadt als Startbahnhof ihre Reise mit EC 53 planmäßig beginnen können.

Die alternative Entscheidung, eine außerplanmäßige Synchronzeit für EC 53 zu gewähren, hätte zur Folge,

¹⁴Vgl. [Deu95c, S. 2], [Deu96a, S. 2527] sowie S. 18 dieser Arbeit

- daß die Übergangsreisenden Richtung Bc-Berg ihre Reise mit EC 53 fortsetzen könnten, der jedoch B-Stadt mit 10minütiger Abfahrtverspätung aufgrund der außerplanmäßigen Synchronzeit verläßt,
- daß daher auch die in EC 53 verbleibenden Reisenden und Reisende mit B-Stadt als Startbahnhof ihre Reise mit einer Abfahrtverspätung von 10 Minuten fortsetzen bzw. beginnen müßten.

Die Festlegung der außerplanmäßigen Synchronzeiten als Regelwartezeiten nach einer absoluten Wartestrategie¹⁵ erfolgt auf der strategischen Ebene der hierarchischen Verkehrsplanung. Dort kann sie in die Bereiche der Linienplanung und der Fahrlagenplanung eingeordnet werden.¹⁶ Die Anwendung dieser Regelungen zu außerplanmäßigen Synchronzeiten erfolgt auf der dispositiven Ebene. Dabei kann es zwischen den Festlegungen der strategischen Ebene und den Auswirkungen entsprechender Entscheidungen der dispositiven Ebene durchaus zu Zielkonflikten hinsichtlich der Optimierung der Reisezeiten kommen. Dies liegt darin begründet, daß bei der Verkehrsplanung auf strategischer Ebene eher die Leistungsfähigkeit des gesamten Eisenbahnverkehrsangebotes im Vordergrund steht, während auf der dispositiven Ebene primär die Auswirkungen auf einzelne Zugfahrten und einzelne Reisen betrachtet werden. Dies zeigt auch das o.g. Beispiel: Es sei strategische Anforderung an die Zuggattung EC, daß eine bestimmte Beförderungszeit auf dem gesamten Zuglauf und damit eine bestimmte durchschnittliche Reisegeschwindigkeit¹⁷ nicht unterschritten werden soll, um auf strategischer Ebene in diesem Bereich eine Optimierung der Reisezeit erzielen zu können. Um diese Anforderung hinsichtlich der realisierten Beförderungszeit grundsätzlich einhalten zu können, sollen Zugfahrten dieser Zuggattungen zur Gewährleistung von Anschlüssen außerplanmäßig grundsätzlich nicht über eine bestimmte Zeit hinaus in ihrer Abfahrt verzögert werden, da dies eine Verlängerung der Beförderungszeit und damit eine Senkung der Reisegeschwindigkeit bedeuten kann. Diese zeitliche Grenze wurde als Ergebnis eines strategischen Planungsschrittes mit fünf Minuten festgelegt und findet sich in den Regelwartezeiten.¹⁸ Zwischen Umsteigenden auf EC 53 und denjenigen Reisenden, die in B-Stadt ihre Reise beginnen bzw. solchen, die im EC 53 verbleiben entsteht dennoch in der Umsetzung dieser Regelung ein Zielkonflikt: Wenn die Regelwartezeiten, wie im Beispiel, strikt angewendet werden, werden die umsteigenden Reisenden benachteiligt, indem sich ihre Reisezeit deutlich verlängert. Andererseits können die Reisenden in EC 53 planmäßig reisen, und der genannten strategischen Zielsetzung würde entsprochen werden. Wenn dem EC 53 hingegen eine außerplanmäßige Synchronzeit über die Regelwartezeit hinaus

¹⁵Vgl. Tabelle 2.2 auf Seite 18 und [Men91]

¹⁶Vgl. Abbildung 3.1 auf Seite 20

¹⁷Die durchschnittliche Reisegeschwindigkeit einer Zuggattung wird gemessen in „Streckenlänge aller betreffenden Zugläufe“ pro „Beförderungszeit über diese Zugläufe“ und normiert auf Kilometer pro Stunde. Je nachdem, ob die durchschnittliche Ist- oder Soll-Reisegeschwindigkeit ermittelt werden soll, werden die planmäßigen bzw. die realisierten Beförderungszeiten zugrundegelegt.

¹⁸Vgl. Tabelle 2.2 auf Seite 18

gewährt werden würde (dies ist die Handlungsalternative im Beispiel), so müßten die Reisenden im EC 53 und die umsteigenden Reisenden eine Abfahrtverspätung in Kauf nehmen. Dies würde für die Reisenden des bisher pünktlich verkehrenden EC 53 eine Benachteiligung bedeuten. Die umsteigenden Reisenden könnten jedoch den Anschlußzug erreichen und ihre Reise mit einer geringeren Verzögerung als im ersten Fall fortsetzen. Die für das Gesamtsystem vorteilhaft erscheinende strategische Zielsetzung einer optimalen Reisezeit durch Sicherstellung einer Mindestreisegeschwindigkeit kann sich also – auf der dispositiven Ebene umgesetzt – für einzelne Reisende nachteilig auswirken.

4.1.3. Einsatz der rechnerunterstützten Zugüberwachung zur Betriebssteuerung

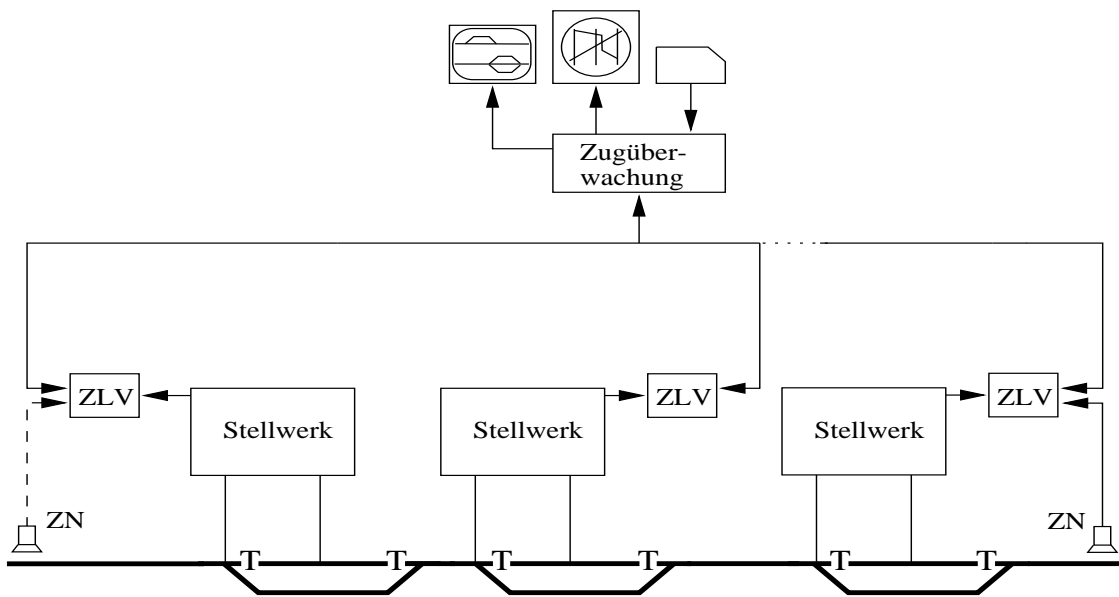
Auf einer Vielzahl von Strecken im Netz der DB AG erfolgt die Abwicklung der dargestellten Tätigkeiten der Betriebssteuerung mittels Unterstützung durch Instrumente der Elektronischen Datenverarbeitung. Das dahinterstehende Konzept der *rechnerunterstützten Zugüberwachung* (RZü) hat den Zweck, die zur Betriebssteuerung benötigten Daten zu erheben, aufzubereiten und darzustellen. Die Daten der Zugfahrten werden dabei laufend automatisch entlang der Strecke erfaßt, zu den Dienststellen der Betriebsleitung übermittelt und auf Datensichtgeräten übersichtlich in Form eines Bildfahrplannetzes dargestellt.

Eine schematische Darstellung des RZü-Konzeptes zeigt Abbildung 4.4.¹⁹ Dargestellt ist dort ein Streckenabschnitt, der wiederum zum Zweck der Zugsicherung und der Zugüberwachung mittels dreier Stellwerke in sieben Streckenabschnitte, die als Blockstrecken interpretiert werden können, aufgeteilt ist. Der gesamte Streckenabschnitt sei durch zwei Zugnummernmeldeanlagen begrenzt.

Zugnummer und Zeitpunkt der Vorbeifahrt eines Zuges werden von den Zugnummernmeldeanlagen an der Strecke erfaßt und an den Computer der Zuglaufverfolgung (ZLV) übermittelt.²⁰ Die ZLV-Computer in den Stellwerken speichern die Zugnummer einer Zugfahrt und den Zeitpunkt, wenn der Zug in den von ihnen überwachten Streckenabschnitt einfährt bzw. diesen verläßt. Mit diesen Angaben kann eine Zeit-Weg-Linie ermittelt werden. Die ZLV-Computer sind miteinander und mit den übergeordneten Dienststellen der Betriebsleitung verbunden. Die aktuelle Betriebssituation wird entsprechend der Darstellung im Bildfahrplannetz auf den RZü-Bildschirmen angezeigt. Auf diesem Bildfahrplannetz wird der bisherige Verlauf der Zugfahrten aus den an der Strecke erhobenen Daten dargestellt. In Ergänzung dazu wird aus den Daten des Soll-Fahrplanes der voraussichtliche Verlauf der Zugfahrten abgebildet. An den Enden der Zeit-Weg-Linien werden Abweichungen der Zugfahrten vom Soll-Fahrplan angezeigt. Die vergangenen und voraussichtlichen Zeit-Weg-Linien können gleichzeitig angezeigt werden, so daß das

¹⁹Bild entnommen aus [Bey80]. Das dort beschriebene Systemkonzept hat noch heute Gültigkeit.

²⁰Bei Stellwerken, die nicht an eine Zugnummernmeldeanlage angeschlossen sind, müssen Zugnummer und Zeitpunkt der Vorbeifahrt manuell erfaßt werden.



ZN: Zugnummernmeldeanlage an der Strecke
ZLV: Zuglaufverfolgungscomputer
T: Grenzen überwachter Streckenabschnitte

Abbildung 4.4.: Konzept der rechnerunterstützten Zugüberwachung

Personal der Betriebssteuerung ablesen kann, wie der Betrieb ohne steuernde Eingriffe ablaufen wird. Werden nun betriebssteuernde Maßnahmen nötig, können die voraussichtlichen Verläufe der Zeit-Weg-Linien einzelner Züge gelöscht, verschoben oder neu gezeichnet werden. So kann der beabsichtigte Betriebsablauf vor der Realisierung visualisiert werden. Die aktuelle und beabsichtigte Anschlußsituation an Umsteigebahnhöfen kann ebenfalls auf den RZü-Bildschirmen, ähnlich wie im Bildfahrplannetz, angezeigt werden. Auf dieser Grundlage werden dann in einem weiteren Schritt die Anweisungen zur Betriebssteuerung erteilt. Die technischen Einrichtungen selbst treffen jedoch keine betriebssteuernden Entscheidungen. Vielmehr erfolgt der Entscheidungsprozeß, wie bereits erläutert, durch das eingesetzte Personal.²¹

4.2. Ausgewählte Veröffentlichungen zu Problemen der hierarchischen Verkehrsplanung

Veröffentlichungen, die sich mit Einzelaspekten der Verkehrsplanung befassen, lassen sich kategorisieren nach solchen, die für bestimmte Probleme Lösungsansätze liefern und nach solchen, die Aspekte der Verkehrsplanung lediglich beschreiben ohne konkrete Problemlösungsverfahren aufzuzeigen. Auf letztere soll hier nicht weiter eingegangen werden; eine Auswahl ist dem Literaturverzeichnis zu entnehmen.²²

Zu den Problemstellungen, die sich entsprechend der festgestellten Verkehrsnachfrage und der daraufhin erfolgten Angebotsdefinition aus den verschiedenen Ebenen der hierarchischen Verkehrsplanung²³ ergeben, existiert eine Vielzahl von Lösungsansätzen:

- Laschet et al. entwickeln in [LWV79] zur Definition eines Schienenverkehrsangebotes (*Angebotsdefinition*) für den Bereich der *Netzstrukturplanung* ein Verfahren zur Ermittlung einer optimalen Strecken- und Netzkonzeption für ein Schienennetz. Ausgehend von einer gegebenen Verkehrsnachfrage wird für das Land Nordrhein-Westfalen auf der Basis der Graphentheorie ein optimales Streckennetz bestimmt. Das so bestimmte Streckennetz wird mit dem in Nordrhein-Westfalen tatsächlich vorhandenen Streckennetz verglichen.
- Für die *Linienplanung* gibt es zwei Optimierungskriterien, die sich in ihren Zielformulierungen meist widersprechen:
 1. Bei gegebener Verkehrsnachfrage zwischen Orten des Streckennetzes sind die Linien so zu planen, daß die Anzahl der Umsteigevorgänge bei den nachgefragten Reisen minimiert wird (Maximierung der Direktverbindungen) bzw. daß die Anzahl der Reisenden, die ihr Ziel ohne Umsteigevorgänge erreichen, maximiert wird (Direktfahrermaximierung).

²¹Vgl. [Bey80]

²²Vgl. z.B. [AEG93], [Bär96], [Bey80], [Bön94], [EBO67], [Göb93], [Sch93], [Deu95a], [Wie79]

²³siehe Abbildung 3.1 auf Seite 20

2. Bei gegebener Verkehrsnachfrage zwischen Orten des Streckennetzes sind die Linien so zu planen, daß die Verkehrsnachfrage mit einem Minimum an eingesetzten Fahrzeugen befriedigt wird.

In [Bus95], [Die79] und [Son78] wird eine optimale Linienplanung unter dem erstgenannten Kriterium behandelt. Rüter betrachtet in [Rüg91] u.a. das zweitgenannte Kriterium, das in sehr engem Zusammenhang mit der Fahrzeugeinsatzplanung im Rahmen der Verkehrsplanung zu sehen ist.

- Die *Fahrlagenplanung* ist die entscheidende Planungsstufe bei der erstmaligen Erstellung oder der Fortschreibung von Soll-Fahrplänen für gegebene Linien, die auf einem gegebenen Netz die Verkehrsnachfrage befriedigen sollen. Für die Fahrlagenplanung besteht das hauptsächliche Optimierungsziel darin, die Soll-Fahrpläne für Zugfahrten so festzulegen, daß die Kosten für die Durchführung von Reisen aus der Perspektive der Reisenden und/oder der Eisenbahnunternehmen unter verschiedenen Nebenbedingungen minimal werden. Dies kann entweder in einem allgemeinen Ansatz erfolgen, oder es werden einzelne, daraus abgeleitete Zielvorstellungen betrachtet. Ein solches abgeleitetes Ziel kann die Optimierung von Umsteigezeiten sein, so daß die Umsteigezeiten für Reisende beim Wechsel der Linien in Umsteigebahnhöfen minimal werden. Es gibt unterschiedliche Ausprägungen dieses speziellen Optimierungszieles:
 - Minimierung der Umsteigezeiten an einem einzelnen Bahnhof,
 - Minimierung des Gesamt-Umsteigezeitvolumens im Netz als Summe der Umsteigezeiten aller Reisenden im Netz,
 - Minimierung der Anzahl der Reisenden, deren Umsteigezeiten eine vorgegebene Zeitdauer überschreiten.

Brucker und Hurink untersuchen in [BH86] einen einzelnen Bahnhof mit n Eisenbahnlinien. Auf diesen Linien existiert ein Takt, so daß die Züge jeder Linie in regelmäßigen zeitlichen Abständen auf diesem Bahnhof eintreffen. Gesucht wird eine optimale Reihenfolge des Eintreffens, die die maximale Umsteigezeit für die Reisenden minimiert. Domschke betrachtet in [Dom89] das Problem der Soll-Fahrplanerstellung für den Öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) unter der Zielsetzung, das Gesamt-Umsteigezeitvolumen in einem Liniennetz zu minimieren. Holz und Hüttmann stellen in [HH87] eine Heuristik vor. Bei dem vorgestellten Verfahren werden die vorhandenen Soll-Fahrpläne aller Linien eines ÖPNV-Netzes in einem iterativen Prozeß solange zeitlich gegeneinander verschoben, bis sich für die Qualität der Fahrplanlagen keine oder nur vernachlässigbar geringe Verbesserungen ergeben. Voget wendet einen hybriden genetischen Algorithmus auf die Fahrlagenplanung im schienengebundenen öffentlichen Personenverkehr an. In [Vog95] wird von einem Modell ausgegangen, das die Summe der Umsteigezeiten in einem

Liniennetz durch Veränderung der Abfahrts- und Ankunftszeiten von Zugfahrten minimiert. Carey betrachtet in [Car94] allgemein verknüpfte Fahrten von Verkehrsmitteln, wie z.B. im Bus-, Eisenbahn- und Luftverkehr, für die ein Soll-Fahrplan existiert und bei denen die Ankunfts-, Abfahrts- und Fahrzeiten Zufallseinflüssen unterliegen. Zielsetzung ist es u.a., einen Soll-Fahrplan so fortzuschreiben, daß die erwarteten Kosten, die bei der Durchführung von Reisen anfallen, minimal werden.

- Gegenstand der *zugweisen Fahrplanung* sind die Strecken- und Bahnhofsbelegungen durch Zugfahrten unter Berücksichtigung eisenbahnbetrieblicher Erfordernisse. Folgende Problemstellungen der zugweisen Fahrplanung seien exemplarisch genannt:
 - Planung von Zugkreuzungen und/oder Überholungen auf eingleisiger Strecke so, daß Züge frühestmöglich am Endbahnhof ankommen,²⁴
 - computerunterstützte Erstellung eines Streckenfahrplanes für eine einzelne, eingleisige Strecke und Umsetzung in ein Bildfahrplannetz unter Berücksichtigung möglicher Streckenbelegungskonflikte und Rangfolgen von Zuggattungen auf eingleisiger Strecke, so daß Traktionskosten (Kosten des Triebfahrzeugeinsatzes) sowie zeit- und raumabhängige Beförderungskosten minimal werden,²⁵
 - Planung von Zugfahrten auf isolierten Eisenbahnstrecken unter Berücksichtigung der Verkehrsnachfrage, möglicher Zugbildungsbahnhöfe und der Kosten des Eisenbahnbetriebes,²⁶
 - Bestimmung der Anzahl erforderlicher Bahnsteiggleise in Umsteigebahnhöfen unter der Bedingung der betrieblichen Durchführung eines Taktfahrplanes.²⁷
- Braker zeigt einen Ansatz zur Analyse von *Verkehrsprozessen* in Eisenbahnnetzen. In [Bra93] wird ein Eisenbahnnetz mit verschiedenen Linien, Umsteigebahnhöfen und einem integrierten Taktfahrplan als dynamisches System beschrieben.

Die Bereiche der *Fahrzeugeinsatzplanung* und der *Dienstplanung* werden hier nicht betrachtet, da diese Bereiche für die Zielsetzung dieser Arbeit nicht relevant sind. Ebenso wird an dieser Stelle darauf verzichtet, weitere Problemlösungsansätze zur *Disposition von Zugfahrten* darzustellen. Charakteristische Problemstellungen dazu und entsprechende Lösungsmöglichkeiten wurden bereits anhand der Ausführungen zur Reisezeitoptimierung in der Praxis des Bahnbetriebes aufgezeigt.

²⁴Vgl. [Abr93], [CG94]

²⁵Vgl. [Jel75]

²⁶Vgl. [PM81]

²⁷Vgl. [Dir77]

4.3. Ausgewählte Veröffentlichungen zu Verspätungen und Synchronzeiten

4.3.1. Überblick

Einige der vorgenannten Veröffentlichungen zu Einzelaspekten der hierarchischen Verkehrsplanung berücksichtigen auch auftretende Zugverspätungen.²⁸ Allerdings liegt dieser Aspekt dort nicht im Schwerpunkt der Betrachtung. Aus diesem Grund werden Veröffentlichungen, die Verspätungen und Synchronzeiten stärker in den Vordergrund rücken, hier gesondert betrachtet. Auch bei diesem Themenkreis läßt sich feststellen, daß einige Veröffentlichungen konkrete Problemlösungen betrachten, während andere hauptsächlich grundlegende Sachverhalte beschreiben, ohne konkrete Problemlösungen aufzuzeigen.

In [Hei79] werden Ansätze für die Modellierung von Zugverspätungen mittels empirischer und theoretischer Zufallsverteilungen aufgezeigt. In [Her95b] stellt Hertel Modelle und Berechnungsmöglichkeiten zur Leistungsfähigkeit und zum Leistungsverhalten von Eisenbahnbetriebsanlagen (Strecken und Bahnhöfe) dar, die auf der Bedienungstheorie basieren. Eine Analyse der Zugfahrten auf einer bestimmten Eisenbahnstrecke und Möglichkeiten der Beurteilung von Qualität der Zugfahrten und Leistungsfähigkeit dieser Strecke zeigt Hertel in [Her92a] auf. In [HS92] widmen sich Hertel und Steckel der Fahrzeitermittlung mittels eines Simulationsmodells, das Einflußgrößen auf die Fahrzeiten durch geeignete Zufallsverteilungen berücksichtigt, anstatt die Fahrzeit auf herkömmliche Weise aus der reinen Fahrzeit und einem Regel- bzw. Sonderzuschlag zu bestimmen. Die Anwendung des Verfahrens wird gezeigt am Beispiel einzelner Güterzugfahrten auf einer 10 km langen Strecke. Auf diesem Ansatz bauen Jentsch und Gröpler in [JG95b] und [JG95a] auf, indem die Zusammenhänge und Anwendungsmöglichkeiten dieses Ansatzes weiter ausgeführt werden. Dabei werden auch fahrdynamische Aspekte durch Modellierung von Beschleunigungs- und Verzögerungseffekten der Zugfahrten einbezogen. Aspekte und Verfahren der herkömmlichen Fahrzeitermittlung mit ihren Auswirkungen auf die Pünktlichkeit stellen hingegen Kannengießer und Wiche in [KW87] anhand einzelner Strecken dar.²⁹ Mühlhans beschreibt in [Müh90] ein allgemeines Modell zur Beschreibung von Verspätungsentwicklungen bei Zugfahrten auf einzelnen Strecken und zur Beschreibung von Verspätungsübertragungen auf Anschlußstrecken, wenn ein Anschluß an einem einzelnen Bahnhof sichergestellt werden soll. Eine Anwendung dieses Modells auf konkrete Zugfahrten und Umsteigebahnhöfe ist dort jedoch nicht beschrieben. Strube faßt in [Str96] den Erkenntnisstand über die Zusammenhang von Einflußgrößen auf die planmäßigen und tatsächlichen Beförderungszeiten zusammen (Strube verwendet dafür in Anlehnung an die Verweilzeit in einem Produktionssystem den Begriff der Durchlaufzeit) und bietet einzelne Erklärungsansätze für das Zustandekommen

²⁸Vgl. [Car94], [CK95], [Jel75]

²⁹Vgl. Seite 9

der planmäßigen und tatsächlichen Beförderungszeiten. Die Bedeutung der Wartezeiten bei der Beurteilung der Qualität von Beförderungsleistungen stellen Hertel und Kölbl in [HK96] dar. Hinsichtlich der außerplanmäßigen Wartezeiten wird auch der Einfluß von Zugverspätungen betrachtet.

Grundlagenwerke zur Disposition von Zugfahrten in der Praxis bei auftretenden Verspätungen stellen [Deu95c] und [Deu44]³⁰ dar. Kleinere Beiträge zum Themenkreis der Synchronzeiten und Zugverspätungen finden sich in [ETR96], [Deu96d], [Chr96] und [RL97]. Zwei umfassendere Arbeiten, die mit der Problemstellung dieser Arbeit in engerem Zusammenhang stehen, seien hier herausgegriffen und im folgenden genauer beschrieben.

4.3.2. Optimierung planmäßiger Synchronzeiten mittels Linearer Optimierung

In [Kri96] zeigt Krista ein auf Linearer Optimierung basierendes Verfahren zur netzweiten Optimierung planmäßiger Synchronzeiten in einem Liniennetz auf. Zielfunktion ist dabei die Minimierung der netzweiten Summe der mit den Reisendenzahlen gewichteten Synchronzeiten. Die Variablen des Modells sind

- Fahr- und Haltezeiten der Züge auf den Linien,
- Umsteigebindungen zur Gewährleistung von Anschlüssen,
- *Linienbündelung*³¹ und *Taktverdichtung*³²
- Zugfolgezeiten,
- Mindestwendezeiten der Züge an den Linienendbahnhöfen.

In den Restriktionen werden zeitliche Bedingungen der Anschlüsse und Erfordernisse des Eisenbahnbetriebes (z.B. Gleisbelegungs- und Fahrstraßenkonflikte) berücksichtigt. Die Herleitung der Restriktionen erfolgt zum Teil auf Basis verschiedener Transportkettengraphen, in denen die einzelnen Zugfahrten als Knoten und die jeweiligen zeitlichen Verknüpfungen dieser Zugfahrten bzw. die Restriktionen dieser Verknüpfungen als bewertete, gerichtete Kanten modelliert werden. Die Reisendenzahlen werden aus einer nicht näher beschriebenen Belastungssimulation auf Basis von Daten des Bundesverkehrswegeplanes 1995 ermittelt. Diese Belastungssimulation benötigt einen bereits

³⁰Die hier dargestellten Prinzipien der Disposition von Zugfahrten finden noch heute Anwendung.

³¹Linienbündelung bezeichnet die zeitlich dichte Zusammenlegung mehrerer Zugfahrten (idealerweise folgen die Züge mit Mindestzugfolgezeit aufeinander) verschiedener Linien, jedoch gleicher Geschwindigkeitseigenschaften, um so die Leistungsfähigkeit einer Strecke zu erhöhen

³²Taktverdichtung bezeichnet die Verringerung der Taktzeiten auf einer Strecke, auf der mehrere Linien verkehren, indem die Zugfahrten zeitlich so versetzt werden, daß sich die Zugfolgezeiten verschiedener Linien zueinander gleichen.

bestehenden, hinsichtlich der Synchronzeiten noch nicht optimalen Fahrplan (Basisfahrplan), der dann nach der o.g. Zielfunktion unter Berücksichtigung der verkehrlichen und betrieblichen Restriktionen optimiert wird. Da sich die Reisendenströme aufgrund der Unterschiede zwischen einem optimierten Fahrplan und dem Basisfahrplan ändern können, sind mehrere Optimierungsschritte erforderlich. Das iterative Optimierungsverfahren endet dann, wenn die Reisendenströme vor und nach einem Optimierungsschritt gleich sind. Ein derartiger Fahrplan wird als verkehrsstromstabiler Fahrplan bezeichnet. Ziel ist es also, einen optimalen und verkehrsstromstabilen Soll-Fahrplan zu erhalten. Auftretende Verspätungen werden in diesem Modell nicht berücksichtigt. Ferner bleibt dadurch unbeachtet, daß ein Soll-Fahrplan, der auf minimale Synchronzeiten ausgerichtet ist, in der Realität dazu führen kann, daß Anschlüsse aufgrund von Ankunftsverspätungen in besonderem Maße gefährdet sind, weil bereits planmäßig keine Zeitreserven beim Umsteigen zum Auffangen eventueller Ankunftsverspätungen mehr bestehen.

Das Verfahren wurde auf das Intercity-Netz der Deutschen Bahn AG mit allen 18 Linien angewandt, wobei das Liniennetz geringfügig vereinfacht wurde, indem von einer Betriebsdauer von 16 Stunden pro Tag und einem 60-Minuten-Takt auf allen Linien ausgegangen wurde. Mittels des geschilderten Verfahrens konnte in diesem Liniennetz der Anteil der planmäßigen Synchronzeiten an der Reisezeit im Vergleich zum Basisfahrplan von 4,5% auf 2,9% gesenkt werden. Dabei beträgt das Synchronzeitvolumen im Basisfahrplan 1 201 372 Personenminuten bei einem Gesamtreisezeitvolumen von 26 605 242 Personenminuten. Im optimierten Fahrplan beträgt das Synchronzeitvolumen lediglich 773 650 Personenminuten auf ein Gesamtreisezeitvolumen von 26 159 689 Personenminuten. Dadurch ergibt sich eine Senkung des planmäßigen Gesamtreisezeitvolumens um 1,7% (entsprechend 445 553 Personenminuten).

4.3.3. Die Bemessung von Pufferzeiten zur Gewährleistung von Anschlüssen

In [Men91] entwickelt Meng ein theoretisches Verfahren zur Bemessung der erforderlichen außerplanmäßigen Synchronzeit an einem einzelnen Bahnhof. Hierbei wird zwischen absoluten und relativen Wartezeitvorschriften unterschieden.³³ Verschiedene Anschlußsituationen werden hinsichtlich ihrer zeitlichen Bindungen bei unterschiedlichen Ausprägungen der Ankunftsverspätungen bei zubringenden Zügen untersucht. Es werden daraus Berechnungsgleichungen für die synchronisationsbedingten Abfahrtverspätung eines Anschlußzuges (*Anschlußverspätung*) abgeleitet. Diese Berechnungsgleichungen werden numerisch durch eine Simulation verifiziert. Als eisenbahnbetriebliche Restriktionen werden die Zeitabstände der Zugankünfte, die Anzahl verfügbarer Bahnhofsgleise und die Haltezeiten der Züge am Bahnsteig berücksichtigt. Dabei wird von gammaverteilten Zeitabständen der Zugankünfte und von negativ-exponentialverteilten Ausbruchsverspätungen ausgegangen. Zunächst wird ein Gleichungssystem zur Berechnung der

³³Vgl. auch Abschnitt 33 auf S. 17 dieser Arbeit

Anschlußverspätung bei einer Anschlußbindung zwischen zwei Reisezügen unter Berücksichtigung von absoluten und relativen Wartestrategien (einschließlich der entsprechend notwendigen außerplanmäßigen Synchronzeiten) aufgebaut. Darauf aufbauend wird eine mittlere Anschlußverspätung aller Züge bezogen auf einen einzelnen Bahnhof unter Berücksichtigung verschiedener Zuggattungen ermittelt. Dieses Ergebnis der Arbeit wird mittels der genannten Simulation verifiziert. Qualitätskriterium hierfür ist das Risiko, die Kapazität vorhandener Gleisanlagen zu überschreiten. Eine Anwendung anhand realer Soll-Fahrpläne erfolgt nicht.

4.4. Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit geht von einem gegebenen Liniennetz, gegebenen Soll-Fahrplänen und einer gegebenen Verkehrsnachfrage aus. Es wird angenommen, daß bei Zugfahrten Verspätungen auftreten, die zeitliche Auswirkungen auf das Anschlußgeschehen an Umsteigebahnhöfen haben.

Die in den Abschnitten 4.2 und 4.3 dargestellten Veröffentlichungen befassen sich mit verschiedenen Einzelaspekten der hierarchischen Verkehrsplanung³⁴, die für die grundlegenden Ausgangspunkte dieser Arbeit von Bedeutung sind: Liniennetzplanung, Soll-Fahrplanerstellung, Verspätungen und Verspätungsentwicklungen. Für jeden Planungsschritt wurde eine exemplarische Problemstellung herausgegriffen und kurz dargestellt. Insbesondere die Arbeiten zum Themenkreis der Verspätungen und der planmäßigen und außerplanmäßigen Synchronzeiten sowie zur Disposition von Zugfahrten³⁵ in Verspätungsfall haben einen engen Bezug zur Problemstellung.

Dispositive Verfahren, die bei der DB AG Anwendung finden, und die entsprechenden Grundlagenarbeiten betrachten primär die Perspektive des Eisenbahnbetriebes. Die Disposition einzelner Zugfahrten bei Verspätungen erfolgt im wesentlichen streckenbezogen und hat das Ziel, entstandene Abweichungen vom Fahrplan bei einzelnen Zugfahrten zu minimieren. Die Einhaltung von Reisefahrplänen und die Gewährleistung von Anschlüssen (Sicht der Reisenden) ist ein daraus abgeleitetes Unterziel, das jedoch nicht unmittelbar Gegenstand der Optimierung ist. Damit erfolgt im Rahmen der praktischen Disposition von Zugfahrten keine Untersuchung darüber, wie sich die dispositiven Entscheidungen mit Auswirkungen auf das Anschlußgeschehen netzweit und über einen längeren Zeitraum hinsichtlich der Reisezeiten auf die gesamte Netzleistungsfähigkeit auswirken. Eine Rückkopplung vom Ergebnis dieser dispositiven Entscheidungen auf die strategische Festlegung von Regelungen für die Gewährung außerplanmäßiger Synchronzeiten kann damit nicht in systematischer Weise erfolgen.

Die Arbeit von Krista³⁶ hat die Minimierung der planmäßigen Synchronzeiten in einem realitätsnah modellierten Liniennetz zum Ziel. Die Arbeit ist daher dem Themengebiet

³⁴Vgl. Abbildung 3.1 auf Seite 20

³⁵siehe Abschnitt 4.1

³⁶siehe Abschnitt 4.3.2

der Erstellung optimaler Soll-Fahrpläne zuzuordnen. Auftretende Ankunftsverspätungen werden in der Arbeit jedoch nicht berücksichtigt. Prinzipiell wirft dies die Frage auf, ob und inwieweit sich minimale planmäßige Synchronzeiten auf die Reisezeiten auswirken, wenn Ankunftsverspätungen auftreten. Diese Frage wird in der Arbeit von Krista nicht diskutiert.

Meng betrachtet in seinem Ansatz³⁷ die Auswirkungen von Ankunftsverspätungen auf Anschlüsse und Anschlußzüge mit dem Ziel, zu einer Ermittlung optimaler außerplanmäßiger Synchronzeiten zu kommen, die die Kapazität der Gleisanlagen eines Umsteigebahnhofes berücksichtigt. Damit liegt seine Problemstellung der Problemstellung der vorliegenden Arbeit am nächsten. Allerdings betrachtet Meng lediglich einen einzelnen Bahnhof und wendet sein Modell nicht auf reale Liniennetze mit den dort geltenden Soll-Fahrplänen an.

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit³⁸ geht über die bestehenden Ansätze hinaus, indem

- ein realitätsnah modelliertes Eisenbahn-Liniennetz betrachtet wird,
- Zugverspätungen netzweit berücksichtigt werden,
- Regelungen und zeitliche Obergrenzen für außerplanmäßige Synchronzeiten gesucht werden, die in einem Eisenbahn-Liniennetz unter Berücksichtigung auftretender Verspätungen Zielvorgaben für bestimmte Kennzahlen der Netzleistungsfähigkeit und der Beförderungsqualität (u.a. planmäßiges und realisiertes Gesamtbeförderungszeitvolumen, Pünktlichkeitsgrad) berücksichtigen,
- dazu die Obergrenzen außerplanmäßiger Synchronzeiten so als Regelgröße verwendet werden, als ob diese in den dispositiven Entscheidungen im Eisenbahnbetrieb ebenfalls eine Regelgröße wären³⁹

Die netzweiten zeitlichen Auswirkungen außerplanmäßiger Synchronzeiten unter Berücksichtigung zufällig auftretender Verspätungen in einem Netz des schienengebundenen Reiseverkehrs sind nach Aussage von Strube bislang wenig erforscht.⁴⁰ Hierfür einen Ansatz aufzuzeigen, ist Zielsetzung dieser Arbeit.

³⁷siehe Abschnitt 4.3.3

³⁸Vgl. Abschnitt 3.2

³⁹De facto sind die Obergrenzen außerplanmäßiger Synchronzeiten nach bestimmten Kriterien in Betriebsdienstvorschriften festgelegt und dürfen nur im Ausnahmefall überschritten werden. Vgl. Tabelle 2.2 auf Seite 18 sowie [Deu95c, S. 2f.], [Chr96] und [RL97]

⁴⁰Vgl. [Str96, S. 96ff.]

5. Modellierung und Darstellung des Systems „Eisenbahnnetz“

5.1. Grundbegriffe der Graphentheorie

Mittels der Graphentheorie lassen sich reale Gegebenheiten modellieren, bei denen Elemente in bestimmten Beziehungen zueinander stehen. Dies trifft auf die örtlichen und zeitlichen Aspekte einer Reise zu. Deshalb erfolgt die Modellierung des Streckennetzes, des Liniennetzes, der Umsteigemöglichkeiten und der Verkehrsnachfrage mittels Graphen.

Hierzu werden zunächst einige Grundbegriffe der Graphentheorie zusammengestellt. Dabei erfolgt eine Beschränkung auf solche Begriffe, die für die Veranschaulichung des Modells erforderlich sind. Für weitergehende Ausführungen wird auf die Literatur verwiesen [Sac70, Gal92, KLS75, Neu75, NM93].

Definition 1 (Graph) *Ein Graph G besteht aus einer nichtleeren Menge V , den Knoten von G , und einer Menge E , den Kanten von G . Es gilt $V \cap E = \emptyset$. Auf E ist eine Abbildung definiert, die einem Element $e \in E$ genau zwei Elemente $v_i, v_j \in V$ zuordnet.*

Bezeichnung 1 *Die Kante e ist mit den Knoten v_i und v_j inzident. Die Abbildung wird auch Inzidenzabbildung genannt.*

Definition 2 (Gerichteter Graph, Digraph, ungerichteter Graph) *Ein Graph G heißt gerichteter Graph oder Digraph, wenn die den Elementen $e \in E$ zugeordneten Paare (v_i, v_j) geordnet sind. Ein $e \in E$ heißt dann gerichtete Kante oder Pfeil. Ist das e zugeordnete Paar (v_i, v_j) nicht geordnet, heißt G ungerichteter Graph. In einem ungerichteten Graphen werden die Elemente von E Kanten oder Bögen genannt.*

Bezeichnung 2 *Mit $\langle v_i, v_j \rangle$ wird eine gerichtete Kante bezeichnet; im Gegensatz dazu soll (v_i, v_j) eine Kante eines ungerichteten Graphen bezeichnen. Gilt $e = \langle v_i, v_j \rangle$, so ist e mit v_i positiv inzident und mit v_j negativ inzident.*

Definition 3 (Parallele Kanten, Schlinge) *Haben zwei oder mehr Elemente $e \in E$ dasselbe Paar (v_i, v_j) als Bild, so heißen diese Kanten bzw. Pfeile parallel. Ein Element $e = (v_i, v_i)$ heißt Schlinge.*

Definition 4 (schlichter Graph) Ein Graph, der weder parallele Kanten noch Schlingen hat, wird schlicht genannt.

Definition 5 (Nachbar, Vorgänger, Nachfolger) Gibt es in einem Graphen G eine Kante $e = (v_i, v_j)$, so wird v_i Nachbar von v_j und v_j Nachbar von v_i genannt. Die Menge aller Nachbarn eines Knotens v_i wird mit $N(v_i)$ bezeichnet. Gibt es in einem Digraphen eine Kante $e = \langle v_i, v_j \rangle$, so heißt v_i Vorgänger von v_j und v_j Nachfolger von v_i . Die Menge aller Vorgänger eines Knotens v_j wird mit $P(v_j)$, die Menge aller Nachfolger eines Knotens v_i wird mit $S(v_i)$ bezeichnet.

Definition 6 (Grad eines Knotens) Die Anzahl der mit einem Knoten v_i inzidenten Kanten heißt Grad von v_i . Der Grad von v_i wird mit $\delta(v_i)$ bezeichnet. In einem Digraphen wird die Anzahl der negativ inzidenten Kanten eines Knotens v_i negativer Grad oder Eingangsgrad genannt; die Anzahl der positiv inzidenten Kanten eines Knotens v_i heißt positiver Grad oder Ausgangsgrad von v_i . Der Eingangsgrad von v_i wird mit $\delta^-(v_i)$ und der Ausgangsgrad von v_i mit $\delta^+(v_i)$ bezeichnet.

Es gilt:¹

$$\delta(i) = |N(i)|, \quad \delta^-(i) = |P(i)|, \quad \delta^+(i) = |S(i)|$$

Definition 7 (Quelle, Senke, isolierte Knoten) Ein Knoten v_i eines Digraphen G , für den $\delta^-(v_i) = 0$ und $\delta^+(v_i) > 0$ gilt, heißt Quelle von G , ein Knoten v_j in G mit $\delta^-(v_j) > 0$ und $\delta^+(v_j) = 0$ heißt Senke von G . Ein Knoten v_i eines Digraphen mit $\delta^-(v_i) = \delta^+(v_i) = 0$ bzw. ein Knoten v_i eines ungerichteten Graphen mit $\delta(v_i) = 0$ wird isolierter Knoten genannt.

Definition 8 (Bewerteter Graph) Wird jeder Kante e eines Graphen bzw. jedem Pfeil e eines Digraphen mittels einer Abbildung $c : E \mapsto M$ ein Element $c(e)$ einer gegebenen Menge M zugeordnet bzw. wird jedem Knoten v mittels einer Abbildung $d : V \mapsto N$ ein Element $d(v)$ einer Menge N zugeordnet, so heißen solche Graphen bzw. Digraphen bewertet.

Bezeichnung 3 Die Abbildungen c und d heißen Bewertungsfunktionen. Der Funktionswert $c(e)$ wird Bewertung der Kante bzw. des Pfeils e genannt, der Funktionswert $d(v)$ wird Bewertung des Knotens v genannt.

Definition 9 (Kantenfolge, Kantenzug, Weg, Kreis, Kette) Eine Folge

$$(v_1, v_2), (v_2, v_3), \dots, (v_{q-1}, v_q)$$

¹Es bezeichnet $|M|$ die Mächtigkeit von M . Für endliche Mengen ist $|M|$ gleich der Anzahl der Elemente von M .

von Kanten in einem ungerichteten Graphen bzw. eine Folge

$$\langle v_1, v_2 \rangle, \langle v_2, v_3 \rangle, \dots, \langle v_{q-1}, v_q \rangle$$

in einem gerichteten Graphen heißt Kantenfolge. Eine Kantenfolge, die keine Kante mehrfach enthält, heißt Kantenzug. Ein Kantenzug, der keinen Knoten mehrfach enthält, wird Weg genannt. Wird einem Weg von v_1 nach v_q die Kante (v_q, v_1) bzw. $\langle v_q, v_1 \rangle$ hinzugefügt, so entsteht ein Kreis. Ein Graph, der keine Kreise enthält, wird kreisfrei genannt. Eine Folge von Kanten e_1, e_2, \dots, e_q in einem gerichteten Graphen, die bei Nichtbeachtung der Kantenrichtungen in dem diesem Graphen zugeordneten ungerichteten Graphen in einen Weg übergeht, wird Kette genannt.

Definition 10 (Zusammenhängender Graph) Ein Graph G heißt zusammenhängend, wenn je zwei Knoten v_i und v_j durch einen Weg bzw. eine Kette miteinander verbunden sind.

Die Eigenschaft zweier Knoten v_i und v_j , miteinander verbunden zu sein, definiert eine Äquivalenzrelation ρ auf V :

$$v_i \rho v_j \Leftrightarrow v_i \text{ und } v_j \text{ sind miteinander verbunden.}$$

Ein nicht zusammenhängender Graph erzeugt also hinsichtlich ρ mehrere Äquivalenzklassen.

Definition 11 (Zusammenhangskomponente) Diese Äquivalenzklassen eines nicht zusammenhängenden Graphen G werden Zusammenhangskomponenten von G genannt.

Definition 12 (Baum, Wald) Ein kreisfreier, zusammenhängender Graph heißt Baum. Ein Graph mit mehreren Zusammenhangskomponenten, die alle Bäume sind, wird Wald genannt.

5.2. Darstellung eines Streckennetzes

Im folgenden wird ein Streckennetz betrachtet.² Dieses Streckennetz habe s_{\max} Bahnhöfe. Diese seien in der Menge \mathcal{S} zusammengefaßt:

$$\mathcal{S} = \{S_1, S_2, \dots, S_{s_{\max}}\} \quad (5.1)$$

Dann wird dazu ein Streckennetz-Graph wie folgt definiert (vgl. das Beispiel in Abb. 5.1):

²Eine Übersicht der im folgenden verwendeten Symbole ist in Anhang A.1 aufgeführt.

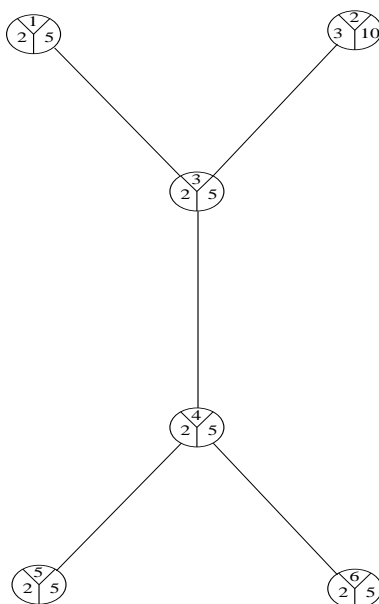


Abbildung 5.1.: Streckennetz-Graph

Definition 13 (Streckennetz-Graph) Gegeben sei ein Streckennetz mit der Menge \mathcal{S} der Bahnhöfe gemäß (5.1). Dann ist der zugehörige Graph des Streckennetzes (Streckennetz-Graph) ein ungerichteter Graph $G_S = (V_S, E_S)$, für den V_S und E_S wie folgt festgelegt sind: V_S ist die Bildmenge einer Abbildung $\mathcal{S} \mapsto V_S$ derart, daß jedem $S_i \in \mathcal{S}$ eineindeutig ein $v_i \in V_S$ zugeordnet wird. Sind zwei Bahnhöfe $S_i, S_j \in \mathcal{S}, i \neq j$ durch eine Strecke direkt miteinander verbunden, werden die diesen Bahnhöfen zugeordneten Knoten $v_i, v_j \in V_S$ durch eine ungerichtete Kante $e_S = (v_i, v_j)$ miteinander verbunden. Die im Folgenden betrachteten G_S seien zusammenhängend und schlicht.

Bezeichnung 4 Der dem Bahnhof S_i zugeordnete Knoten v_i wird mit der Knotennummer i bezeichnet.

Beispiel:

Der Streckennetz-Graph aus Abb. 5.1 ist definiert als

$$\begin{aligned} V_S &= \{1, 2, 3, 4, 5, 6\} \\ E_S &= \{(1, 3), (2, 3), (3, 4), (4, 5), (4, 6)\} \end{aligned}$$

Folgende Eigenschaften, die einem Bahnhof im Streckennetz im Hinblick auf die Problemstellung zugeordnet werden können, sollen in der Darstellung der Bahnhofsknoten von G_S als Knotenbewertungen berücksichtigt werden (siehe Abb. 5.2):

- Die Knotenbezeichnung i

- Die Mindestübergangszeit $T_{MÜZ,i}$, die für das Umsteigen zwischen zwei verschiedenen Linien am Bahnhof S_i vorgesehen ist³
- die Mindesthaltezeit $T_{H_{min},i}$ an Bahnhof S_i , die für alle dort haltenden Züge gleich sei⁴

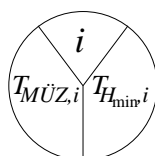


Abbildung 5.2.: Darstellung eines Bahnhofsknotens im Streckennetz-Graph

5.3. Darstellung eines Liniennetzes

In einem Streckennetz gibt es Zugfahrten zur Deckung der zwischen den Bahnhöfen bestehenden Verkehrsnachfrage. Eine Menge von Zugfahrten derselben Zuggattung, die auf einer bestimmten Strecke dieselbe Folge von Haltebahnhöfen gemeinsam haben, bildet eine Linie.⁵ In dem betrachteten Streckennetz gebe es l_{\max} solcher Linien. Sie werden zu einer Menge \mathcal{L} zusammengefaßt:

$$\mathcal{L} = \{L_1, L_2, \dots, L_{l_{\max}}\} \quad (5.2)$$

Eine Linie hat einen Anfangs- und einen Endbahnhof. Die Anzahl der Bahnhöfe, die eine Linie L_l , $1 \leq l \leq l_{\max}$ miteinander verbindet, wird mit Bf_l bezeichnet. Der i -te Bahnhof der Linie L_l wird mit $S_{l,i}$ bezeichnet, und es sei der Bahnhof $S_{l,1}$ der Anfangsbahnhof und der Bahnhof S_{l,Bf_l} der Endbahnhof der Linie L_l . Auf sämtlichen Linien sollen die Züge nach einem Taktfahrplan verkehren. In einem Betrachtungszeitraum (z.B. an einem Betriebstag) gebe es $Zf_{\max,l}$ Zugfahrten auf der Linie L_l . Die erste Zugfahrt auf Linie L_l im Betrachtungszeitraum soll zum Zeitpunkt $T_{0,l}$ in $S_{l,1}$ beginnen. Die Taktzeit auf Linie L_l betrage $T_{\Pi,l}$ Zeiteinheiten (z.B. Minuten).

³Im Bereich der DB AG sind die Mindestübergangszeiten jedes Umsteigebahnhofes in den Soll-Fahrplan-Tabellen des Kursbuches (vgl. [Deu96a]) angegeben.

⁴Dies ist eine vereinfachende Modellannahme. In der Realität wird die Mindesthaltezeit durch verschiedene Faktoren beeinflusst, die zu unterschiedlichen Mindesthaltezeiten bei verschiedenen Zügen führen können. Vgl. dazu u.a. die Ausführungen zu Abb. 2.1 auf Seite 10 dieser Arbeit. In der überwiegenden Anzahl der Fälle sind in der Realität unabhängig von den eingesetzten Zügen Zeiträume von 1 bis 2 Minuten für die Mindesthaltezeit anzutreffen.

⁵Vgl. Seite 8

In $S_{l,1}$ soll dann planmäßig (d.h. gemäß des auf dieser Linie geltenden Soll-Fahrplanes) zu jedem Zeitpunkt

$$T_{\text{Ab},z,l,1} = T_{0,l} + T_{\Pi,l} \cdot z, \quad z = 0, \dots, \text{Zf}_{\text{max},l} - 1 \quad (5.3)$$

eine Zugfahrt beginnen. Dabei kann z als Zugnummer interpretiert werden. Im Soll-Fahrplan für die Zugfahrten auf der Linie L_l seien weiterhin angegeben

- die planmäßige Beförderungszeit $T_{\text{B},z,l,i}$ des Zuges Nr. z der Linie L_l vom Zeitpunkt der planmäßigen Abfahrt vom Anfangsbahnhof dieser Linie bis zum Zeitpunkt der planmäßigen Ankunft am i -ten Bahnhof dieser Linie,
- die planmäßige Haltezeit $T_{\text{H},z,l,i}$ des Zuges Nr. z der Linie L_l am i -ten Bahnhof dieser Linie. Diese setzt sich zusammen aus der Mindesthaltezeit, der planmäßigen Synchronzeit sowie der planmäßigen Wartezeit infolge belastungsabhängiger Behinderung.⁶

Eine Definition der Linie L_l ist dann durch die Anzahl der Zugfahrten in dem Betrachtungszeitraum, den Abfahrtszeitpunkt der ersten Zugfahrt am Anfangsbahnhof, die Taktzeit, die Folge der Haltebahnhöfe, die planmäßigen Beförderungszeiten vom Anfangsbahnhof zu den Haltebahnhöfen und die planmäßigen Haltezeiten an den Haltebahnhöfen gegeben:

$$L_l = \{(\text{Zf}_{\text{max},l}, T_{0,l}, T_{\Pi,l}), (S_{l,i}, T_{\text{B},z,l,i}, T_{\text{H},z,l,i}, i = 1, \dots, \text{Bf}_l)\} \quad (5.4)$$

wobei $T_{\text{B},z,l,1} = 0$ und $T_{\text{H},z,l,1} = T_{\text{H},z,l,\text{Bf}_l} = 0$ gelten soll. Es sollen hier nur solche Linien betrachtet werden, bei denen die durch die Linie verbundenen Bahnhöfe voneinander verschieden sind, d.h. es soll $S_{l,i} \neq S_{l,j}$ für $i \neq j$ gelten.

Zur Darstellung der zu einem Streckennetz gehörenden Linien wird ein Liniennetz-Graph definiert. Ein Beispiel zu einem Liniennetz-Graphen auf Basis des Streckennetz-Graphen der Abb. 5.1 zeigt Abb. 5.3.

Definition 14 (Liniennetz-Graph) *Es sei $G_S = (V_S, E_S)$ der Graph eines Streckennetzes mit der Bahnhofsmenge \mathcal{S} , und \mathcal{L} sei eine Menge von Linien in diesem Streckennetz. Dann gibt es zu G_S und \mathcal{L} einen Liniennetz-Graphen $G_L = (V_L, E_L)$, der wie folgt definiert ist: Zu jedem $L_l \in \mathcal{L}$ gehört ein Weg in G_S , der Teilgraph von G_S und ein Baum ist. Den Kanten dieses Baumes wird eine Richtung zugewiesen entsprechend der Richtung, wie L_l vom Anfangsbahnhof bis zum Endbahnhof durchlaufen wird. Die Gesamtheit aller dieser gerichteten Bäume für alle $L_l \in \mathcal{L}$ wird zu einem Wald zusammengefaßt, der G_L darstellt.*

⁶Vgl. Abb. 2.1 auf Seite 10

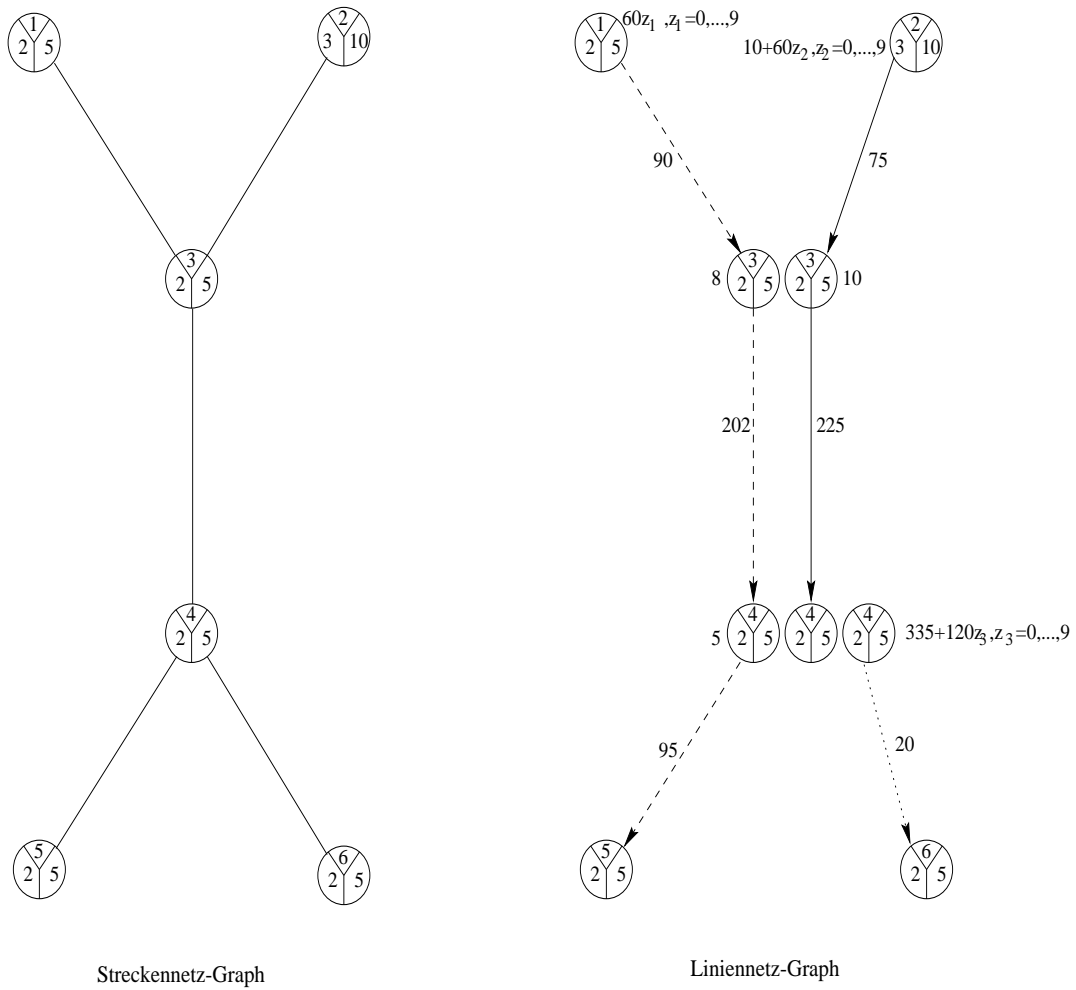


Abbildung 5.3.: Streckennetz- und Liniennetz-Graph

Folgerungen:

- a.) G_L besteht aus genau l_{\max} Zusammenhangskomponenten, die den einzelnen Linien $L_l \in \mathcal{L}$ entsprechen.
- b.) Jeder Knoten w einer solchen Zusammenhangskomponente entspricht einem Bahnhof längs einer Linie. Da es zu jedem Bahnhof aus \mathcal{S} genau ein $v \in V_S$ gibt, gibt es eine eindeutige Abbildung, die jedem $w \in V_L$ genau ein $v \in V_S$ zuweist.
- c.) Umgekehrt gibt es eine eineindeutige Abbildung $V_S \mapsto \mathbf{P}(V_L)$ derart⁷, daß einem $v \in V_S$ alle die $w \in V_L$ zugeordnet sind, die demselben Bahnhof wie auch v entsprechen.
- d.) Diese Abbildung nach c) hat die Eigenschaft, daß jedem Knoten $v_i \in V_S$ genau dann ein $w_{l,i} \in V_L$ zugeordnet wird, wenn der entsprechende Bahnhof ein $S_{l,i}$ ist.
- e.) In G_L werden zwei Knoten $w_{l,j}, w_{l,k} \in V_L$ genau dann durch eine gerichtete Kante $\langle w_{l,j}, w_{l,k} \rangle \in E_L$ miteinander verbunden, wenn die den $w_{l,j}$ und $w_{l,k}$ zugeordneten Bahnhöfe längs einer Linie aufeinanderfolgen, d.h. wenn auf einer Linie L_l ein Bahnhof $S_{l,i}$ dem Knoten $w_{l,j}$ entspricht und ein Bahnhof $S_{l,i+1}$ dem Knoten $w_{l,k}$.
- f.) Die Bäume des Waldes G_L sind spezielle Bäume mit

$$\delta^+(w), \quad \delta^-(w) \in \{0, 1\} \quad \forall w \in V_L$$

Die Knoten und Kanten des Liniennetz-Graphen werden bewertet, so daß die Soll-Fahrpläne einer Linie berücksichtigt sind. Die Bewertung der Knoten in G_L erfolgt in folgender Weise: Jeder Knoten $w \in V_L$ erhält zunächst alle Bewertungen des zugehörigen Knotens des Streckennetz-Graphen. Zusätzlich erhalten die folgenden Knoten weitere Bewertungen:

- Ein Knoten w , der einem Anfangsbahnhof $S_{l,1}$ einer Linie L_l zugeordnet ist, wird mit der Gleichung für die Berechnung der Zugabfahrten am Anfangsbahnhof entsprechend (5.3) bewertet.
- Ein Knoten w , der einem Haltebahnhof $S_{l,i}$ mit $2 \leq i \leq \text{Bf}_l - 1$ einer Linie L_l zugeordnet ist, wird mit der planmäßigen Haltezeit $T_{H,z,l,i}$ bewertet.

Eine Kante $E_L = \langle w_{l,i}, w_{l,i+1} \rangle$ wird mit der Mindestbeförderungszeit $T_{F,z,l,i+1}$ zwischen den längs der Linie L_l benachbarten Bahnhöfen $S_{l,i}$ und $S_{l,i+1}$, die den Knoten $w_{l,i}, w_{l,i+1} \in V_L$ zugeordnet sind, bewertet. Es bedeute

⁷ $\mathbf{P}(V_L)$ bezeichnet die Potenzmenge von V_L

$T_{\text{An},z,l,i}$	der planmäßige Ankunftszeitpunkt des Zuges Nr. z der Linie L_l am i -ten Bahnhof dieser Linie
$T_{\text{Ab},z,l,i}$	der planmäßige Abfahrtszeitpunkt des Zuges Nr. z der Linie L_l am i -ten Bahnhof dieser Linie
$T_{\text{B},z,l,i}$	die planmäßige Beförderungszeit des Zuges Nr. z der Linie L_l vom Endbahnhof dieser Linie bis zum i -ten Bahnhof dieser Linie
$T_{\text{F},z,l,i}$	die Mindestbeförderungszeit des Zuges Nr. z der Linie L_l für die Fahrt auf der Strecke vom $(i - 1)$ -ten zum i -ten Bahnhof dieser Linie

Dann ergibt sich die Mindestbeförderungszeit $T_{\text{F},z,l,i+1}$ als Differenz zwischen der planmäßigen Abfahrtszeit des Zuges Nr. z am i -ten Bahnhof und der planmäßigen Ankunftszeit dieses Zuges am $(i + 1)$ -ten Bahnhof der Linie L_l :

$$T_{\text{F},z,l,i+1} = T_{\text{An},z,l,i+1} - T_{\text{Ab},z,l,i} = T_{\text{B},z,l,i+1} - (T_{\text{B},z,l,i} + T_{\text{H},z,l,i}) \quad (5.5)$$

Beispiel zum Liniennetz-Graphen aus Abb. 5.3:

Zu drei Linien L_i , $i = 1, 2, 3$ gebe es folgende Soll-Fahrpläne:

$Zf_{\text{max},1} = 10$	$Zf_{\text{max},2} = 10$	$Zf_{\text{max},3} = 9$
$T_{0,1} = 0$	$T_{0,2} = 10$	$T_{0,3} = 335$
$T_{\text{II},1} = 60$	$T_{\text{II},2} = 40$	$T_{\text{II},3} = 120$
$S_{1,1} = 1$	$S_{2,1} = 2$	$S_{3,1} = 4$
$T_{\text{B},z,1,1} = 0$	$T_{\text{B},z,2,1} = 0$	$T_{\text{B},z,3,1} = 0$
$T_{\text{H},z,1,1} = 0$	$T_{\text{H},z,2,1} = 0$	$T_{\text{H},z,3,1} = 0$
$S_{1,2} = 3$	$S_{2,2} = 3$	$S_{3,2} = 6$
$T_{\text{B},z,1,2} = 90$	$T_{\text{B},z,2,2} = 75$	$T_{\text{B},z,3,2} = 20$
$T_{\text{H},z,1,2} = 8$	$T_{\text{H},z,2,2} = 10$	$T_{\text{H},z,3,2} = 0$
$S_{1,3} = 4$	$S_{2,3} = 4$	
$T_{\text{B},z,1,3} = 300$	$T_{\text{B},z,2,3} = 310$	
$T_{\text{H},z,1,3} = 5$	$T_{\text{H},z,2,3} = 0$	
$S_{1,4} = 5$		
$T_{\text{B},z,1,4} = 400$		
$T_{\text{H},z,1,4} = 0$		

Damit sind die Linien wie folgt definiert:

$$\begin{aligned} L_1 &= \{(10, 0, 60), (1, 0, 0), (3, 90, 8), (4, 300, 5), (5, 400, 0)\} \\ L_2 &= \{(10, 10, 40), (2, 0, 0), (3, 75, 10), (4, 310, 0)\} \\ L_3 &= \{(9, 335, 120), (4, 0, 0), (6, 20, 0)\} \end{aligned}$$

5.4. Darstellung der Verbindungen

Jede Zugfahrt, die es auf einer Linie gibt, läßt sich zeitlich in folgende Abschnitte unterteilen:

- Abfahrt des Zuges von einem Haltebahnhof,
- Ankunft des Zuges an einem Haltebahnhof,
- Fahrt des Zuges zwischen zwei Haltebahnhöfen,
- Aufenthalt des Zuges an einem Haltebahnhof,

Abfahrt und Ankunft eines Zuges sind dabei Zustände ohne zeitliche Ausdehnung, die im Verlauf der Zugfahrt erreicht werden. Sie stellen Zeitpunkte dar, zu denen der Aufenthalt an einem Haltebahnhof endet und eine Fahrt zum nächsten Haltebahnhof beginnt (Abfahrt) bzw. eine Fahrt endet und ein Aufenthalt beginnt (Ankunft). Fahrten und Aufenthalte sind zeitbeanspruchende Abschnitte einer Zugfahrt mit den Abfahrten und den Ankünften als definierten Anfangs- bzw. Endzeitpunkten. Für Reisende in einem Liniennetz ist es an Umsteigebahnhöfen möglich, die Linie zu wechseln. Es wird nun das Umsteigen von einer Linie L_k auf eine andere Linie L_l an einem Umsteigebahnhof näher betrachtet.

Ein Umsteigebahnhof S_m kann wie folgt charakterisiert werden: Es gibt zwei Linien L_k und L_l mit $k \neq l$ und ein $S_{k,i}$ ($1 \leq i \leq \text{Bf}_k$) sowie ein $S_{l,j}$ ($1 \leq j \leq \text{Bf}_l$) derart, daß $S_{k,i} = S_{l,j} = S_m$ gilt.

Umsteigevorgänge beginnen mit der Ankunft eines Zuges der Linie L_k , und sie enden mit der Abfahrt eines Zuges der anderen Linie L_l am betrachteten Umsteigebahnhof.

Abfahrt und Ankunft eines Zuges können daher im Sinne der Netzplantechnik als Ereignisse verstanden werden und Aufenthalte, Umsteigevorgänge sowie Fahrten als Vorgänge. Durch die Benutzung von Zugfahrten und gegebenenfalls durch Linienwechsel mittels Umsteigen soll von jedem Bahnhof S_i jeder andere Bahnhof S_j ($i \neq j$) durch eine Reise erreicht werden. Zur Darstellung der in einem Liniennetz vorhandenen Reiseverbindungen wird ein (gerichteter) Graph der Reiseverbindungen definiert. Beispiele für derartige Graphen der Reiseverbindungen zeigen die Abb. 5.4 und 5.5 auf den Seiten 59 und 60.

Definition 15 (Graph der Reiseverbindungen) *Es sei $G_L = (V_L, E_L)$ ein Liniennetz-Graph. Dann gibt es hierzu einen Graph der Reiseverbindungen $G_R = (V_R, E_R)$, der wie folgt definiert ist: Es ist $V_R = V_{R_{\text{An}}} \cup V_{R_{\text{Ab}}}$ und $V_{R_{\text{An}}} \cap V_{R_{\text{Ab}}} = \emptyset$. Davon ausgehend, daß in G_L gilt:*

$$\delta^+(w), \quad \delta^-(w) \in \{0, 1\} \quad \forall w \in V_L \quad (5.6)$$

erhält man die $V_{R_{\text{Ab}}}$ durch eine Abbildung $V_L \mapsto V_{R_{\text{Ab}}}$ derart, daß jedem Knoten $w \in V_L$ genau dann ein $u_i \in V_{R_{\text{Ab}}}$ zugeordnet wird, wenn $\delta^+(w) = 1$ ist. Entsprechend erhält man die $V_{R_{\text{An}}}$ durch eine Abbildung $V_L \mapsto V_{R_{\text{An}}}$ derart, daß jedem Knoten $w \in V_L$ genau

dann ein $u_j \in V_{R_{An}}$ zugeordnet wird, wenn $\delta^-(w) = 1$ ist. Zwei Knoten $u_i \in V_{R_{Ab}}$ und $u_j \in V_{R_{An}}$ werden genau dann durch eine gerichtete Kante $e_R = \langle u_i, u_j \rangle$ miteinander verbunden, wenn u_i ein Bahnhof $S_{l,i}$ und u_j ein Bahnhof $S_{l,i+1}$ einer Linie L_l zugeordnet ist. Ferner werden zwei Knoten $u_k \in V_{R_{An}}$ und $u_l \in V_{R_{Ab}}$ dann durch eine gerichtete Kante $e_R = \langle u_k, u_l \rangle$ miteinander verbunden, wenn u_k und u_l derselbe Bahnhof $S_{l,i}$ einer Linie L_l zugeordnet ist. Weiterhin werden zwei Knoten $u_m \in V_{R_{An}}$ und $u_n \in V_{R_{Ab}}$ dann durch eine gerichtete Kante $e_R = \langle u_m, u_n \rangle$ miteinander verbunden, wenn u_m ein Bahnhof $S_{k,i}$ einer Linie L_k und u_n ein Bahnhof $S_{l,j}$ einer Linie L_l zugeordnet ist und $S_{k,i} = S_{l,j}$ gilt.

Bezeichnung 5 $V_{R_{Ab}}$ ist die Menge der Abfahrtsknoten, und $V_{R_{An}}$ ist die Menge der Ankunfts-knoten. Ein zu $S_{l,i}$ gehörender Abfahrtsknoten wird mit $S_{l,i}^{Ab}$ und ein zu $S_{l,i}$ gehörender Ankunfts-knoten mit $S_{l,i}^{An}$ bezeichnet.

Auf diese Weise werden Fahrtvorgänge zwischen zwei längs einer Linie L_l aufeinanderfolgenden Bahnhöfen $S_{l,i}$ und $S_{l,i+1}$ in G_R durch eine gerichtete Kante $e_R = \langle S_{l,i}^{Ab}, S_{l,i+1}^{An} \rangle$ und Aufenthalte an einem Bahnhof $S_{l,i}$ durch eine gerichtete Kante $e_R = \langle S_{l,i}^{An}, S_{l,i}^{Ab} \rangle$ dargestellt. Ein Umsteigevorgang von einer Linie L_k auf eine andere Linie L_l an einem Umsteigebahnhof $S_{k,i} = S_{l,j}$ wird durch eine gerichtete Kante $e_R = \langle S_{k,i}^{An}, S_{l,j}^{Ab} \rangle$ repräsentiert.

Ein derartiger Graph der Reiseverbindungen eignet sich zur Veranschaulichung folgender Angaben:

- geplante Fahr-, Halte- und Umsteigezeiten gemäß Soll-Fahrplan,
- bei bestimmten Zugfahrten realisierte Fahr-, Halte- und Umsteigezeiten,
- Anzahl der Reisenden, die mit einem bestimmten Zug eine Reise beginnen,
- Anzahl der Reisenden in einem Zug während bestimmter Fahrt- und Haltevorgänge,
- Anzahl der umsteigenden Reisenden von einer auf eine andere Zugfahrt an den Umsteigebahnhöfen,
- Anzahl der Reisenden, die mit einem bestimmten Zug eine Reise beenden

Verschiedene Sachverhalte werden mit Hilfe eines solchen Graphen der Reiseverbindungen dargestellt, und je nach dem Darstellungszweck werden die Knoten und Kanten von G_R unterschiedlich bewertet. Zur Darstellung der zeitlichen Aspekte werden die Knoten mit den Abfahrts- bzw. Ankunftszeiten der betrachteten Zugfahrt, die Kanten mit den geplanten oder realisierten Fahrt-, Halte- und Umsteigezeiten bewertet. Um die Verkehrsnachfrage darzustellen, werden Abfahrtsknoten mit der Anzahl der Reisenden, die am betrachteten Bahnhof eine Reise beginnen, Ankunfts-knoten mit der Anzahl der Reisenden, die am betrachteten Bahnhof eine Reise beenden und Kanten mit der Anzahl

der Reisenden, die sich auf einer Fahrt befinden, an einem Bahnhof umsteigen bzw. in ihrem Zug verbleiben bewertet.

Die Darstellung der Ist-Fahrpläne und der Verkehrsnachfrage ist in diesem Falle statisch, d.h. sie bezieht sich auf bestimmte Zugfahrten.

Beispiele für die Darstellung von Verkehrsnachfrage und Soll-Zeiten auf Basis des in Abb. 5.3 gezeigten Liniennetzes zeigen die Abbildungen 5.4 und 5.5. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind dort die Ankunfts-knoten grau hinterlegt und die die Umsteigevorgänge repräsentierenden Kanten gestrichelt gezeichnet.

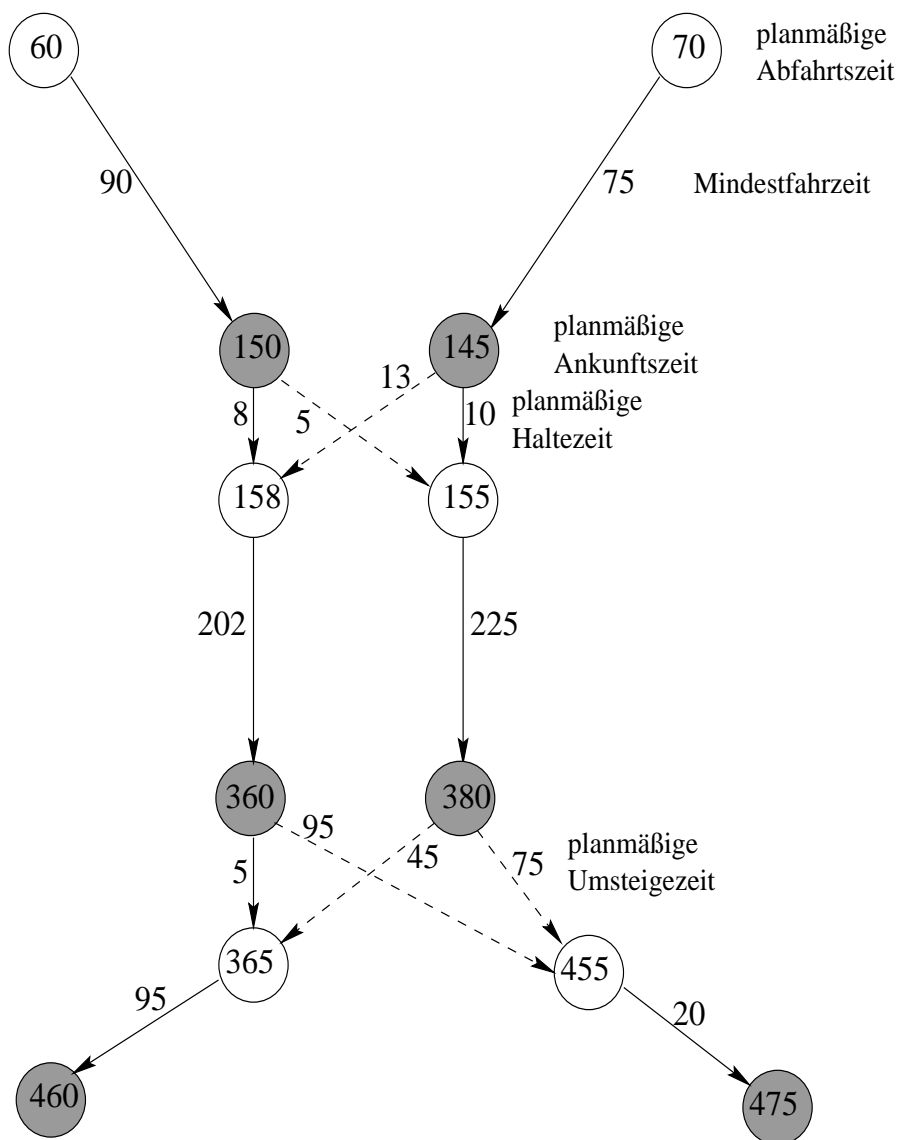


Abbildung 5.4.: Graph der Reiseverbindungen: Soll-Zeiten

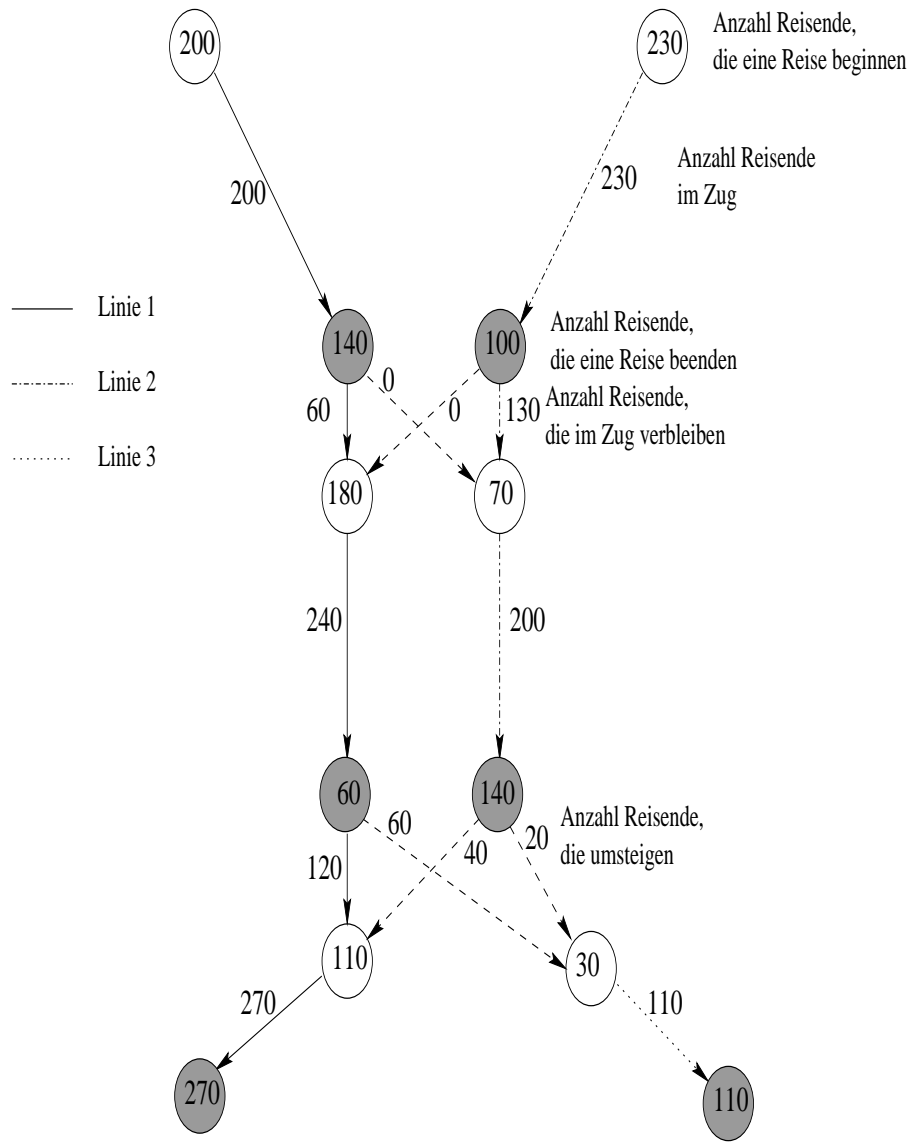


Abbildung 5.5.: Graph der Reiseverbindungen: Verkehrsnachfrage

5.5. Modellierung des Eisenbahnbetriebes

5.5.1. Verspätungen

Es sei

- $T_{Ab,z,l,s}$ der planmäßige Abfahrtszeitpunkt des Zuges Nr. z der Linie L_l am s -ten Bahnhof dieser Linie
- $T_{An,z,l,s}$ der planmäßige Ankunftszeitpunkt des Zuges Nr. z der Linie L_l am s -ten Bahnhof dieser Linie
- $t_{Ab,z,l,s}$ der realisierte Abfahrtszeitpunkt des Zuges Nr. z der Linie L_l am s -ten Bahnhof dieser Linie
- $t_{An,z,l,s}$ der realisierte Ankunftszeitpunkt des Zuges Nr. z der Linie L_l am s -ten Bahnhof dieser Linie
- $t_{AD,z,l,s}$ die Ankunftsverspätung (arrival delay) des Zuges Nr. z auf Linie L_l bei seiner Ankunft am s -ten Bahnhof dieser Linie
- $t_{DD,z,l,s}$ die Abfahrtsverspätung (departure delay) des Zuges Nr. z auf Linie L_l bei seiner Abfahrt vom s -ten Bahnhof dieser Linie
- $t_{ID,z,l,s}$ die Zuwachsverspätung (incremental delay), die bei Zug Nr. z auf der Linie L_l bei seiner Fahrt auf der Strecke vom $(s-1)$ -ten zum s -ten Bahnhof dieser Linie auftritt

Zeiten im Eisenbahnbetrieb werden zur vollen Minute diskretisiert. Es wird dabei immer ausgehend vom genannten Zeitpunkt auf die vorhergehende volle Minute abgerundet. Die Minutenzählung an einem Betriebstag erfolgt dabei fortlaufend in Minuten nach Mitternacht, d.h. 00:00 Uhr entspricht Minute 0 und 23:59 Uhr entspricht Minute 1439. Damit gilt:

$$T_{Ab,z,l,s}, T_{An,z,l,s}, t_{Ab,z,l,s}, t_{An,z,l,s}, t_{DD,z,l,s} \in \mathbb{N}_0$$

$$t_{ID,z,l,s}, t_{AD,z,l,s} \in \mathbb{Z}$$

Im Reiseverkehr dürfen Züge nicht vor ihrer planmäßigen Abfahrtszeit abfahren. Eine verfrühte Abfahrt, die zu einer negativen Abfahrtsverspätung führt, ist damit ausgeschlossen. Eine negative Zuwachs- und Ankunftsverspätung ist jedoch durchaus möglich, wie im folgenden gezeigt wird.

Es gilt für die Ankunfts- und die Abfahrtsverspätung einer Zugfahrt an einem Bahnhof:

$$t_{AD,z,l,s} = t_{An,z,l,s} - T_{An,z,l,s} \quad (5.7)$$

$$t_{DD,z,l,s} = t_{Ab,z,l,s} - T_{Ab,z,l,s} \quad (5.8)$$

Daraus läßt sich die Zuwachsverspätung (incremental delay) $t_{ID,z,l,s}$, die bei Zugfahrt Nr. z der Linie l zwischen dem $(s - 1)$ -ten und dem s -ten Bahnhof aufgetreten ist, als

$$t_{ID,z,l,s} = t_{F,z,l,s} - T_{F,z,l,s} \quad (5.9)$$

$$= t_{An,z,l,s} - t_{Ab,z,l,s-1} - (T_{An,z,l,s} - T_{Ab,z,l,s-1}) \quad (5.10)$$

$$= t_{AD,z,l,s} - t_{DD,z,l,s-1} \quad (5.11)$$

bestimmen.

Es kann vorkommen, daß die durch Regel- und Sonderzuschläge vorgesehenen Zeitreserven nicht ausgeschöpft werden und eine Zugfahrt daher einen Streckenabschnitt in kürzerer Zeit durchfährt, als es im Soll-Fahrplan vorgesehen ist. Eine Zuwachsverspätung nimmt dann einen negativen Wert $t_{ID,z,l,s} < 0$ an. Solche Verkürzungen der Mindestfahrzeit können dazu eingesetzt werden, vorhandene Verspätungen zu vermindern. Es läßt sich aus (5.5), (5.7) und (5.9) zeigen, daß $t_{ID,z,l,s} < 0$ genau dann eintritt, wenn die realisierte Beförderungszeit $t_{F,z,l,s}$ der Zugfahrt Nr. z der Linie L_l vom $(s - 1)$ -ten Bahnhof zum s -ten Bahnhof kleiner ist als deren Mindestbeförderungszeit $T_{F,z,l,s}$, d.h. es gilt

$$t_{ID,z,l,s} < 0 \Leftrightarrow t_{F,z,l,s} < T_{F,z,l,s} \quad (5.12)$$

Um die Möglichkeit negativer Zuwachsverspätungen simulieren zu können, soll nun bestimmt werden, wie hoch die größte negative Zuwachsverspätung auf einem Streckenabschnitt zwischen dem $(s - 1)$ -ten Bahnhof zum s -ten Bahnhof einer Linie L_l maximal sein kann. Es seien dazu aus der Liniendefinition (vgl. (5.4) auf Seite 53) die planmäßigen Beförderungszeiten $T_{B,z,l,s}$ vom Anfangsbahnhof zu den Haltebahnhöfen und die planmäßigen Haltezeiten $T_{H,z,l,s}$ an den Haltebahnhöfen bekannt. Ferner sei ein Regelzuschlag als Prozentwert der reinen Fahrzeit gegeben, der im Mindestfahrzeitanteil der planmäßigen Beförderungszeit enthalten ist. Sonderzuschläge werden im folgenden nicht explizit ausgewiesen (sie können jedoch in der Mindestfahrzeit enthalten sein), weil diese je nach der Strecke unterschiedlich hoch sein können sowie davon abhängig sind, ob es auf der Strecke beispielsweise Langsamfahrstellen oder Baustellen gibt und sich daher häufiger ändern. Auch Haltezeitanteile für eventuelle Betriebshalte zwischen dem $(s - 1)$ -ten Bahnhof und dem s -ten Bahnhof der Linie L_l werden hier nicht explizit berücksichtigt, es wird jedoch davon ausgegangen, daß diese im Zeitbedarf für die Zugfahrt zwischen diesen beiden Bahnhöfen implizit enthalten sind.

Mit den Angaben der Liniendefinition wird zunächst aus (5.5) die Mindestbeförderungszeit $T_{F,z,l,s}$ vom $(s - 1)$ -ten Bahnhof zum s -ten Bahnhof der Linie L_l bestimmt:

$$T_{F,z,l,s} = T_{B,z,l,s} - (T_{B,z,l,s-1} + T_{H,z,l,s-1}) \quad (5.13)$$

Es bezeichne $T_{F_{rein},z,l,s}$ die reine Fahrzeit einer Zugfahrt z der Linie L_l vom $(s - 1)$ -ten Bahnhof zum s -ten Bahnhof dieser Linie. Die Größe T_{Zuschl} mit $0 \leq T_{Zuschl} \leq 1$ bezeichne einen Regelzuschlag, der als Prozentsatz der reinen Fahrzeit angegeben ist. Er sei für

alle Züge einheitlich.⁸ Es gilt also für die Mindestbeförderungszeit

$$T_{F,z,l,s} = T_{F_{\text{rein}},z,l,s} \cdot (1 + T_{\text{Zuschl}}) \quad (5.14)$$

Die reine Fahrzeit kann unter normalen Bedingungen bei Beachtung eisenbahntechnischer und eisenbahnbetrieblicher Vorschriften und bei vorschriftsmäßiger Ausnutzung der Antriebs- und Bremsfähigkeiten der Fahrzeuge nicht unterschritten werden. Für den Fall einer negativen Zuwachsverspätung $t_{\text{ID},z,l,s} < 0$ liegt die realisierte Fahrzeit vom $(s - 1)$ -ten Bahnhof zum s -ten Bahnhof einer Linie L_l grundsätzlich zwischen der reinen Fahrzeit und der Mindestbeförderungszeit auf diesem Streckenabschnitt:

$$T_{F_{\text{rein}},z,l,s} \leq t_{F,z,l,s} < T_{F,z,l,s} \quad (5.15)$$

Die negative Zuwachsverspätung bei der Fahrt vom $(s - 1)$ -ten Bahnhof zum s -ten Bahnhof einer Linie L_l wird dann maximal, wenn die reine Fahrzeit auf diesem Streckenabschnitt realisiert wird, wenn also gilt $t_{F,z,l,s} = T_{F_{\text{rein}},z,l,s}$. In diesem Fall beträgt die negative Zuwachsverspätung

$$\begin{aligned} t_{\text{ID},z,l,s} &= T_{F_{\text{rein}},z,l,s} - T_{F,z,l,s} \\ &= \frac{T_{F,z,l,s}}{1 + T_{\text{Zuschl}}} - T_{F,z,l,s} \\ &= -\frac{T_{F,z,l,s} \cdot T_{\text{Zuschl}}}{1 + T_{\text{Zuschl}}} \end{aligned} \quad (5.16)$$

Damit kann die maximale negative Zuwachsverspätung aus vorgegebenen Größen bestimmt werden.

Das Ausschöpfen von Fahrzeitzuschlägen ist geeignet, bereits vorhandene Verspätungen durch die Realisierung negativer Zuwachsverspätungen abzubauen. Falls der Fahrzeitzuschlag gleichmäßig über den gesamten Streckenabschnitt zwischen dem $(s - 1)$ -ten und dem s -ten Bahnhof einer Linie verteilt ist, steht zum Verspätungsabbau jeweils der zum Restweg gehörende Anteil des Fahrzeitzuschlages zur Verfügung. In dem Simulationsmodell dieser Arbeit wird dagegen angenommen, daß immer der gesamte Fahrzeitzuschlag des Streckenabschnittes vom $(s - 1)$ -ten Bahnhof zum s -ten Bahnhof einer Linie zum Verspätungsabbau nutzbar ist. Die Fahrzeitreserven, die durch den Regelzuschlag einfließen, sind in absoluten Zeiten gemessen nicht sehr hoch: Bei einer planmäßigen Beförderungszeit zwischen zwei Haltebahnhöfen von 100 Minuten (ein so großer Abstand zwischen zwei Haltebahnhöfen ist sogar auf Linien des Fernverkehrs der Deutschen Bahn AG sehr selten anzutreffen) und einem Regelzuschlag von 4% der reinen Fahrzeit beträgt der Fahrzeitzuschlag lediglich knappe vier Minuten. Damit im Simulationsmodell überhaupt nennenswerte Effekte des Verspätungsabbaus durch das Nichtausschöpfen von Fahrzeitzuschlägen berücksichtigt werden können, wird bei negativen Zuwachsverspätungen davon ausgegangen, daß immer die reine Fahrzeit bei der Fahrt auf diesem

⁸Dies ist eine vereinfachende Annahme. Vgl. auch Tab. 2.1 auf S. 12 dieser Arbeit.

gesamten Streckenabschnitt realisiert werden kann. Das Prinzip des Verspätungsabbaus durch das Ausschöpfen eines Fahrzeitzuschlags zeigt Abbildung 5.6.⁹ Für eine Betrachtung und die Bestimmung positiver Zuwachsverspätungen wird auf Abschnitt 6.3.6.2 ab Seite 127 dieser Arbeit verwiesen.

5.5.2. Anschlüsse an Umsteigebahnhöfen

5.5.2.1. Planmäßiges Anschlußgeschehen

Umsteigevorgänge sind für Reisende in einem Eisenbahnnetz mindestens dann erforderlich, wenn Start- und Zielbahnhof der Reise nicht Bestandteil derselben Linie sind. Diese Umsteigevorgänge finden an Umsteigebahnhöfen statt, an denen mindestens zwei Linien miteinander verknüpft werden. Besteht an einem Umsteigebahnhof eine große Nachfrage nach einer Möglichkeit, von einer Linie L_k auf eine andere Linie L_l umzusteigen, sind Eisenbahnbetriebsunternehmen meist bestrebt, als Ausdruck der Kundenorientierung im Soll-Fahrplan eine zeitlich günstige Möglichkeit des Umsteigens vorzusehen.

Es sei $T_{Um,y,k \rightarrow l,i}$ die planmäßige Umsteigezeit für das Umsteigen von Zug Nr. y der Linie L_k auf den nächsten planmäßigen Anschlußzug der Linie L_l am i -ten Bahnhof der Linie L_k . $T_{MÜZ,m}$ ist die Mindestübergangszeit an Bahnhof S_m , wobei

$$S_m = S_{k,i} = S_{l,j}$$

gelten soll. Ein planmäßiger Anschluß liegt dann vor, wenn

$$T_{Um,y,k \rightarrow l,i} \geq T_{MÜZ,m} \quad \text{mit} \quad (5.17)$$

$$T_{Um,y,k \rightarrow l,i} = T_{Ab,z^*,l,j} - T_{An,y,k,i} \quad (5.18)$$

gilt und dies den Reisenden in einem öffentlichen Fahrplan bekanntgemacht wird. Dabei bezeichnet z^* die Zugnummer desjenigen Zuges, mit dem die Reisenden gemäß Reise-fahrplan ihre Reise nach dem Umsteigen fortsetzen sollen. Bei planmäßigem Betrieb ist dies der planmäßige Anschlußzug mit der Zugnummer

$$z^* = \min\{z \mid T_{Ab,z,l,j} - T_{An,y,k,i} \geq T_{MÜZ,m}\} \quad (5.19)$$

Es gelten folgende Zusammenhänge (siehe zur Verdeutlichung Abb. 5.7 auf Seite 67):

$$T_{Um,y,k \rightarrow l,i} = T_{Ab,z^*,l,j} - T_{An,y,k,i} \quad (5.20)$$

$$= T_{An,z^*,l,j} + T_{H,z^*,l,j} - T_{An,y,k,i} \quad (5.21)$$

Die planmäßige Haltezeit $T_{H,z^*,l,j}$ des Zuges Nr. z^* der Linie L_l am j -ten Bahnhof dieser Linie setzt sich entsprechend der Darstellung in Abb. 5.7 auf Seite 67 wie folgt zusammen:

$$T_{H,z^*,l,j} = T_{H_{min},z^*,l,j} + T_{Sy,z^*,l,j} + T_{W,z^*,l,j} \quad (5.22)$$

⁹Vgl. dazu auch [Müh90] und [KW87]

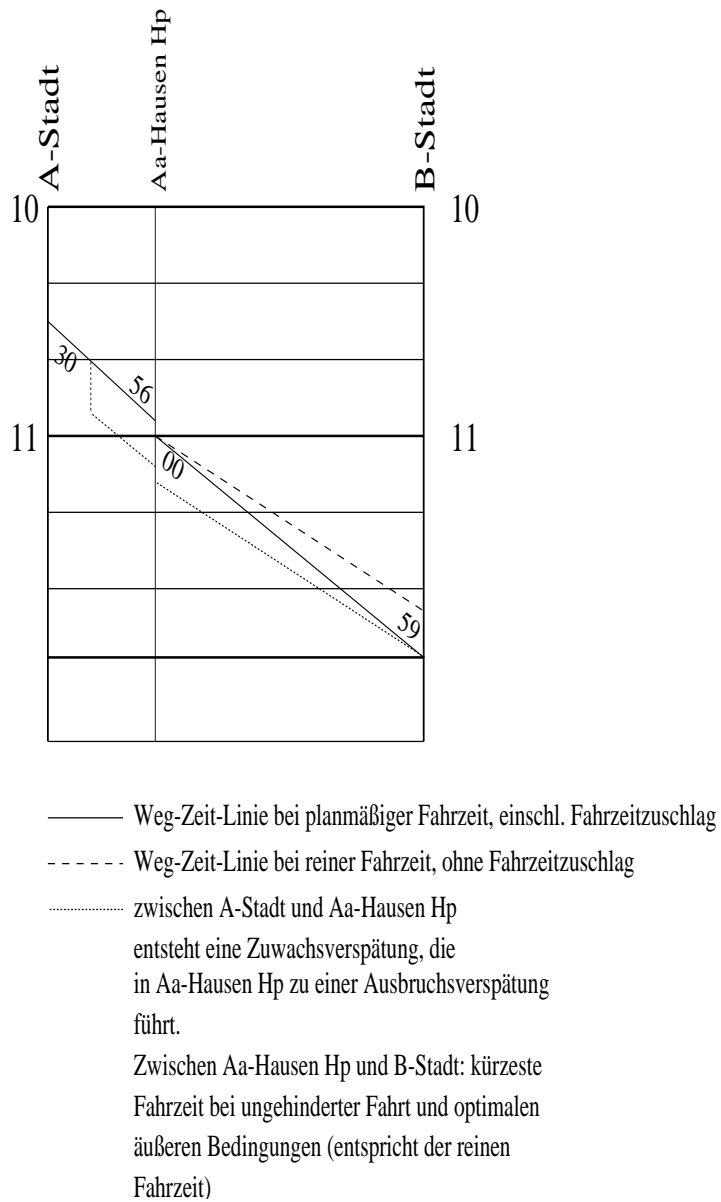


Abbildung 5.6.: Verspätungsabbau durch das Ausschöpfen des Fahrzeitzuschlags

Dabei bezeichnet $T_{H_{\min},z^*,l,j}$ die Mindesthaltezeit des Zuges Nr. z^* auf Linie L_l am j -ten Bahnhof dieser Linie, $T_{Sy,z^*,l,j}$ die planmäßige Synchronzeit des anschlußaufnehmenden Zuges Nr. z^* der Linie L_l am j -ten Bahnhof dieser Linie, und $T_{W,z^*,l,j}$ bezeichnet die planmäßige Wartezeit des Zuges Nr. z^* der Linie L_l am j -ten Bahnhof dieser Linie. Durch das Vorsehen einer planmäßigen Wartezeit wird die Abfahrt des Zuges zeitlich verlegt, um eventuelle Belegungskonflikte durch gleichzeitige Belegung desselben Streckenabschnittes durch mindestens zwei Zugfahrten zu vermeiden. Wird (5.22) in (5.21) eingesetzt, so ergibt sich

$$T_{Um,y,k \rightarrow l,i} = T_{An,z^*,l,j} + T_{H_{\min},z^*,l,j} + T_{Sy,z^*,l,j} + T_{W,z^*,l,j} - T_{An,y,k,i} \quad (5.23)$$

Ein Zug kann grundsätzlich nach seiner planmäßigen Ankunftszeit frühestens dann abfahren, wenn die verkehrlich und betrieblich notwendige Mindesthaltezeit verstrichen ist. Die frühestmögliche Abfahrtszeit $T_{Ab^*,z,l,j}$ eines Zuges ergibt sich also als

$$T_{Ab^*,z,l,j} = T_{An,z,l,j} + T_{H_{\min},z,l,j} \quad (5.24)$$

Vorausgesetzt, daß keine Anschlüsse sicherzustellen sind und es zu keinen Belegungskonflikten bei der Abfahrt des Zuges kommt, könnte ein Zug zu seiner frühestmöglichen Abfahrtszeit abfahren.

Sind jedoch Anschlüsse sicherzustellen, so richtet sich die Bemessung der planmäßigen Synchronzeit nach den planmäßigen Ankunftszeiten und den Mindesthaltezeiten der am Anschluß beteiligten Züge sowie nach der Mindestübergangszeit am betrachteten Umsteigebahnhof. Zum Umsteigen wird mindestens die Mindestübergangszeit $T_{MÜZ,m}$ benötigt. Wenn

$$T_{An,y,k,i} + T_{MÜZ,m} = T_{Ab,z^*,l,j} \quad (5.25)$$

zutrifft, haben Umsteigende gerade die benötigte Mindestumsteigezeit dazu zur Verfügung. Es ist nun der Zeitraum zu bestimmen, um den die frühestmögliche Abfahrtszeit zu ergänzen ist, damit (5.25) zutrifft. Dies ist die planmäßige Synchronzeit $T_{Sy,z^*,l,j}$, die dem Anschlußzug eingeräumt werden muß, um einen Anschluß sicherzustellen. Das bedeutet, mit einer planmäßigen Abfahrtszeit

$$T_{Ab,z^*,l,j} = T_{Ab^*,z^*,l,j} + T_{Sy,z^*,l,j} \quad (5.26)$$

wird der Anschlußzug gerade erreicht. Wird (5.26) umgeformt und (5.25) für $T_{Ab,z^*,l,j}$ eingesetzt, so ergibt sich die gesuchte planmäßige Synchronzeit als

$$T_{Sy,z^*,l,j} = T_{An,y,k,i} + T_{MÜZ,m} - T_{Ab^*,z^*,l,j} \quad (5.27)$$

Ist nun noch zu berücksichtigen, daß es bei der Abfahrt zum Zeitpunkt

$$T_{Ab,z^*,l,j} = T_{Ab^*,z^*,l,j} + T_{Sy,z^*,l,j}$$

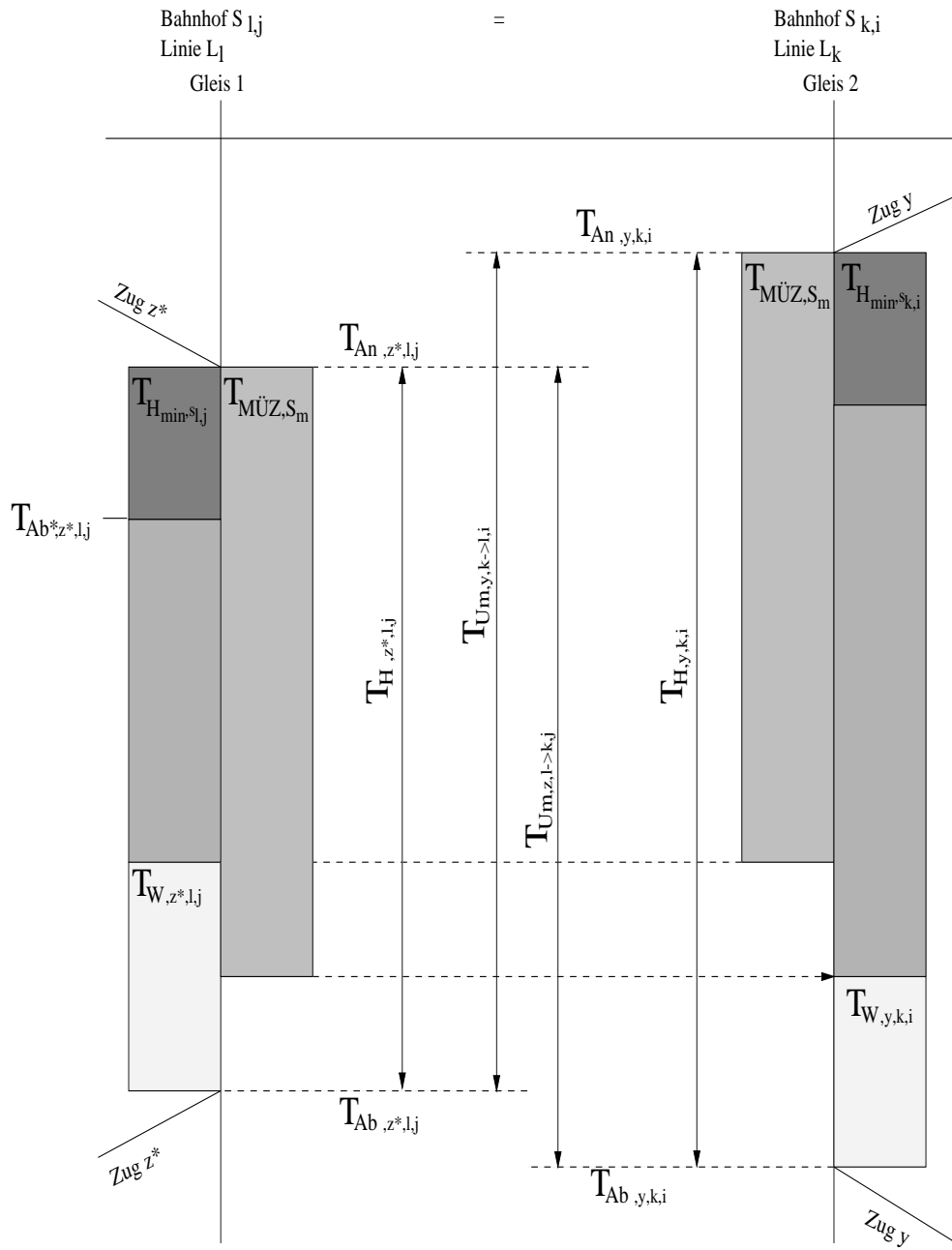


Abbildung 5.7.: Zeitanteile der an einem Anschluß beteiligten Zugfahrten

zu Belegungskonflikten mit anderen, planmäßig verkehrenden Zugfahrten kommen kann, muß der Zeitpunkt der Abfahrt weiter verzögert werden, indem dem Anschlußzug eine planmäßige Wartezeit eingeräumt wird:

$$T_{\text{Ab},z^*,l,j} = T_{\text{Ab}^*,z^*,l,j} + T_{\text{Sy},z^*,l,j} + T_{\text{W},z^*,l,j} \quad (5.28)$$

Diese weitere Abfahrtverzögerung ist für die Gewährleistung des Anschlusses unkritisch, da die Mindestübergangszeit auch bereits ohne die planmäßige Wartezeit eingehalten wird.

5.5.2.2. Außerplanmäßiges Anschlußgeschehen

Bisher wurde davon ausgegangen, daß die Zugfahrten nach ihrem Soll-Fahrplan verkehren. In diesem Abschnitt wird das Anschlußgeschehen für den Fall betrachtet, daß Zugfahrten von den in ihren Soll-Fahrplänen angegebenen Zeiten abweichen. Es wird dazu wieder ein Umsteigebahnhof S_m mit

$$S_m = S_{k,i} = S_{l,j}$$

betrachtet. In Analogie zum planmäßigen Anschlußgeschehen sei $t_{\text{Um},y,k \rightarrow l,i}$ die tatsächlich vorhandene Umsteigezeit für das Umsteigen von Zug Nr. y der Linie L_k auf den im Reisefahrplan vorgesehenen Anschlußzug der Linie L_l am i -ten Bahnhof der Linie L_k . Auch bei verspäteter Ankunft des Zubringerzuges Nr. y der Linie L_k wird zum Umsteigen auf den im Reisefahrplan vorgesehenen Anschlußzug der Linie L_l mindestens die Mindestübergangszeit benötigt, damit ein Anschluß vorliegt. Es muß also gelten:

$$t_{\text{Um},y,k \rightarrow l,i} \geq T_{\text{MÜZ},m} \quad \text{mit} \quad (5.29)$$

$$t_{\text{Um},y,k \rightarrow l,i} = t_{\text{Ab},z^*,l,j} - t_{\text{An},y,k,i} \quad (5.30)$$

$$= t_{\text{An},z^*,l,j} + t_{\text{H},z^*,l,j} - t_{\text{An},y,k,i} \geq T_{\text{MÜZ},m} \quad (5.31)$$

Die Gleichung (5.31) soll *Anschlußbedingung* genannt werden. Dabei bezeichnet z^* wieder die Zugnummer desjenigen Zuges, mit dem die Reisenden gemäß Reisefahrplan ihre Reise nach dem Umsteigen fortsetzen sollen.

Entsprechend (5.24) könnte der Anschlußzug grundsätzlich zu seiner frühestmöglichen Abfahrtszeit

$$t_{\text{Ab}^*,z,l,j} = t_{\text{An},z^*,l,j} + T_{\text{H}_{\text{min}},z^*,l,j} \quad (5.32)$$

abfahren. Im Reiseverkehr gilt jedoch die Bestimmung, daß ein Reisezug in keinem Fall vor seiner planmäßigen Abfahrtszeit abfahren darf. Falls also

$$t_{\text{An},z,l,j} + T_{\text{H}_{\text{min}},z,l,j} \leq T_{\text{Ab},z,l,j}$$

für einen beliebigen Zug z zutrifft, darf der Zug dennoch frühestens zu seiner planmäßigen Abfahrtszeit $T_{\text{Ab},z,l,j}$ abfahren. Trifft anderenfalls

$$t_{\text{An},z,l,j} + T_{\text{H}_{\text{min}},z,l,j} > T_{\text{Ab},z,l,j}$$

zu, so kann der Zug nach seiner tatsächlichen Ankunftszeit frühestens abfahren, nachdem die Mindesthaltezeit verstrichen ist. Damit ergibt sich die frühestmögliche Ist-Abfahrtszeit des Anschlußzuges als

$$t_{Ab^*,z,l,j} = \max\{T_{Ab,z^*,l,j}, t_{An,z^*,l,j} + T_{H_{min},z^*,l,j}\} \quad (5.33)$$

Vorausgesetzt, daß keine Anschlüsse sicherzustellen sind und es zu keinen Belegungskonflikten bei der Abfahrt des Zuges kommt, könnte ein Zug zu dieser frühestmöglichen Ist-Abfahrtszeit abfahren. In (5.33) sind jedoch die tatsächliche Ankunftszeit des Zubringerzuges sowie die Mindestübergangszeit nicht berücksichtigt und damit auch nicht die Anschlußbedingung (5.31).

Auch in dem Fall, daß Zugfahrten von ihren Soll-Fahrplänen abweichen, wird zum Umsteigen mindestens die Mindestübergangszeit $T_{MÜZ,m}$ benötigt. Wenn

$$t_{An,y,k,i} + T_{MÜZ,m} = t_{Ab,z^*,l,j} \quad (5.34)$$

zutrifft, haben Umsteigende gerade die benötigte Mindestumsteigezeit dazu zur Verfügung. Es ist nun der Zeitraum zu bestimmen, um den die frühestmögliche Ist-Abfahrtszeit (5.33) zu ergänzen ist, damit (5.34) zutrifft. Dies ist die außerplanmäßige Synchronzeit $t_{Sy,z^*,l,j}$, die dem Anschlußzug eingeräumt werden muß, um einen Anschluß sicherzustellen. Das bedeutet, mit einer tatsächlichen Abfahrtszeit

$$t_{Ab,z^*,l,j} = t_{Ab^*,z^*,l,j} + t_{Sy,z^*,l,j} \quad (5.35)$$

wird der Anschlußzug gerade erreicht. Wird (5.35) umgeformt und (5.34) für $t_{Ab,z^*,l,j}$ eingesetzt, so ergibt sich die gesuchte planmäßige Synchronzeit als

$$t_{Sy,z^*,l,j} = t_{An,y,k,i} + T_{MÜZ,m} - t_{Ab^*,z^*,l,j} \quad (5.36)$$

Ist auch noch zu berücksichtigen, daß es bei einer Abfahrt zum Zeitpunkt

$$t_{Ab,z^*,l,j} = t_{Ab^*,z^*,l,j} + t_{Sy,z^*,l,j}$$

zu Belegungskonflikten mit anderen, planmäßig oder außerplanmäßig verkehrenden Zugfahrten kommen kann, so muß der Zeitpunkt der Abfahrt noch weiter verzögert werden, indem dem Anschlußzug eine außerplanmäßige Wartezeit eingeräumt wird. Auf die Berücksichtigung derartiger außerplanmäßiger Wartezeiten wird jedoch in dem Simulationsmodell dieser Arbeit verzichtet, denn um diese einbeziehen zu können, müßten sämtliche Zugfahrten (also auch Güterzug- und Rangierfahrten), die Gleispläne der Strecken und Bahnhöfe sowie die Gleisbelegungen der Zugfahrten modelliert werden. Dies ist aber aus Gründen der Datenbeschaffung und der Modellkomplexität hier nicht praktikabel. Die Gewährung einer außerplanmäßigen Synchronzeit bei Anschlußzügen mit dem Ziel, auch im Falle einer Ankunftsverspätung des Zubringerzuges Anschlüsse sicherzustellen, bedeutet ein absichtliches Hinauszögern der Abfahrt über den frühestmöglichen

Zeitpunkt hinaus. Dementsprechend kann hier eine Abfahrtverspätung beim Anschlußzug entstehen oder sich weiter erhöhen. Eine Ankunftsverspätung eines Zubringerzuges kann sich also auf einen Anschlußzug übertragen. Um die derart übertragenen Abfahrtverspätungen zu begrenzen, ist es sinnvoll, eine obere Schranke für die außerplanmäßige Synchronzeit festzulegen. Bei der Festlegung dieser maximalen außerplanmäßigen Synchronzeit ist es zweckmäßig, die Taktzeit und gegebenenfalls die Zugattung der Anschluß- und der Zubringerlinie zu berücksichtigen. Daher ist die maximale außerplanmäßige Synchronzeit linienabhängig.¹⁰ Es bezeichne deshalb $T_{\text{Sy}_{\max},k \rightarrow l}$ diese maximale außerplanmäßige Synchronzeit für alle Züge der Linie L_l , um Anschlußreisende der Linie L_k aufzunehmen. Für die außerplanmäßige Synchronzeit soll also immer

$$t_{\text{Sy},z^*,l,j} \leq T_{\text{Sy}_{\max},k \rightarrow l} \quad (5.37)$$

gelten. Wenn ein Anschluß auf den Zug Nr. z^* der Linie L_l aufgrund der Ankunftsverspätung des Zubringerzuges Nr. y der Linie L_k nur noch durch ein Überschreiten der $T_{\text{Sy}_{\max},k \rightarrow l}$ zu erreichen wäre, dann ist dieser Anschluß aufzugeben. In diesem Fall kommt es zu einem Anschlußkonflikt, bei dem die umsteigenden Reisenden ihren nach dem Reisefahrplan vorgesehenen Anschlußzug z^* nicht mehr erreichen und stattdessen einen darauffolgenden Zug $z > z^*$ der Anschlußlinie abwarten müssen.

Bislang sind die Linien mit ihren Soll-Fahrplänen definiert. Ferner ist bekannt, daß Züge auf einer Fahrt zwischen zwei benachbarten Bahnhöfen eine Zuwachsverspätung erhalten können. Mit diesen Angaben sollen nun außerplanmäßige Synchronzeiten, tatsächliche Haltezeiten und tatsächliche Abfahrtszeiten der Zugfahrten bestimmt werden.

Für eine Simulation des Anschlußgeschehens kommt es zunächst darauf an, aus den Liniendefinitionen und den Zuwachsverspätungen die tatsächlichen Ankunftszeiten der Züge an den Haltebahnhöfen der Linie zu bestimmen. Entsprechend soll $t_{\text{H},z,l,j}$ die realisierte Haltezeit des Zuges Nr. z der Linie L_l am j -ten Bahnhof dieser Linie bezeichnen. Um die außerplanmäßigen Synchron- und Umsteigezeiten aus den Fahrplandaten der Liniendefinition (vgl. Gleichung (5.4) auf Seite 53) und den entstandenen Zuwachsverspätungen berechnen zu können, bedarf es zunächst der folgenden Umformungen, aus denen sich die tatsächliche Ankunftszeit des Zuges Nr. y der Linie L_k am i -ten Bahnhof dieser Linie unter Berücksichtigung von auftretenden Zuwachsverspätungen wie folgt berechnen läßt:

$$\begin{aligned} t_{\text{An},y,k,i} &= T_{\text{Ab},y,k,1} + t_{\text{DD},y,k,1} \\ &\quad + T_{\text{F},y,k,2} + t_{\text{ID},y,k,2} + t_{\text{H},y,k,2} \\ &\quad + \dots + T_{\text{F},y,k,i-1} + t_{\text{ID},y,k,i-1} + t_{\text{H},y,k,i-1} \\ &\quad + T_{\text{F},y,k,i} + t_{\text{ID},y,k,i} \\ &= t_{\text{Ab},y,k,1} \\ &\quad + T_{\text{B},y,k,2} - (T_{\text{B},y,k,1} + T_{\text{H},y,k,1}) + t_{\text{ID},y,k,2} + t_{\text{H},y,k,2} \\ &\quad + \dots + T_{\text{B},y,k,i-1} - (T_{\text{B},y,k,i-2} + T_{\text{H},y,k,i-2}) + t_{\text{ID},y,k,i-1} + t_{\text{H},y,k,i-1} \end{aligned}$$

¹⁰Siehe dazu auch Kap. 4.1.2 dieser Arbeit

$$\begin{aligned}
 & +T_{B,y,k,i} - (T_{B,y,k,i-1} + T_{H,y,k,i-1}) + t_{ID,y,k,i} \\
 = & t_{Ab,y,k,1} + T_{B,y,k,i} + t_{ID,y,k,i} + \sum_{a=2}^{i-1} (t_{ID,y,k,a} + t_{H,y,k,a} - T_{H,y,k,a}) \quad (5.38)
 \end{aligned}$$

Damit gestattet (5.38), den Zeitpunkt der tatsächlichen Ankunft am i -ten Bahnhof einer Linie L_k aus der tatsächlichen Abfahrtszeit am Anfangsbahnhof und aus den Soll-Beförderungs- und Haltezeiten sowie den Zuwachsverspätungen und den tatsächlichen Haltezeiten an den Bahnhöfen längs der Strecke bis zum i -ten Bahnhof zu ermitteln. Es sollen nun die möglichen Konstellationen beim Eintreffen der Züge an dem betrachteten Umsteigebahnhof S_m mit

$$S_m = S_{k,i} = S_{l,j}$$

genauer untersucht werden, um zu Aussagen über die tatsächlichen Haltezeiten und die Bemessung außerplanmäßiger Synchronzeiten bei den Anschlußzügen gelangen zu können. Je später der Zubringerzug in S_m eintrifft und je früher der Anschlußzug abfährt, umso größer wird die Gefahr, daß ein Anschlußzug nicht mehr erreicht werden kann, weil die tatsächlich zur Verfügung stehende Umsteigezeit zu knapp wird und der Anschlußzug mit der Mindestübergangszeit nicht mehr erreicht wird. Die kritischen Zeitpunkte sind deshalb

- die tatsächliche Ankunftszeit des Zubringerzuges und damit verbunden seine Ankunftsverspätung,
- die tatsächliche Abfahrtszeit des Anschlußzuges, die wiederum mit seiner Ankunftsverspätung verbunden ist.

Ankunftsverspätung der Zubringerzüge. Für die Ankunft des Zubringerzuges sind die folgenden zwei Fälle von Bedeutung:

1. Die Ankunftsverspätung des Zubringerzuges ist lediglich so groß, daß der Anschlußzug noch in der Mindestübergangszeit erreicht werden kann, wenn er zum absolut frühestmöglichen Zeitpunkt – also planmäßig – abfahren würde. Das bedeutet:

$$t_{An,y,k,i} + T_{MÜZ,m} \leq T_{Ab,z^*,l,j} \Leftrightarrow \quad (5.39)$$

$$T_{An,y,k,i} + t_{AD,y,k,i} + T_{MÜZ,m} \leq T_{Ab,z^*,l,j} \Rightarrow \quad (5.40)$$

$$t_{AD,y,k,i} \leq T_{Ab,z^*,l,j} - T_{An,y,k,i} - T_{MÜZ,m} \Leftrightarrow \quad (5.41)$$

$$t_{AD,y,k,i} \leq T_{Um,y,k \rightarrow l,i} - T_{MÜZ,m} \quad (5.42)$$

2. Die Ankunftsverspätung des Zubringerzuges ist so groß, daß der Anschlußzug in der Mindestübergangszeit nicht mehr erreicht werden kann, wenn er planmäßig

abfahren würde. Das bedeutet:

$$t_{\text{An},y,k,i} + T_{\text{MÜZ},m} > T_{\text{Ab},z^*,l,j} \Leftrightarrow \quad (5.43)$$

$$T_{\text{An},y,k,i} + t_{\text{AD},y,k,i} + T_{\text{MÜZ},m} > T_{\text{Ab},z^*,l,j} \Rightarrow \quad (5.44)$$

$$t_{\text{AD},y,k,i} > T_{\text{Ab},z^*,l,j} - T_{\text{An},y,k,i} - T_{\text{MÜZ},m} \Leftrightarrow \quad (5.45)$$

$$t_{\text{AD},y,k,i} > T_{\text{Um},y,k \rightarrow l,i} - T_{\text{MÜZ},m} \quad (5.46)$$

Ankunftsverspätung der Anschlußzüge. Aufgrund der Tatsache, daß auch der Anschlußzug eine Ankunftsverspätung haben kann, ist nicht immer eine planmäßige Abfahrt möglich, weil die Mindesthaltezeit nicht unterschritten werden kann. Für die Ankunft des Anschlußzuges werden daher die folgenden beiden Fälle unterschieden:

- (a) Die Ankunftsverspätung des Anschlußzuges ist lediglich so hoch, daß er unter Berücksichtigung der Mindesthaltezeit noch planmäßig abfahren kann. Das bedeutet:

$$t_{\text{An},z^*,l,j} + T_{\text{Hmin},z^*,l,j} \leq T_{\text{Ab},z^*,l,j} \Leftrightarrow \quad (5.47)$$

$$T_{\text{An},z^*,l,j} + t_{\text{AD},z^*,l,j} + T_{\text{Hmin},z^*,l,j} \leq T_{\text{Ab},z^*,l,j} \Rightarrow \quad (5.48)$$

$$t_{\text{AD},z^*,l,j} \leq T_{\text{Ab},z^*,l,j} - T_{\text{An},z^*,l,j} - T_{\text{Hmin},z^*,l,j} \quad (5.49)$$

$$\Leftrightarrow t_{\text{AD},z^*,l,j} \leq T_{\text{H},z^*,l,j} - T_{\text{Hmin},z^*,l,j} \quad (5.50)$$

- (b) Die Ankunftsverspätung des Anschlußzuges ist so hoch, daß er unter Berücksichtigung der Mindesthaltezeit später als planmäßig abfahren muß. Das bedeutet:

$$t_{\text{An},z^*,l,j} + T_{\text{Hmin},z^*,l,j} > T_{\text{Ab},z^*,l,j} \Leftrightarrow \quad (5.51)$$

$$T_{\text{An},z^*,l,j} + t_{\text{AD},z^*,l,j} + T_{\text{Hmin},z^*,l,j} > T_{\text{Ab},z^*,l,j} \Rightarrow \quad (5.52)$$

$$t_{\text{AD},z^*,l,j} > T_{\text{Ab},z^*,l,j} - T_{\text{An},z^*,l,j} - T_{\text{Hmin},z^*,l,j} \quad (5.53)$$

$$\Leftrightarrow t_{\text{AD},z^*,l,j} > T_{\text{H},z^*,l,j} - T_{\text{Hmin},z^*,l,j} \quad (5.54)$$

Beim außerplanmäßigen Anschlußgeschehen tritt jeweils eine Kombination der obigen Fälle aus der Ankunftszeit des Zubringerzuges und der Abfahrtszeit des Anschlußzuges auf. Diese Kombinationen werden im folgenden näher betrachtet, um zu Aussagen zur Bestimmung der außerplanmäßigen Synchronzeit für Anschlußzüge zu gelangen.

Wenn bei den am Anschluß beteiligten Zugfahrten die Möglichkeit der Ankunftsverspätung in die Betrachtung einbezogen, so ergeben sich am Umsteigebahnhof S_m mit

$$S_m = S_{k,i} = S_{l,j}$$

folgende Kombinationen:

Fall 1: Der Zubringerzug y der Linie L_k ist verspätet mit

$$t_{\text{AD},y,k,i} \leq T_{\text{Um},y,k \rightarrow l,i} - T_{\text{MÜZ},m} \Rightarrow$$

$$t_{\text{An},y,k,i} \leq T_{\text{Um},y,k \rightarrow l,i} - T_{\text{MÜZ},m} + T_{\text{An},y,k,i}$$

(a) und der Anschlußzug z^* der Linie L_l ist verspätet mit

$$\begin{aligned} t_{AD,z^*,l,j} &\leq T_{H,z^*,l,j} - T_{H_{\min},z,l,j} \quad \Rightarrow \\ t_{An,z^*,l,j} &\leq T_{H,z^*,l,j} - T_{H_{\min},z^*,l,j} + T_{An,z^*,l,j} \end{aligned}$$

(b) und der Anschlußzug z^* der Linie L_l ist verspätet mit

$$\begin{aligned} t_{AD,z^*,l,j} &> T_{H,z^*,l,j} - T_{H_{\min},z^*,l,j} \quad \Rightarrow \\ t_{An,z^*,l,j} &> T_{H,z^*,l,j} - T_{H_{\min},z^*,l,j} + T_{An,z^*,l,j} \end{aligned}$$

Fall 2: Der Zubringerzug y der Linie L_k ist verspätet mit

$$\begin{aligned} t_{AD,y,k,i} &> T_{Um,y,k \rightarrow l,i} - T_{MÜZ,m} \quad \Rightarrow \\ t_{An,y,k,i} &> T_{Um,y,k \rightarrow l,i} - T_{MÜZ,m} + T_{An,y,k,i} \end{aligned}$$

(a) und der Anschlußzug z^* der Linie L_l ist verspätet mit

$$\begin{aligned} t_{AD,z^*,l,j} &\leq T_{H,z^*,l,j} - T_{H_{\min},z^*,l,j} \quad \Rightarrow \\ t_{An,z^*,l,j} &\leq T_{H,z^*,l,j} - T_{H_{\min},z^*,l,j} + T_{An,z^*,l,j} \end{aligned}$$

(b) und der Anschlußzug z^* der Linie L_l ist verspätet mit

$$\begin{aligned} t_{AD,z^*,l,j} &> T_{H,z^*,l,j} - T_{H_{\min},z^*,l,j} \quad \Rightarrow \\ t_{An,z^*,l,j} &> T_{H,z^*,l,j} - T_{H_{\min},z^*,l,j} + T_{An,z^*,l,j} \end{aligned}$$

Es soll nun für diese vier Kombinationen bestimmt werden

- wie groß die außerplanmäßige Synchronzeit ist, die dem Anschlußzug z^* der Linie L_l gewährt werden muß,
- zu welchem Zeitpunkt der Anschlußzug z^* der Linie L_l tatsächlich abfahren kann,
- wie groß die tatsächliche Haltezeit des Anschlußzuges z^* der Linie L_l sein muß,

damit die umsteigenden Reisenden vom Zubringerzug y der Linie L_k ihren gewünschten Anschlußzug z^* der Linie L_l möglichst noch erreichen.

Für Kombination (a) des Falles 1 wird vorausgesetzt, daß der Anschlußzug zu seiner planmäßigen Abfahrtszeit abfahren kann und die Mindestübergangszeit für das Umsteigen zur Verfügung steht. Daraus ergibt sich unmittelbar

$$\begin{aligned} t_{Sy,z^*,l,j} &= 0 \\ t_{Ab,z^*,l,j} &= T_{Ab,z^*,l,j} \\ t_{H,z^*,l,j} &= T_{H,z^*,l,j} - t_{AD,z^*,l,j} \\ t_{AD,z^*,l,j} &= t_{An,z^*,l,j} - T_{An,z^*,l,j} \end{aligned}$$

In Kombination (b) des Falles 1 ist die Ankunftsverspätung des Anschlußzuges so groß, daß er zu einem Zeitpunkt abfahren muß, der später liegt als seine planmäßige Abfahrtszeit. Der kritische Zeitpunkt der Abfahrt des Anschlußzuges verschiebt sich also auf einen späteren, unkritischen Zeitpunkt. Der Anschlußzug wird von umsteigenden Reisenden auch ohne eine außerplanmäßige Synchronzeit des Anschlußzuges erreicht. In Fall 1 gilt:

$$T_{\text{MÜZ},m} \leq T_{\text{Um},y,k \rightarrow l,i}$$

falls

$$t_{\text{Ab},z^*,l,j} = T_{\text{Ab},z^*,l,j}$$

In Kombination (b) gilt

$$t_{\text{An},z^*,l,j} + T_{\text{H}_{\text{min}},z^*,l,j} > T_{\text{Ab},z^*,l,j}$$

Mit einer außerplanmäßigen Synchronzeit des Anschlußzuges von $t_{\text{Sy},z^*,l,j} = 0$ ist eine Abfahrt des Anschlußzuges zum frühestmöglichen Zeitpunkt

$$t_{\text{Ab},z^*,l,j} = t_{\text{An},z^*,l,j} + T_{\text{H}_{\text{min}},z^*,l,j}$$

möglich. Damit beträgt seine tatsächliche Haltezeit

$$t_{\text{H},z^*,l,j} = T_{\text{H}_{\text{min}},z^*,l,j}$$

In Fall 2 hat der Zubringerzug eine Ankunftsverspätung von

$$t_{\text{AD},y,k,i} = T_{\text{Um},y,k \rightarrow l,i} - T_{\text{MÜZ},m} + \tau$$

mit $\tau > 0$. Hieraus folgt für seine tatsächliche Ankunftszeit

$$t_{\text{An},y,k,i} = T_{\text{An},y,k,i} + T_{\text{Um},y,k \rightarrow l,i} - T_{\text{MÜZ},m} + \tau \quad (5.55)$$

In Kombination (a) des Falles 2 kann die Ankunftsverspätung des Anschlußzuges höchstens

$$t_{\text{AD},z^*,l,j} = T_{\text{H},z^*,l,j} - T_{\text{H}_{\text{min}},z^*,l,j}$$

betragen. Damit liegt der kritische Zeitpunkt seiner spätesten Ankunftszeit bei

$$t_{\text{An},z^*,l,j} = T_{\text{An},z^*,l,j} + T_{\text{H},z^*,l,j} - T_{\text{H}_{\text{min}},z^*,l,j}$$

Wird dem Anschlußzug in diesem Fall keine außerplanmäßige Synchronzeit gewährt, dann kann er frühestens planmäßig mit

$$t_{\text{Ab},z^*,l,j} = T_{\text{Ab},z^*,l,j} \quad (5.56)$$

abfahren. Ein Anschluß auf diesen Zug ist aber nur möglich, wenn die Anschlußbedingung (5.31) erfüllt ist, wenn also

$$t_{\text{Um},y,k \rightarrow l,i} = t_{\text{Ab},z^*,l,j} - t_{\text{An},y,k,i} \geq T_{\text{MÜZ},m} \quad (5.57)$$

gilt. Mit (5.55) und (5.56) folgt hieraus:

$$\begin{aligned} t_{Ab,z^*,l,j} - t_{An,y,k,i} &\stackrel{!}{\geq} T_{MÜZ,m} \Leftrightarrow \\ T_{Ab,z^*,l,j} - T_{An,y,k,i} - T_{Um,y,k \rightarrow l,i} + T_{MÜZ,m} - \tau &\geq T_{MÜZ,m} \Leftrightarrow \\ T_{MÜZ,m} - \tau &\geq T_{MÜZ,m} \end{aligned} \quad (5.58)$$

Dies ist jedoch wegen $\tau > 0$ ein offensichtlicher Widerspruch, so daß in der Kombination (a) des Falles 2 mit $t_{Sy,z^*,l,j} = 0$ kein Anschluß auf diesen Zug besteht, wenn der Anschlußzug frühestmöglich planmäßig mit

$$t_{Ab,z^*,l,j} = T_{Ab,z^*,l,j}$$

abfährt. Um einen Anschluß zu gewährleisten, muß die Abfahrt des Anschlußzuges somit durch eine außerplanmäßige Synchronzeit $t_{Sy,z^*,l,j} > 0$ verzögert werden. Für diese gilt zum einen nach (5.37) auf Seite 70

$$0 < t_{Sy,z^*,l,j} \leq T_{Sy_{max},k \rightarrow l} \quad (5.59)$$

Ferner soll die Abfahrt des Anschlußzuges nicht über das notwendige Maß hinaus verzögert werden. Notwendig zum Erreichen des Anschlußzuges ist die Einhaltung der Anschlußbedingung. Diese ist gerade dann erfüllt, wenn zum Umsteigen die Mindestübergangszeit zur Verfügung steht:

$$t_{Um,y,k \rightarrow l,i} = t_{Ab,z^*,l,j} - t_{An,y,k,i} = T_{MÜZ,m} \quad (5.60)$$

In diesem Fall kann der Anschlußzug frühestens mit

$$t_{Ab,z^*,l,j} = T_{Ab,z^*,l,j} + t_{Sy,z^*,l,j} \quad (5.61)$$

abfahren. Zur Bestimmung der außerplanmäßigen Synchronzeit werden (5.55) und (5.61) in (5.60) eingesetzt:

$$\begin{aligned} t_{Ab,z^*,l,j} - t_{An,y,k,i} &= T_{MÜZ,m} \Leftrightarrow \\ T_{Ab,z^*,l,j} + t_{Sy,z^*,l,j} - T_{An,y,k,i} - T_{Um,y,k \rightarrow l,i} + T_{MÜZ,m} - \tau &= T_{MÜZ,m} \Leftrightarrow \\ t_{Sy,z^*,l,j} &= T_{Um,y,k \rightarrow l,i} + T_{An,y,k,i} - T_{Ab,z^*,l,j} + \tau \Leftrightarrow \\ t_{Sy,z^*,l,j} &= \tau \end{aligned} \quad (5.62)$$

Das ist gerade der Zeitraum, den die Ankunftsverspätung des Anschlußzuges über $T_{Um,y,k \rightarrow l,i} - T_{MÜZ,m}$ hinausgeht, d.h.

$$\tau = t_{AD,y,k,i} - T_{Um,y,k \rightarrow l,i} + T_{MÜZ,m} \quad (5.63)$$

Somit gilt $t_{\text{Sy},z^*,l,j} = \tau$, solange nicht die obere Schranke $T_{\text{Sy}_{\text{max}},k \rightarrow l}$ nach (5.59) für die außerplanmäßige Synchronzeit verletzt wird. Für den Fall, daß

$$\tau > T_{\text{Sy}_{\text{max}},k \rightarrow l}$$

muß der Anschluß aufgegeben werden, und die Umsteigenden müssen mit einem folgenden Zug $z > z^*$ ihre Reise fortsetzen. Daraus folgt:

$$t_{\text{Sy},z^*,l,j} = \begin{cases} \tau & : \quad \tau \leq T_{\text{Sy}_{\text{max}},k \rightarrow l} \\ 0 & : \quad \tau > T_{\text{Sy}_{\text{max}},k \rightarrow l} \end{cases} \quad (5.64)$$

Es ist

$$t_{\text{H},z^*,l,j} = t_{\text{Ab},z^*,l,j} - t_{\text{An},z^*,l,j} \quad (5.65)$$

Für den Fall, daß

$$\tau \leq T_{\text{Sy}_{\text{max}},k \rightarrow l}$$

folgt aus (5.65) mit (5.61), (5.62) und (5.63) für die tatsächliche Haltezeit des Anschlußzuges:

$$t_{\text{H},z^*,l,j} = T_{\text{Ab},z^*,l,j} + t_{\text{AD},y,k,i} - T_{\text{Um},y,k \rightarrow l,i} + T_{\text{MÜZ},m} - t_{\text{An},z^*,l,j} \quad (5.66)$$

Für die Ankunftsverspätung des Zubringerzuges gilt allgemein:

$$t_{\text{AD},y,k,i} = t_{\text{An},y,k,i} - T_{\text{An},y,k,i} \quad (5.67)$$

Wird dies in (5.66) eingesetzt, so ergibt sich

$$t_{\text{H},z^*,l,j} = T_{\text{Ab},z^*,l,j} + t_{\text{An},y,k,i} - T_{\text{An},y,k,i} - T_{\text{Um},y,k \rightarrow l,i} + T_{\text{MÜZ},m} - t_{\text{An},z^*,l,j} \quad (5.68)$$

Da jedoch

$$T_{\text{Ab},z^*,l,j} - T_{\text{An},y,k,i} = T_{\text{Um},y,k \rightarrow l,i}$$

ist, kann der Ausdruck in (5.68) verkürzt werden auf

$$t_{\text{H},z^*,l,j} = t_{\text{An},y,k,i} - t_{\text{An},z^*,l,j} + T_{\text{MÜZ},m}$$

Für die tatsächliche Halte- und Abfahrtszeit und die außerplanmäßige Synchronzeit des Anschlußzuges in der Kombination (a) des Falles 2 ergibt sich also zusammengefaßt

$$\begin{aligned} t_{\text{Sy},z^*,l,j} &= \begin{cases} \tau & : \quad \tau \leq T_{\text{Sy}_{\text{max}},k \rightarrow l} \\ 0 & : \quad \tau > T_{\text{Sy}_{\text{max}},k \rightarrow l} \end{cases} \\ t_{\text{Ab},z^*,l,j} &= \begin{cases} T_{\text{Ab},z^*,l,j} + t_{\text{Sy},z^*,l,j} & : \quad \tau \leq T_{\text{Sy}_{\text{max}},k \rightarrow l} \\ T_{\text{Ab},z^*,l,j} & : \quad \tau > T_{\text{Sy}_{\text{max}},k \rightarrow l} \end{cases} \\ t_{\text{H},z^*,l,j} &= \begin{cases} t_{\text{An},y,k,i} - t_{\text{An},z^*,l,j} + T_{\text{MÜZ},m} & : \quad \tau \leq T_{\text{Sy}_{\text{max}},k \rightarrow l} \\ T_{\text{H},z^*,l,j} - t_{\text{AD},z^*,l,j} & : \quad \tau > T_{\text{Sy}_{\text{max}},k \rightarrow l} \end{cases} \quad (5.69) \\ &\text{mit } \tau = t_{\text{AD},y,k,i} - T_{\text{Um},y,k \rightarrow l,i} + T_{\text{MÜZ},m} \end{aligned}$$

In Kombination (b) des Falles 2 beträgt die Ankunftsverspätung des Anschlußzuges

$$t_{AD,z^*,l,j} = T_{H,z^*,l,j} - T_{H_{\min},z^*,l,j} + v \quad (5.70)$$

mit $v > 0$. Entsprechend liegt seine tatsächliche Ankunftszeit bei

$$t_{An,z^*,l,j} = T_{An,z^*,l,j} + T_{H,z^*,l,j} - T_{H_{\min},z^*,l,j} + v \quad (5.71)$$

Dieser Anschlußzug kann nach seiner tatsächliche Ankunft frühestens abfahren, nachdem die Mindesthaltezeit verstrichen ist:

$$\begin{aligned} t_{Ab,z^*,l,j} &= t_{An,z^*,l,j} + T_{H_{\min},z^*,l,j} \\ &= T_{H,z^*,l,j} + T_{An,z^*,l,j} + v \end{aligned} \quad (5.72)$$

Allerdings ist damit nicht gewährleistet, daß die Anschlußbedingung (5.31) erfüllt ist. Die tatsächliche Ankunftszeit des Zubringerzuges, die in Fall 2 gilt, beträgt nach (5.55)

$$t_{An,y,k,i} = T_{An,y,k,i} + T_{Um,y,k \rightarrow l,i} - T_{MÜZ,m} + \tau \quad (5.73)$$

Die frühestmögliche Abfahrtszeit des Anschlußzuges soll nach (5.72) bei

$$t_{Ab,z^*,l,j} = T_{H,z^*,l,j} + T_{An,z^*,l,j} + v \quad (5.74)$$

liegen. Werden (5.55) und (5.72) in die Anschlußbedingung (5.31) eingesetzt, ergibt sich

$$\begin{aligned} t_{Um,y,k \rightarrow l,i} &= t_{Ab,z^*,l,j} - t_{An,y,k,i} \geq T_{MÜZ,m} \\ &= T_{H,z^*,l,j} + T_{An,z^*,l,j} + v - T_{An,y,k,i} - T_{Um,y,k \rightarrow l,i} + T_{MÜZ,m} - \tau \geq T_{MÜZ,m} \quad \Leftrightarrow \\ &= T_{H,z^*,l,j} + T_{An,z^*,l,j} + v - T_{An,y,k,i} - T_{Um,y,k \rightarrow l,i} - \tau \geq 0 \quad \Leftrightarrow \\ &= T_{Ab,z^*,l,j} - T_{An,y,k,i} - T_{Um,y,k \rightarrow l,i} + v - \tau \geq 0 \quad \Leftrightarrow \\ &= v - \tau \geq 0 \end{aligned}$$

In diesem Fall wird der Anschlußzug erreicht, ohne daß es notwendig ist, ihm eine außerplanmäßige Synchronzeit einzuräumen. Er kann zu seiner frühestmöglichen Abfahrtszeit

$$t_{Ab,z^*,l,j} = t_{An,z^*,l,j} + T_{H_{\min},z^*,l,j}$$

abfahren.

Ist $v - \tau < 0$, dann soll dem Anschlußzug eine außerplanmäßige Synchronzeit so eingeräumt werden, daß umsteigenden Reisenden die Mindestübergangszeit für das Umsteigen zur Verfügung steht. Bei der Bemessung der außerplanmäßigen Synchronzeit ist aber wieder (5.59) zu beachten. Dazu wird wie in Kombination (a) des Falles 2 gezeigt vorgegangen.

Es ergibt sich dann

$$t_{Sy,z^*,l,j} = \begin{cases} 0 & : \quad v - \tau \geq 0 \\ \tau - v & : \quad 0 < \tau - v \leq T_{Sy_{\max},k \rightarrow l} \\ 0 & : \quad \tau - v > T_{Sy_{\max},k \rightarrow l} \end{cases} \quad (5.75)$$

Bei

$$\tau - \nu > T_{\text{Sy}_{\max},k \rightarrow l}$$

muß der Anschluß wiederum aufgegeben werden, und die Umsteigenden müssen mit einem folgenden Zug $z > z^*$ ihre Reise fortsetzen.

Die tatsächliche Haltezeit des Anschlußzuges ergibt sich aus der Mindesthaltezeit $T_{\text{H}_{\min},z^*,l,j}$ und der außerplanmäßigen Synchronzeit:

$$t_{\text{H},z^*,l,j} = T_{\text{H}_{\min},z^*,l,j} + t_{\text{Sy},z^*,l,j} \quad (5.76)$$

Es ergeben sich τ und ν durch Umformung von (5.55) und (5.70) zu:

$$\tau = t_{\text{AD},y,k,i} - T_{\text{Um},y,k \rightarrow l,i} + T_{\text{MÜZ},m} \quad (5.77)$$

$$\nu = t_{\text{AD},z^*,l,j} - T_{\text{H},z^*,l,j} + T_{\text{H}_{\min},z^*,l,j} \quad (5.78)$$

Für den Fall, daß $0 < \tau - \nu \leq T_{\text{Sy}_{\max},k \rightarrow l}$ zutrifft und dem Anschlußzug deshalb eine außerplanmäßige Synchronzeit eingeräumt werden kann, kann die tatsächliche Haltezeit des Anschlußzuges bestimmt werden, indem $t_{\text{Sy},z^*,l,j} = \tau - \nu$ aus (5.75) in (5.76) eingesetzt wird und für τ und ν die Gleichungen (5.77) und (5.78) eingesetzt werden. Das bedeutet:

$$\begin{aligned} t_{\text{H},z^*,l,j} &= T_{\text{H}_{\min},z^*,l,j} + t_{\text{Sy},z^*,l,j} \\ &= T_{\text{H}_{\min},z^*,l,j} + \tau - \nu \\ &= T_{\text{H}_{\min},z^*,l,j} + t_{\text{AD},y,k,i} - T_{\text{Um},y,k \rightarrow l,i} + T_{\text{MÜZ},m} - t_{\text{AD},z^*,l,j} + T_{\text{H},z^*,l,j} - T_{\text{H}_{\min},z^*,l,j} \\ &= t_{\text{AD},y,k,i} - T_{\text{Um},y,k \rightarrow l,i} + T_{\text{MÜZ},m} - t_{\text{AD},z^*,l,j} + T_{\text{H},z^*,l,j} \end{aligned} \quad (5.79)$$

Für die tatsächliche Halte- und Abfahrtszeit und die außerplanmäßige Synchronzeit des Anschlußzuges in Fall 2 (b) ergibt sich also zusammengefaßt

$$\begin{aligned} t_{\text{Sy},z^*,l,j} &= \begin{cases} 0 & : \nu - \tau \geq 0 \\ \tau - \nu & : 0 < \tau - \nu \leq T_{\text{Sy}_{\max},k \rightarrow l} \\ 0 & : \tau - \nu > T_{\text{Sy}_{\max},k \rightarrow l} \end{cases} \\ t_{\text{Ab},z^*,l,j} &= \begin{cases} T_{\text{Ab},z^*,l,j} + t_{\text{Sy},z^*,l,j} + \nu & : \tau - \nu \leq T_{\text{Sy}_{\max},k \rightarrow l} \\ t_{\text{An},z^*,l,j} + T_{\text{H}_{\min},z^*,l,j} & : \tau - \nu > T_{\text{Sy}_{\max},k \rightarrow l} \end{cases} \\ t_{\text{H},z^*,l,j} &= \begin{cases} t_{\text{AD},y,k,i} - T_{\text{Um},y,k \rightarrow l,i} + T_{\text{MÜZ},m} - t_{\text{AD},z^*,l,j} + T_{\text{H},z^*,l,j} & : \tau - \nu \leq T_{\text{Sy}_{\max},k \rightarrow l} \\ T_{\text{H}_{\min},z^*,l,j} & : \tau - \nu > T_{\text{Sy}_{\max},k \rightarrow l} \end{cases} \end{aligned} \quad (5.80)$$

mit τ und ν nach (5.77) und (5.78).

Wenn ein Anschlußzug z^* der Linie L_l an dessen j -ten Bahnhof auf Ω Zubringerzüge synchronisiert werden soll, so sind zunächst Ω Paare von jeweils einem Zubringerzug und dem Anschlußzug zu bilden. Jedes dieser Paare läßt sich nun in die Anschlußkonstellationen entsprechend der Fälle 1 und 2 einordnen. Sodann wird für jedes Paar $\omega = 1, \dots, \Omega$ die außerplanmäßige Synchronzeit $t_{\text{Sy},z^*,l,j}(\omega)$, die tatsächliche Abfahrtszeit $t_{\text{Ab},z^*,l,j}(\omega)$

und die tatsächliche Haltezeit $t_{H,z^*,l,j}(\omega)$ gemäß (5.55), (5.69) und (5.80) ermittelt. Maßgeblich für die Bemessung der außerplanmäßigen Synchronzeit, der tatsächlichen Abfahrtszeit und der tatsächlichen Haltezeit des Anschlußzuges sind die über alle Paare ermittelten maximalen Werte für diese Größen:

$$\begin{aligned} t_{Sy,z^*,l,j} &= \max_{\omega=1,\dots,\Omega} \{t_{Sy,z^*,l,j}(\omega)\} \\ t_{Ab,z^*,l,j} &= \max_{\omega=1,\dots,\Omega} \{t_{Ab,z^*,l,j}(\omega)\} \\ t_{H,z^*,l,j} &= \max_{\omega=1,\dots,\Omega} \{t_{H,z^*,l,j}(\omega)\} \end{aligned} \quad (5.81)$$

5.5.3. Reisendenströme

5.5.3.1. Allgemeines

Bis jetzt wurden ausschließlich zeitliche Aspekte des Eisenbahnbetriebes betrachtet. Die Inanspruchnahme der Zugfahrten zur Deckung einer Nachfrage nach Personenverkehrsleistungen in einem Liniennetz des Schienenverkehrs wurde noch nicht einbezogen. Dies soll nun geschehen. Der Bedarf, Reisen durchzuführen, bildet eine entsprechende Verkehrsnachfrage. Aus einer Vielzahl einzelner Reisen entstehen Reisendenströme. Derartige Reisendenströme, die es in dem Liniennetz gebe, werden im folgenden betrachtet. Besteht zwischen einem Start- und einem Zielbahnhof einer Reise keine direkte Verbindung durch eine Linie, so müssen Reisende umsteigen. Im folgenden wird davon ausgegangen, daß Reisende auf einer Reise höchstens einmal umsteigen. Dies entspricht den Erkenntnissen einer Untersuchung der Deutschen Bahn AG, in der 4400 Reisende unter anderem zur Anzahl der Umsteigevorgänge befragt wurden.¹¹ Danach gibt es auf einer dienstlichen oder geschäftlichen Bahnreise durchschnittlich 1.05 Umsteigevorgänge, Pendler auf der täglichen Bahnfahrt zum Arbeits- oder Ausbildungsplatz steigen durchschnittlich 0.57 mal um. Wochenendreisen von Pendlern, die ihren Wohnort nur am Wochenende aufsuchen, weisen durchschnittlich 1.23 Umsteigevorgänge auf. Auf Urlaubs- und sonstigen Privatreisen wurden durchschnittlich 1.25 bzw. 1.05 Umsteigevorgänge ermittelt.¹² Die Beschränkung auf höchstens einen Umsteigevorgang im Simulationsmodell stellt daher keine nennenswerte Einschränkung dar.

Für die Linien sind die Soll-Fahrpläne gegeben. Reisen werden auf Basis dieser Soll-Fahrpläne geplant. Es wird also ein Reiseverlauf mit planmäßig verkehrenden Zugfahrten (planmäßige Reise) für die Reiseplanung zugrundegelegt. Bei Zugfahrten kann es jedoch aufgrund unterschiedlicher Ursachen zu Abweichungen vom Soll-Fahrplan kommen. Es kommt damit auch zu zeitlichen Abweichungen bei der Durchführung von Reisen. Daher wird im folgenden bei der Modellierung der Reisendenströme zwischen planmäßigen Reisen und Reisen unter Berücksichtigung außerplanmäßiger Ereignisse unterschieden.

¹¹Vgl. [Wei99]

¹²Vgl. [Wei99, S. 224]

5.5.3.2. Planmäßige Reisen

Im betrachteten Eisenbahnnetz gebe es Reisende, die auf einer Linie L_l mit einem Zug der Zugnummer z vom r -ten Bahnhof bis zum s -ten Bahnhof dieser Linie fahren wollen. Aus der Sicht der Reisenden ist der r -te Bahnhof dabei der Startbahnhof und der s -te Bahnhof dieser Linie entweder der Zielbahnhof der Reise oder der erste Umsteigebahnhof, der auf der Reise erreicht wird. Diese Reisenden sollen im Folgenden Direktfahrer genannt werden. Ist für einen Teil der Direktfahrer der s -te Bahnhof der betrachteten Linie L_l der Zielbahnhof der Reise, so ist dort die Reise für diese Reisenden beendet, und sie verlassen das System „Eisenbahnnetz“. Der verbleibende Anteil der am s -ten Bahnhof ankommenden Direktfahrer hat seine Zielbahnhöfe noch nicht erreicht und muß dazu auf andere Linien umsteigen.

Die Anzahl der Direktfahrer wird mit DF_{lzs} bezeichnet; dabei ist DF_{lzs} zunächst im Sinne der obigen Ausführungen definiert für

$$\begin{aligned} l &= 1, \dots, l_{\max} \\ z &= 0, \dots, Zf_{\max, l} - 1 \\ r &= 1, \dots, Bf_l - 1 \\ s &= 1, \dots, Bf_l \\ s &> r \end{aligned} \tag{5.82}$$

Für die Simulation ist es aus Gründen einer einfacheren Implementation zweckmäßig, DF_{lzs} sämtliche Werte für l , z , r und s zu erfassen. Es sind jedoch nicht alle so erfaßten Kombinationen aus Start- und Zielbahnhof auch sinnvoll: Ein Ziel- oder Umsteigebahnhof einer Reise kann weder vor deren Startbahnhof liegen noch soll er mit ihm identisch sein. Daher wird $DF_{lzs} = 0$ für $s \leq r$ festgelegt.

Es sei ferner

$$R_{\%Um, z, l \rightarrow m, s} \quad \text{mit } 0 \leq R_{\%Um, z, l \rightarrow m, s} \leq 1 \tag{5.83}$$

der durchschnittliche prozentuale Anteil der auf Linie L_l mit Zug Nr. z auf der Grundlage planmäßigen Betriebes am s -ten Bahnhof der Linie L_l eintreffenden Direktfahrer, die auf den nächsten erreichbaren Anschlußzug einer Linie L_m umsteigen wollen. Bei planmäßigem Betrieb ist das derjenige Zug, der sich entsprechend Gleichung (5.19) ermitteln läßt. Es läßt sich nun die Verkehrsnachfrage auf einer bestimmten Reiseverbindung bei planmäßigem Betrieb analytisch beschreiben. Diese Verkehrsnachfrage kann dann in einem Graphen der Reiseverbindungen wie in Abb. 5.5 dargestellt werden. Die hierfür erforderlichen Schritte sollen anhand Abb. 5.8 aufgezeigt werden. Die Darstellung in einem Graphen der Reiseverbindungen zeigt eine Momentaufnahme des Zustandes in dem Liniennetz für ganz bestimmte Zugfahrten. Eine dynamische Darstellung der Reisendenzahlen im Zeitablauf ist mittels eines einzigen Graphen der Reiseverbindungen nicht möglich. Daher ändert sich die Bewertung der Kanten und der Knoten mit jeder Ankunft und jeder Abfahrt eines Zuges.

Beispiel:

Es werden die DF_{lzs} nur für Zug Nr. 1 aller drei Linien und nur die $DF_{lzs} > 0$ angegeben:

$$\begin{aligned} DF_{1112} &= 140 \\ DF_{1113} &= 20 \\ DF_{1114} &= 40 \\ DF_{1123} &= 100 \\ DF_{1124} &= 80 \\ DF_{1134} &= 110 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} DF_{2112} &= 100 \\ DF_{2113} &= 130 \\ DF_{2123} &= 70 \end{aligned}$$

$$DF_{3112} = 30$$

$$\begin{aligned} R_{\%Um,1,1 \rightarrow 2,2} &= 0 \\ R_{\%Um,1,1 \rightarrow 3,3} &= 0.5 \\ R_{\%Um,1,2 \rightarrow 1,2} &= 0 \\ R_{\%Um,1,2 \rightarrow 1,3} &= 0.2 \\ R_{\%Um,1,2 \rightarrow 3,3} &= 0.1 \end{aligned}$$

Schritt 1: Es bezeichne \mathcal{Z}_l die Menge der Zugfahrten der Linie L_l , die in einem Betrachtungszeitraum (z.B. an einem Tag) auf der Linie L_l verkehren. Dann gilt $|\mathcal{Z}_l| = Zf_{\max,l}$. Zunächst wird für jede Linie $L_l \in \mathcal{L}$ die Anzahl der Direktfahrer ermittelt, die *insgesamt* mit einem Zug Nr. $z \in \mathcal{Z}_l$ auf der Linie L_l am r -ten Bahnhof ($r = 1, \dots, Bf_l - 1$) dieser Linie eine Reise beginnen wollen, um irgendeinen der folgenden Bahnhöfe $S_{l,i}$, $i = 2, \dots, Bf_l$ dieser Linie zu erreichen. Diese Anzahl ergibt sich für festes l , z und r aus

$$\sum_{i=2}^{Bf_l} DF_{lzri} \tag{5.84}$$

Für eine Darstellung der Verkehrsnachfrage in einem Graphen der Reiseverbindungen wird für jede Linie $L_l \in \mathcal{L}$ jeder Abfahrtsknoten $S_{l,r}^{Ab} \in V_{R_{Ab}}$, $r = 1, \dots, Bf_l - 1$ bewertet mit dieser Anzahl der Direktfahrer.

Schritt 2: Es sei $R_{Umab,z,l \rightarrow m,s}$ die Anzahl der Reisenden, die bei planmäßigem Betrieb im s -ten Bahnhof einer Linie L_l den Zug Nr. z dieser Linie verlassen, um auf den nächsten erreichbaren Anschlußzug der Linie L_m umzusteigen (abgebende Perspektive der Umsteiger). Diese ermitteln sich aus der Summe der Direktfahrer, die mit Zug

Nr. z von Bahnhöfen, die entlang der Linie L_l vor dem s -ten Bahnhof dieser Linie liegen, direkt zum s -ten Bahnhof fahren. Davon steigt ein bestimmter prozentualer Anteil $R_{\%Um,z,l \rightarrow m,s}$ auf den nächsten erreichbaren Anschlußzug der Linie L_m um. Ferner bezeichne \mathcal{L}_i die Menge aller Linien, die den Bahnhof S_i enthalten. Gilt für den Umsteigebahnhof $S_{l,s} = S_{m,t} = S_i$, so ist

$$R_{Umab,z,l \rightarrow m,s} = \left[R_{\%Um,z,l \rightarrow m,s} \cdot \sum_{i=1}^{s-1} DF_{lzi s} \right] \quad (5.85)$$

$$\begin{aligned} \forall l & \mid L_l \in \mathcal{L} \\ s & = 2, \dots, Bf_l \\ \forall m & \mid L_m \in \mathcal{L}_i, m \neq l \\ z & \in \mathcal{Z}_l \end{aligned}$$

Die $R_{\%Um,z,l \rightarrow m,s}$ und $R_{Umab,z,l \rightarrow m,s}$ sind nur für Umsteigebahnhöfe definiert. Es ist für die Implementation des Simulationsmodells zweckmäßig, die Indexbereiche für alle Bahnhöfe und Zugfahrten zu erfassen. Es wird $R_{Umab,z,l \rightarrow m,s}$ jedoch nur für Umsteigebahnhöfe bestimmt. Für verschiedene Bedingungen, bei denen ein Umsteigen nicht sinnvoll ist, wird $R_{\%Um,z,l \rightarrow m,s} = 0$ festgelegt.¹³

Im Graph der Reiseverbindungen werden diejenigen Kanten $e_R \in G_R$, die einen Ankunftsknoten $S_{l,s}^{An}$ mit einem Abfahrtsknoten $S_{m,t}^{Ab}$ verbinden, mit den jeweils zugehörigen $R_{Umab,z,l \rightarrow m,s}$ bewertet.

Schritt 3: Es sei $ZA_{z,l,s}$ die Anzahl der Reisenden, die bei planmäßigem Betrieb insgesamt in einem Zug Nr. z der Linie L_l vom $(s-1)$ -ten bis zum s -ten Bahnhof dieser Linie fahren wollen (Plan-Zugauslastung). Diese Plan-Zugauslastung setzt sich zusammen aus

- denjenigen Direktfahrern, die mit Zug Nr. z von Bahnhöfen, die entlang der Linie L_l vor dem s -ten Bahnhof dieser Linie liegen, direkt zum s -ten Bahnhof oder entlang der Linie L_l weiterfahren,
- zusätzlich den Umsteigern, die aus anderen Linien als der betrachteten Linie L_l an Bahnhöfen, die entlang der Linie L_l vor dem s -ten Bahnhof dieser Linie liegen, dem Zug Nr. z der Linie L_l zugestiegen sind. Gibt es Linien, von denen bisher (d.h. an Bahnhöfen, die entlang der Linie L_l vor dem s -ten Bahnhof dieser Linie liegen) nicht auf die betrachtete Linie L_l umgestiegen werden konnte, weil es keinen Umsteigebahnhof zwischen jenen Linien und der betrachteten Linie L_l gibt, so wird $R_{Uman,z,c \rightarrow l,d} = 0$ festgelegt.

Sie ergibt sich somit aus

$$ZA_{z,l,s} = \sum_{a=1}^{s-1} \sum_{b=s}^{Bf_l} DF_{lza b} + \sum_{\substack{c=1 \\ c \neq l}}^{l_{\max}} \sum_{d=1}^{s-1} R_{Uman,z,c \rightarrow l,d} \quad (5.86)$$

¹³Siehe dazu auch (6.10)

$$\begin{aligned} L_l &\in \mathcal{L} \\ s &= 2, \dots, \text{Bf}_l \\ z &\in \mathcal{Z}_l \end{aligned}$$

Dabei bezeichnet $R_{\text{Uman},z,c \rightarrow l,s}$ allgemein die Anzahl der Reisenden, die bei planmäßigem Betrieb im s -ten Bahnhof der Linie L_l aus Linie L_c in den Zug Nr. z der Linie L_l umsteigen wollen (aufnehmende Perspektive der Umsteiger). Dieser Wert läßt sich aus den in Schritt 2 berechneten $R_{\text{Ugab},z,l \rightarrow m,t}$ ermitteln. Es wird ein Umsteigebahnhof $S_n = S_{l,s} = S_{c,t}$ betrachtet. Der Zug z sei der nächste planmäßige Anschlußzug auf der Linie L_l . Dieser kann gemäß (5.17) auf Seite 64 planmäßig von Reisenden aus Linie L_c nur erreicht werden, wenn zum Umsteigen mindestens die Mindestübergangszeit am Umsteigebahnhof zur Verfügung steht. Das bedeutet, daß in diesen Anschlußzug z nur solche Umsteiger aus zubringenden Zügen zusteigen können, die zeitgerecht am Umsteigebahnhof ankommen. Aus der Perspektive der Zubringerlinie L_c kommen solche Züge zeitgerecht an, deren planmäßige Ankunftszeit unter Berücksichtigung der Mindestübergangszeit so spät liegt, daß der vorher verkehrende Zug $z - 1$ nicht mehr erreicht wird und deren planmäßige Ankunftszeit mindestens $T_{\text{MÜZ},n}$ Minuten vor der planmäßigen Abfahrtszeit des nächsten Zuges z liegt. Es bezeichne \mathcal{Y}_{zls} die Menge der Züge, die aus der Perspektive einer Zubringerlinie L_c in der genannten Weise zeitgerecht am Umsteigebahnhof S_n ankommen.

Das bedeutet für einen Umsteigebahnhof $S_n = S_{l,s} = S_{c,t}$:

$$\begin{aligned} R_{\text{Uman},z,c \rightarrow l,s} &= \sum_{i \in \mathcal{Y}_{zls}} R_{\text{Ugab},i,c \rightarrow l,t} & (5.87) \\ L_l &\in \mathcal{L} \\ s &= 1, \dots, \text{Bf}_l - 1 \\ L_c &\in \mathcal{L}_n \setminus \{L_l\} \\ z &= z^* = \min\{z \in \mathcal{Z}_l \mid T_{\text{Ab},z,l,s} - T_{\text{An},i,c,t} \geq T_{\text{MÜZ},n}\} \\ \mathcal{Y}_{zls} &= \{y \in \mathcal{Z}_c \mid T_{\text{Ab},z-1,l,s} - T_{\text{MÜZ},n} < T_{\text{An},y,c,t} \leq T_{\text{Ab},z,l,s} - T_{\text{MÜZ},n}\} \end{aligned}$$

Die $R_{\text{Uman},z,c \rightarrow l,s}$ sind nur für Umsteigebahnhöfe definiert. Es wird $R_{\text{Uman},z,c \rightarrow l,s}$ in der Simulation nur für Umsteigebahnhöfe bestimmt. Es kann vorkommen, daß aus verschiedenen Gründen keine Umsteiger dem Anschlußzug zusteigen. In solchen Fällen wird $R_{\text{Uman},z,c \rightarrow l,s} = 0$ festgelegt.

Im Graph der Reiseverbindungen werden die Kanten $e_R = \langle S_{l,s}^{\text{Ab}}, S_{l,s+1}^{\text{An}} \rangle$, die die Fahrtvorgänge repräsentieren, mit den jeweils zugehörigen $ZA_{z,l,s}$ bewertet.

Schritt 4: Es sei $R_{\text{Durch},z,l,s}$ die Anzahl der Reisenden, die bei planmäßigem Betrieb am s -ten Bahnhof der Linie L_l im Zug Nr. z dieser Linie verbleiben wollen, um ihre Reise fortzusetzen (Plan-Durchfahrer). Das sind

- diejenigen Direktfahrer, die mit Zug Nr. z von Bahnhöfen, die entlang der Linie L_l vor dem s -ten Bahnhof dieser Linie liegen, am s -ten Bahnhof durchfahren, um einen Bahnhof zu erreichen, der entlang der Linie L_l nach dem s -ten Bahnhof liegt,
- zusätzlich die Umsteiger, die aus anderen Linien als der betrachteten Linie L_l an Bahnhöfen, die entlang der Linie L_l vor dem s -ten Bahnhof dieser Linie liegen, dem Zug Nr. z der Linie L_l zugestiegen sind.

Diese Durchfahrer werden mit

$$R_{\text{Durch},z,l,s} = \sum_{a=1}^{s-1} \sum_{b=s+1}^{\text{Bf}_l} \text{DF}_{l,z,a,b} + \sum_{\substack{c=1 \\ c \neq l}}^{l_{\max}} \sum_{d=1}^{s-1} R_{\text{Uman},z,c \rightarrow l,d} \quad (5.88)$$

$$L_l \in \mathcal{L}$$

$$s = 2, \dots, \text{Bf}_l - 1$$

$$z \in \mathcal{Z}_l$$

berechnet.¹⁴ Im Graph der Reiseverbindungen werden die Kanten $e_R = \langle S_{l,s}^{\text{An}}, S_{l,s}^{\text{Ab}} \rangle$, die die Aufenthalte repräsentieren, mit den jeweils zugehörigen $R_{\text{Durch},z,l,s}$ bewertet.

Schritt 5: Es sei $R_{\text{Aus},z,l,s}$ die Anzahl der Reisenden, die bei planmäßigem Betrieb am s -ten Bahnhof der Linie L_l aus dem Zug Nr. z dieser Linie aussteigen, um an diesem Bahnhof (Zielbahnhof) eine Reise zu beenden und damit das System „Eisenbahnnetz“ zu verlassen. Dies ist

- die Gesamtanzahl der Reisenden $\text{ZA}_{z,l,s}$, die mit diesem Zug am s -ten Bahnhof ankommen (Direktfahrer und zugestiegene Umsteiger)
- abzüglich derjenigen Reisenden $R_{\text{Durch},z,l,s}$, die im selben Zug verbleiben, um so die Reise zum Zielbahnhof fortzusetzen (Plan-Durchfahrer)
- abzüglich derjenigen Reisenden $R_{\text{Umab},z,l \rightarrow m,s}$, die am genannten Bahnhof auf eine andere Linie L_m umsteigen.

Diese Größe läßt sich wie folgt berechnen:

$$R_{\text{Aus},z,l,s} = \text{ZA}_{z,l,s} - R_{\text{Durch},z,l,s} - \sum_{\substack{a=1 \\ a \neq l}}^{l_{\max}} R_{\text{Umab},z,l \rightarrow a,s} \quad (5.89)$$

¹⁴Dem liegt die Modellannahme zugrunde, daß alle Reisenden, die bisher als Umsteiger in Zug z zugestiegen sind, auf der Linie L_l bis zum Endbahnhof weiterfahren. Ohne diese Annahme müßten Quelle-Ziel-Matrizen für jede denkbare Startbahnhof-Zielbahnhof-Relation verarbeitet werden. Derartige Quelle-Ziel-Matrizen können in Netzen realistischen Umfanges enorme Größe annehmen und würden daher die Kapazität des Simulationsmodells sprengen.

$$\begin{aligned} L_l &\in \mathcal{L} \\ s &= 2, \dots, \text{Bf}_l \\ z &\in \mathcal{Z}_l \end{aligned}$$

Im Graph der Reiseverbindungen wird für jede Linie L_l mit $l = 1, \dots, l_{\max}$ jeder Ankunftsknoten $S_{l,s}^{\text{An}} \in V_{R_{\text{An}}}$, $s = 2, \dots, \text{Bf}_l$ bewertet mit dieser Anzahl der aussteigenden Reisenden.

Den schrittweisen Aufbau des Graphen der Reiseverbindungen zur Darstellung der Reisendenströme mit den Zahlen des Beispiels auf der Grundlage planmäßigen Betriebes zeigt Abb. 5.8.

5.5.3.3. Reisen unter Berücksichtigung außerplanmäßiger Ereignisse

Die Eingangsgrößen für die tatsächliche Durchführung der geplanten Reisen sind die $DF_{l,z,r,s}$ und die $R_{\%U_{m,z,l \rightarrow m,s}}$.

Bei Verspätungen von Zubringerzügen an Umsteigebahnhöfen kann es vorkommen, daß Anschlüsse aufgegeben werden müssen. In diesem Fall erreichen die $R_{U_{mab,z,l \rightarrow m,s}}$ Umsteiger, die aus einem zubringenden Zug z der Linie L_l im s -ten Bahnhof dieser Linie auf einen Zug der Linie L_m umsteigen wollen, nicht mehr den planmäßigen Anschlußzug z^* der Linie L_m , sondern müssen mit dem nächsten erreichbaren Zug $z > z^*$ der Linie L_m die Reise fortsetzen. Dementsprechend ändern sich dann die Zugauslastungen der Züge z^* und z und die Anzahl der Durchfahrer in diesen Zügen bei der realisierten Reise. In Analogie zu (5.87) soll $r_{U_{man,z,c \rightarrow l,s}}$ die Anzahl der Reisenden bezeichnen, die tatsächlich im s -ten Bahnhof der Linie L_l aus Linie L_c in den Zug Nr. z der Linie L_l umsteigen. Das bedeutet :

$$\begin{aligned} r_{U_{man,z,c \rightarrow l,s}} &= \sum_{i \in \mathcal{Y}_{zls}} r_{U_{mab,i,c \rightarrow l,t}} & (5.90) \\ L_l &\in \mathcal{L} \\ s &= 1, \dots, \text{Bf}_l - 1 \\ L_c &\in \mathcal{L}_n \setminus \{L_l\} \\ z = z^* &= \min\{z \in \mathcal{Z}_l \mid t_{\text{Ab},z,l,s} - t_{\text{An},i,c,t} \geq T_{\text{MÜZ},n}\} \\ \mathcal{Y}_{zls} &= \{y \in \mathcal{Z}_c \mid t_{\text{Ab},z-1,l,s} - T_{\text{MÜZ},n} < t_{\text{An},y,c,t} \leq t_{\text{Ab},z,l,s} - T_{\text{MÜZ},n}\} \end{aligned}$$

Entsprechend (5.86) ergibt sich die Ist-Zugauslastung als

$$\begin{aligned} \text{za}_{z,l,s} &= \sum_{a=1}^{s-1} \sum_{b=s}^{\text{Bf}_l} DF_{l,zab} + \sum_{\substack{c=1 \\ c \neq l}}^{l_{\max}} \sum_{d=1}^{s-1} r_{U_{man,z,c \rightarrow l,d}} & (5.91) \\ L_l &\in \mathcal{L} \\ s &= 2, \dots, \text{Bf}_l \\ z &\in \mathcal{Z}_l \end{aligned}$$

5. Modellierung und Darstellung des Systems „Eisenbahnnetz“

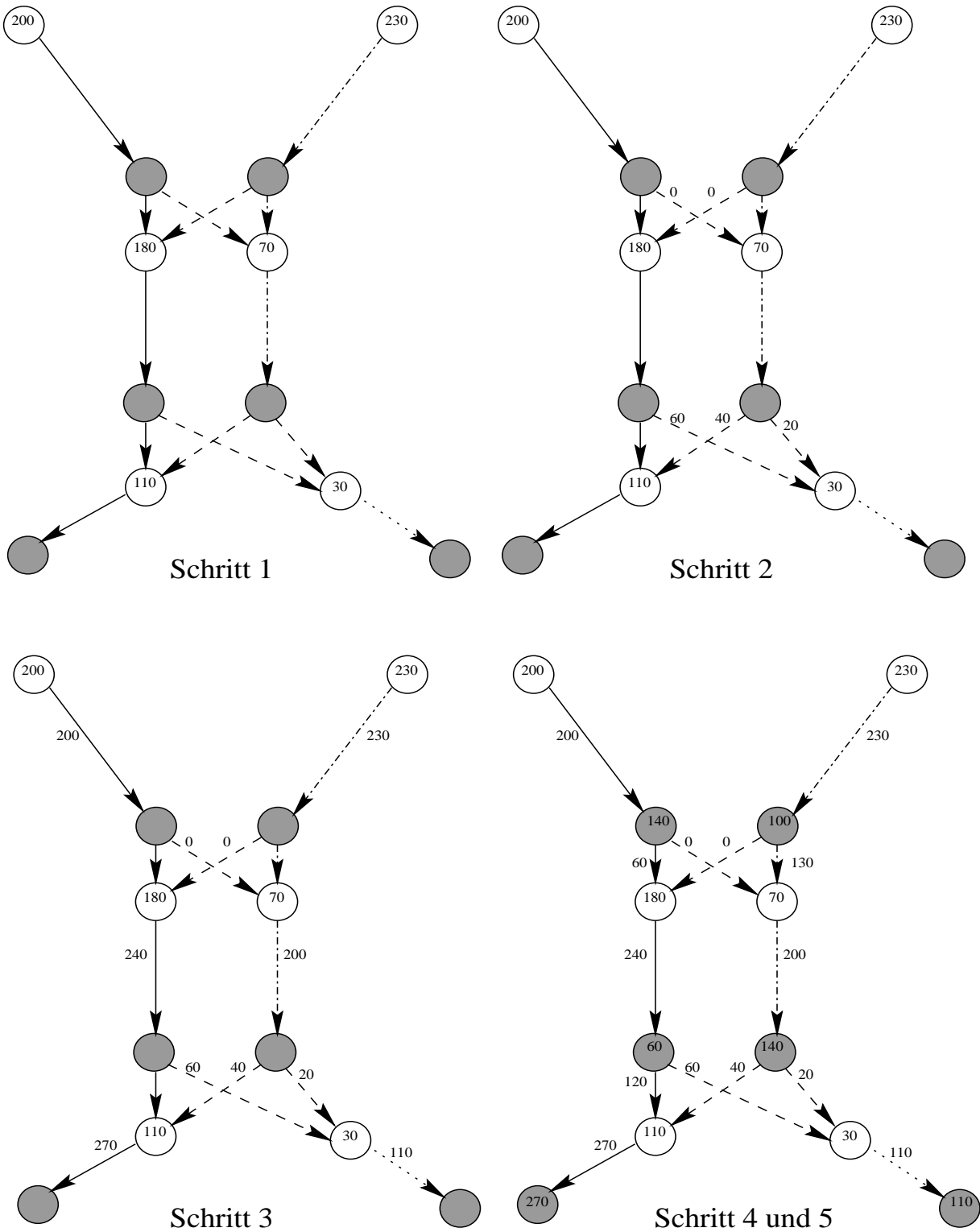


Abbildung 5.8.: Graph der Reiseverbindungen: Darstellung des Beispiels

und die Anzahl der Reisenden, die tatsächlich am s -ten Bahnhof der Linie L_l im Zug Nr. z dieser Linie verbleiben wollen, um ihre Reise fortzusetzen (Durchfahrer) entsprechend (5.88) als

$$r_{\text{Durch},z,l,s} = \sum_{a=1}^{s-1} \sum_{b=s+1}^{\text{Bf}_l} \text{DF}_{l,zab} + \sum_{\substack{c=1 \\ c \neq l}}^{l_{\max}} \sum_{d=1}^{s-1} r_{\text{Uman},z,c \rightarrow l,d} \quad (5.92)$$

$$L_l \in \mathcal{L}$$

$$s = 2, \dots, \text{Bf}_l - 1$$

$$z \in \mathcal{Z}_l$$

Die Anzahl der Reisenden, die bei realisiertem Betrieb am s -ten Bahnhof der Linie L_l aus dem Zug Nr. z dieser Linie aussteigen, um an diesem Bahnhof (Zielbahnhof) eine Reise zu beenden und damit das System „Eisenbahnnetz“ zu verlassen, läßt sich analog zu (5.89) ermitteln mit

$$r_{\text{Aus},z,l,s} = z_{\text{a}_{z,l,s}} - r_{\text{Durch},z,l,s} - \sum_{\substack{a=1 \\ a \neq l}}^{l_{\max}} r_{\text{Uman},z,l \rightarrow a,s} \quad (5.93)$$

$$L_l \in \mathcal{L}$$

$$s = 2, \dots, \text{Bf}_l$$

$$z \in \mathcal{Z}_l$$

5.5.4. Kriterien und Kennzahlen für die Bewertung der Beförderungsqualität

Die wichtigste Kennzahl, mit der Eisenbahnverkehrsunternehmen bestimmen, inwieweit Zugfahrten von ihren Soll-Fahrplänen abweichen, ist der Pünktlichkeitsgrad. Er erfaßt jedoch lediglich Zugfahrten und berücksichtigt nicht die Reisendenströme. Damit greift der Pünktlichkeitsgrad als eisenbahnbetriebliche Kennzahl zu kurz, falls die Beförderungsqualität aus der Sicht der Reisenden auch einbezogen werden soll. Ein Beispiel mag dies verdeutlichen: Es wird ein Umsteigebahnhof in einem Liniennetz betrachtet, in dem alle Linien im integralen Taktfahrplan und mit einer Taktzeit von 60 Minuten verkehren. Die Mindestübergangszeit an diesem Umsteigebahnhof betrage fünf Minuten. Bei allen Linien, die den Umsteigebahnhof berühren, kommen die Züge zum gleichen Zeitpunkt an, und sie fahren nach Ablauf einer Plan-Haltezeit von fünf Minuten (dies sei die Mindesthaltezeit für alle Züge) wieder ab. Für den Pünktlichkeitsgrad hat das Eisenbahnverkehrsunternehmen einen Schwellwert $D_P = 5$ festgelegt. Angenommen, alle Züge haben einheitlich sechs Minuten Ankunftsverspätung. Dies würde an diesem Bahnhof zu einem Pünktlichkeitsgrad von Null führen. Weil jedoch alle Züge dieselbe Verspätung haben, erreichen alle Reisenden diejenigen Anschlußzüge, die sie gemäß Reisefahrplan

auch hätten erreichen wollen. Die Verzögerung, mit der umsteigende Reisende mit dem Anschlußzug ihr Reiseziel erreichen, bleibt daher – von weiteren Verspätungen, die auf der Fahrt vom Umsteigebahnhof zum Zielbahnhof auftreten könnten, einmal abgesehen – verhältnismäßig gering. Ironisierend könnte in einem derartigen Fall von „Integraler Taktverspätung“ gesprochen werden. Sind nun einige der Züge nicht verspätet, erhöht sich der Pünktlichkeitsgrad. Reisende, die von verspäteten Zubringern auf diese pünktlichen Züge umsteigen wollen, erreichen diese Züge allerdings nicht mehr und müssen annähernd eine ganze Taktzeit warten, bevor sie die Reise mit dem nächsten Zug fortsetzen können (das ist dann derjenige Zug, der auf den im Reisefahrplan vorgesehenen Anschlußzug folgt). Die Ankunftsverspätung bei der Ankunft am Zielbahnhof der Reise ist dann im Vergleich zum Reisefahrplan mindestens so hoch, wie die Taktzeit auf der Anschlußlinie. Die selektive Optimierung des Pünktlichkeitsgrades entspricht also nicht immer der Anforderung der Reisenden nach einer möglichst kurzen Beförderungszeit. Um dieses Qualitätskriterium der Reisenden in die Betrachtung einzubeziehen, werden zusätzlich zum Pünktlichkeitsgrad weitere Kennzahlen benötigt, die sowohl zeitliche Aspekte der Zugfahrten als auch die Reisendenströme berücksichtigen. Da der Pünktlichkeitsgrad für die Stabilität des Betriebes in einem Netz des Eisenbahnverkehrs auch von sehr großer Bedeutung ist, bleibt er in der Formulierung der Optimierungsziele für die Problemstellung dieser Arbeit enthalten.

Die Pünktlichkeit der Zugfahrten in einem bestimmten Zeitraum (z.B. an einem Betriebstag) läßt sich in einem Eisenbahnnetz mittels des Pünktlichkeitsgrades messen. Bei einem bestimmten zugrundegelegten Meßzeitraum kann unterschieden werden, auf welche Zugfahrten und Orte sich die Messung der Pünktlichkeit erstrecken soll:

1. auf alle Zugfahrten einer bestimmten Linie an einem ihrer Bahnhöfe,
2. auf alle Zugfahrten aller Linien an einem bestimmten Bahnhof,
3. auf alle Zugfahrten aller Linien an allen Bahnhöfen im Netz.

Pünktlichkeitsgrad aller Zugfahrten einer bestimmten Linie an einem ihrer Bahnhöfe.

Es sei $d_{P,l,s}$ der Pünktlichkeitsgrad aller Zugfahrten der Linie L_l , die in einem bestimmten Zeitraum am s -ten Bahnhof dieser Linie ankommen. Ferner sei $D_P \geq 0$ eine obere Schranke in Minuten, bezüglich derer die Pünktlichkeit der ankommenden Zugfahrten gemessen wird. Bei vielen Eisenbahnbetriebsunternehmen (so auch bei der DB AG) ist es üblich, $D_P = 5$ festzulegen. Ein Zug gilt allgemein dann als pünktlich, wenn $t_{AD,z,l,s} \leq D_P$, anderenfalls gilt er als verspätet. Damit ist

$$d_{P,l,s} = \frac{|\{z \in \mathcal{Z}_l \mid t_{AD,z,l,s} \leq D_P\}|}{Zf_{\max,l}} \quad (5.94)$$

Pünktlichkeitsgrad aller Zugfahrten aller Linien an einem bestimmten Bahnhof.

Es sei $d_{P,i}$ der Pünktlichkeitsgrad aller Zugfahrten aller Linien, die in einem bestimmten

Zeitraum am Bahnhof S_i ankommen. Ferner bezeichne \mathcal{L}_i die Menge aller Linien, die den Bahnhof S_i enthalten und es sei $S_i = S_{l,s}$ bezüglich eines solchen L_l . Dann ist

$$d_{P,i} = \frac{|\{z \mid t_{AD,z,l,s} \leq D_P, L_l \in \mathcal{L}_i, z \in \mathcal{Z}_l\}|}{\sum_{L_l \in \mathcal{L}_i} |\mathcal{Z}_l|} \quad (5.95)$$

Pünktlichkeitsgrad aller Zugfahrten aller Linien an allen Bahnhöfen im Netz. Es sei d_P der Pünktlichkeitsgrad aller Zugfahrten aller Linien an allen Bahnhöfen im Netz in einem bestimmten Zeitraum. Dann ist

$$d_P = \frac{|\{z \mid t_{AD,z,l,s} \leq D_P, S_i \in \mathcal{S}, L_l \in \mathcal{L}_i, z \in \mathcal{Z}_l\}|}{\sum_{S_i \in \mathcal{S}} \sum_{L_l \in \mathcal{L}_i} |\mathcal{Z}_l|} \quad (5.96)$$

wobei wieder $S_i = S_{l,s}$ für relevante L_l gelten soll.

Der Pünktlichkeitsgrad bezieht sich ausschließlich auf bestimmte Zugfahrten, berücksichtigt jedoch nicht die Auslastung dieser Züge mit Reisenden. Für eine Messung und einen Vergleich der im Netz geplanten und realisierten Beförderungszeiten reicht der Pünktlichkeitsgrad daher nicht aus. Ein mögliches zusätzliches Kriterium für die Bestimmung der Beförderungsqualität auf Reisen ist die zeitliche Abweichung der Ist-Fahrpläne von den Reisefahrplänen. Die Ermittlung der Abweichungen kann sich beziehen auf

- die Zeit die für die Fahrt zwischen den Haltebahnhöfen benötigt wird,
- die Zeit, die für den Aufenthalt an Haltebahnhöfen benötigt wird,
- die Zeit, die für das Umsteigen benötigt wird,
- die Zeit, die insgesamt vom Start- zum Zielbahnhof benötigt wird.

Entsprechend der Problemstellung dieser Arbeit sollen sich diese Abweichungen nicht auf eine bestimmte Reise beziehen, sondern auf alle Reisen, die in einem bestimmten Zeitraum im Liniennetz durchgeführt werden. Es werden daher weitere Kennzahlen eingeführt, die geeignet sind, derartige Zeitabweichungen netzweit zu erfassen. Es sei $T_{\text{Bef}}^{\text{gesamt}}$ das netzweite Plan-Gesamtbeförderungszeitvolumen, gemessen in Personenminuten, das sich bei planmäßigem Betrieb auf der Grundlage der Soll-Fahrpläne und der auf dieser Basis geplanten Reisen ergeben würde. Es setzt sich zusammen aus

- dem netzweiten Plan-Gesamtfahrzeitvolumen T_P^{gesamt} in Personenminuten bei planmäßigem Betrieb. Dieses wird bestimmt aus der Plan-Fahrzeit zwischen je zwei benachbarten Bahnhöfen einer Linie (diese ist gleich der Mindestbeförderungszeit zwischen diesen Bahnhöfen), gewichtet mit der Plan-Zugauslastung eines Zuges auf dieser Fahrt. Dieses Produkt ist über alle Linien, über alle Streckenabschnitte zwischen benachbarten Bahnhöfen dieser Linien und über alle Zugfahrten in einem bestimmten Zeitraum zu summieren.

- dem netzweiten Plan-Gesamthaltezeitvolumen $T_{\text{Durch}}^{\text{gesamt}}$ in Personenminuten bei planmäßigem Betrieb. Dieses wird bestimmt aus der Plan-Haltezeit an einem bestimmten Bahnhof, gewichtet mit der Anzahl der Reisenden, die an diesem Bahnhof durchfahren (Plan-Durchfahrer). Dieses Produkt ist über alle Linien, über alle Bahnhöfe dieser Linien und über alle Zugfahrten dieser Linien in einem bestimmten Zeitraum zu summieren.
- dem netzweiten Plan-Gesamtumsteigezeitvolumen $T_{\text{Um}}^{\text{gesamt}}$ in Personenminuten bei planmäßigem Betrieb. Dieses wird für alle Umsteigebahnhöfe bestimmt aus der Anzahl der Plan-Umsteiger, gewichtet mit der Plan-Umsteigezeit. Dieses Produkt ist über alle Linien, die Umsteigebahnhöfe enthalten und über alle Zugfahrten dieser Linien zu summieren.

Somit ergibt sich

$$T_{\text{Bef}}^{\text{gesamt}} = T_{\text{F}}^{\text{gesamt}} + T_{\text{Durch}}^{\text{gesamt}} + T_{\text{Um}}^{\text{gesamt}} \quad (5.97)$$

mit

$$T_{\text{F}}^{\text{gesamt}} = \sum_{l=1}^{l_{\max}} \sum_{z=0}^{Zf_{\max,l}-1} \sum_{s=2}^{Bf_l} ZA_{z,l,s} \cdot (T_{\text{An},z,l,s} - T_{\text{Ab},z,l,s-1}) \quad (5.98)$$

$$T_{\text{Durch}}^{\text{gesamt}} = \sum_{l=1}^{l_{\max}} \sum_{z=0}^{Zf_{\max,l}-1} \sum_{s=2}^{Bf_l-1} R_{\text{Durch},z,l,s} \cdot (T_{\text{Ab},z,l,s} - T_{\text{An},z,l,s}) \quad (5.99)$$

$$T_{\text{Um}}^{\text{gesamt}} = \sum_{l=1}^{l_{\max}} \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq l}}^{l_{\max}} \sum_{z=0}^{Zf_{\max,l}} \sum_{s=2}^{Bf_l} R_{\text{Umab},z,l \rightarrow m,s} \cdot T_{\text{Um},z,l \rightarrow m,s}$$

für alle definierten Umsteigebahnhöfe (5.100)

Diese Größen können den entsprechenden Kennzahlen des tatsächlichen Betriebes gegenübergestellt werden. Es sei $t_{\text{Bef}}^{\text{gesamt}}$ das netzweite Ist-Gesamtbeförderungszeitvolumen, gemessen in Personenminuten, das sich bei realisiertem Betrieb auf der Grundlage der Ist-Fahrpläne und der auf dieser Basis durchgeführten Reisen ergeben würde. Es setzt sich analog zu (5.97) zusammen aus dem netzweiten Plan-Gesamtfahrzeitvolumen $t_{\text{F}}^{\text{gesamt}}$, dem netzweiten Ist-Gesamthaltezeitvolumen $t_{\text{Durch}}^{\text{gesamt}}$ und dem netzweiten Ist-Gesamtumsteigezeitvolumen $t_{\text{Um}}^{\text{gesamt}}$. Diese Größen werden analog zu den Plangrößen bestimmt. Es ist dann entsprechend

$$t_{\text{Bef}}^{\text{gesamt}} = t_{\text{F}}^{\text{gesamt}} + t_{\text{Durch}}^{\text{gesamt}} + t_{\text{Um}}^{\text{gesamt}} \quad (5.101)$$

das netzweite Gesamtbeförderungszeitvolumen, ebenfalls gemessen in Personenminuten, das sich bei tatsächlichem Betrieb unter Berücksichtigung eventuell auftretender Verspätungen ergibt. Es setzt sich entsprechend (5.98) zusammen aus

$$t_{\text{F}}^{\text{gesamt}} = \sum_{l=1}^{l_{\max}} \sum_{z=0}^{Zf_{\max,l}} \sum_{s=2}^{Bf_l} za_{z,l,s} \cdot (t_{\text{An},z,l,s} - t_{\text{Ab},z,l,s-1}) \quad (5.102)$$

$$t_{\text{Durch}}^{\text{gesamt}} = \sum_{l=1}^{l_{\max}} \sum_{z=0}^{Zf_{\max,l}} \sum_{s=2}^{Bf_l-1} r_{\text{Durch},z,l,s} \cdot (t_{\text{Ab},z,l,s} - t_{\text{An},z,l,s}) \quad (5.103)$$

$$t_{\text{Um}}^{\text{gesamt}} = \sum_{l=1}^{l_{\max}} \sum_{\substack{m=1 \\ z \neq l}}^{l_{\max}} \sum_{z=0}^{Zf_{\max,l}} \sum_{s=2}^{Bf_l} r_{\text{Umab},z,l \rightarrow m,s} \cdot t_{\text{Um},z,l \rightarrow m,s}$$

für alle definierten Umsteigebahnhöfe

(5.104)

5.6. Formulierung des Optimierungsproblems

Mit Hilfe der in Abschnitt 5.5 eingeführten Begriffe kann nun das Problem, das in dieser Arbeit untersucht wird, als Optimierungsproblem formuliert werden. Im wesentlichen geht es darum, für den Betrieb in einem Eisenbahn-Liniennetz einen für alle Umsteigevorgänge einheitlichen Wert für die maximale außerplanmäßige Synchronzeit zu finden derart, daß das netzweite Ist-Gesamtbeförderungszeitvolumen $t_{\text{Bef}}^{\text{gesamt}}$ minimal vom netzweiten Plan-Gesamtbeförderungszeitvolumen $T_{\text{Bef}}^{\text{gesamt}}$ abweicht und der netzweite Pünktlichkeitsgrad d_p dabei einen bestimmten Wert nicht unterschreitet. Dies hängt davon ab, inwieweit Verspätungen auftreten. Bei der Verspätung wird die Zuwachsverspätung t_{ID} betrachtet, soweit sie positive Werte aufweist. Dann ist der Mittelwert der Zuwachsverspätungen aller Zugfahrten im betrachteten Liniennetz in einem bestimmten Zeitraum mit $t_{\text{ID}} > 0$ eine mögliche Charakterisierung der Verspätung. Dieser Mittelwert wird als Verspätungsniveau $\overline{\text{ID}}$ bezeichnet.

Zur Realisierung eines Betriebs im Liniennetz mit mittlerer positiver Zuwachsverspätung $\overline{\text{ID}}$ wird angenommen, daß bei den Zugfahrten mit positiver Zuwachsverspätung diese negativ-exponentialverteilt mit dem Parameter

$$\lambda = \frac{1}{\overline{\text{ID}}}$$

sei (für weitere Einzelheiten hierzu siehe Abschnitt 6.3.6.2). Hat dann die maximale außerplanmäßige Synchronzeit $T_{\text{Sy}_{\max},k \rightarrow l}$ für alle Züge einer Linie L_l , um Anschlußreisende einer Linie L_k aufzunehmen einen bestimmten Wert x , dann ist gemäß der Modellierung in Abschnitt 5.5 der Betrieb im betrachteten Liniennetz bestimmt und führt zu Resultaten wie beispielsweise $t_{\text{Bef}}^{\text{gesamt}}$, die vom Verspätungsniveau $\overline{\text{ID}}$ und von $T_{\text{Sy}_{\max},k \rightarrow l} = x$ abhängen, was die Schreibweise

$$t_{\text{Bef}}^{\text{gesamt}} = t_{\text{Bef}}^{\text{gesamt}}(\overline{\text{ID}}, x)$$

zum Ausdruck bringen soll.

Damit kann das Problem allgemein wie folgt formuliert werden: „Finde in einem gegebenen Liniennetz zu einem gegebenen Verspätungsniveau $\overline{\text{ID}}$ eine einheitliche obere

Schranke für die außerplanmäßige Synchronzeit derart, daß die Abweichung des netzweiten Ist-Gesamtbeförderungszeitvolumens vom Plan-Gesamtbeförderungszeitvolumen minimal wird und daß der netzweite Pünktlichkeitsgrad d_P eine Schranke ϵ_1 nicht unterschreitet.“ Dies kann in folgender Weise formuliert werden:

Zu gegebenem \overline{ID} und $\epsilon_1 > 0$ ermittle $x \in \mathbb{N}_0$ so, daß

$$\begin{aligned}
 & T_{\text{Sy}_{\max}, l \rightarrow m} = x \\
 & \text{für alle definierten } T_{\text{Sy}_{\max}, l \rightarrow m} \\
 & \text{und} \\
 & t_{\text{Bef}}^{\text{gesamt}}(\overline{ID}, x) - T_{\text{Bef}}^{\text{gesamt}} = \min \\
 \text{sowie} \quad & 1 \geq d_P(\overline{ID}, x) \geq \epsilon_1
 \end{aligned} \tag{5.105}$$

Bisher wurde davon ausgegangen, daß Zugfahrten aller Linien hinsichtlich der oberen Schranke für die außerplanmäßige Synchronzeit einheitlich behandelt werden. Nun soll die weitere Problematik betrachtet werden, daß für Linien verschiedener Zuggattungen unterschiedliche obere Schranken der außerplanmäßigen Synchronzeit gelten sollen. Hierzu werden alle Linien des Fernverkehrs zusammengefaßt und als Zuggattung „Fernverkehr“ verstanden, alle Linien des Nahverkehrs werden zusammengefaßt und als Zuggattung „Nahverkehr“ betrachtet. Dann sei $\mathcal{L}_{\text{Fern}}$ die Menge der Fernverkehrslinien und \mathcal{L}_{Nah} die Menge der Nahverkehrslinien mit $\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{Fern}} \cup \mathcal{L}_{\text{Nah}}$ und $\mathcal{L}_{\text{Fern}} \cap \mathcal{L}_{\text{Nah}} = \emptyset$. Nun soll für die folgenden Fälle ermittelt werden, wie hoch die außerplanmäßige Synchronzeit maximal bemessen werden soll:

- Zügen der Nahverkehrslinien soll eine außerplanmäßige Synchronzeit größer 0 eingeräumt werden, um Anschlüsse von verspäteten zubringenden Fernverkehrszügen sicherzustellen,
- Züge der Fernverkehrslinien erhalten grundsätzlich keine außerplanmäßige Synchronzeit (d.h. eine außerplanmäßige Synchronzeit von 0), um Anschlüsse von verspäteten zubringenden Nahverkehrszügen sicherzustellen,
- Züge derselben Zuggattung warten untereinander, wobei dabei dieselbe obere Schranke für die außerplanmäßige Synchronzeit gelten soll, die für Züge des Nahverkehrs gilt, wenn sie zwecks Anschlußaufnahme auf verspätete Fernverkehrszüge warten.

Diese Regelung ist ähnlich den Regelungen, die in Vorschriften der DB AG zu finden sind.¹⁵ Dort wird allerdings eine absolute Wartestrategie zugrundegelegt, während in dieser Arbeit eine relative Wartestrategie betrachtet wird. Hierzu kann das folgende Optimierungsproblem formuliert werden:

¹⁵vgl. Abb. 2.2 auf S. 18 dieser Arbeit

Zu gegebenem $\overline{\text{ID}}$ und $\epsilon_1 > 0$ ermittle $x \in \mathbb{N}_0$ so, daß

$$\begin{aligned}
 & t_{\text{Bef}}^{\text{gesamt}}(\overline{\text{ID}}, x) - T_{\text{Bef}}^{\text{gesamt}} = \min \\
 \text{unter} \quad & T_{\text{Sy}_{\text{max}}, m \rightarrow j} = 0 \\
 & T_{\text{Sy}_{\text{max}}, j \rightarrow k} = T_{\text{Sy}_{\text{max}}, j \rightarrow m} = T_{\text{Sy}_{\text{max}}, l \rightarrow m} = x \\
 \text{mit} \quad & \\
 & L_j \in \mathcal{L}_{\text{Fern}} \quad L_l \in \mathcal{L}_{\text{Nah}} \\
 & L_k \in \mathcal{L}_{\text{Fern}} \quad L_m \in \mathcal{L}_{\text{Nah}} \\
 & \text{soweit definiert} \\
 \text{und} \quad & 1 \geq d_{\text{P}}(\overline{\text{ID}}, x) \geq \epsilon_1 \tag{5.106}
 \end{aligned}$$

Werden Nahverkehrs- und Fernverkehrslinien bei der Bemessung der oberen Schranke einer außerplanmäßigen Synchronzeit unterschiedlich behandelt, so ist auch eine Unterscheidung nach folgenden Kriterien interessant:

- Zügen der Fernverkehrslinien soll eine außerplanmäßige Synchronzeit größer 0 eingeräumt werden, um Anschlüsse von verspäteten zubringenden Nahverkehrszügen sicherzustellen,
- Züge der Nahverkehrslinien erhalten grundsätzlich keine außerplanmäßige Synchronzeit (d.h. eine außerplanmäßige Synchronzeit von 0), um Anschlüsse von verspäteten zubringenden Fernverkehrszügen sicherzustellen,
- Züge derselben Zuggattung warten untereinander, wobei dabei dieselbe obere Schranke für die außerplanmäßige Synchronzeit gelten soll, die für Züge des Fernverkehrs gilt, wenn sie zwecks Anschlußaufnahme auf verspätete Nahverkehrszüge warten.

Eine derartige Regelung mag vordergründig wenig sinnvoll erscheinen, weil Fernverkehrszüge, die in der Rangfolge der Zuggattungen meist höher stehen als Nahverkehrszüge, auf diese niederrangigen Züge zwecks Anschlußaufnahme warten sollen, nicht jedoch umgekehrt. Dagegen können aber folgende Aspekte vorgebracht werden:

- Bei Fernverkehrszügen existieren gegenüber Nahverkehrszügen meist längere Linien mit weniger Halten und größeren Haltestellenabständen,
- Bei Fernverkehrszügen bestehen wegen der größeren Haltestellenabstände bessere Möglichkeiten, eventuelle Abfahrtverspätungen auf der Strecke zwischen zwei Halten wieder aufzuholen, indem der Regelzuschlag nicht ausgeschöpft wird,¹⁶
- Der höhere Rang der Fernverkehrszüge führt dazu, daß Zugfahrten des Fernverkehrs gegenüber Zugfahrten des Nahverkehrs bei Streckenbelegungskonflikten häufig Vorrang eingeräumt wird, was wiederum die Wahrscheinlichkeit erhöhen kann, daß ein Fernverkehrszug den Regelzuschlag nicht ausschöpft.

¹⁶Vgl. dazu Abschnitt 5.5.1 dieser Arbeit

Daher soll in dieser Arbeit auch eine derartige Regelung untersucht werden. Das Optimierungsziel läßt sich dafür wie folgt formulieren:

Zu gegebenem $\overline{\text{ID}}$ und $\epsilon_1 > 0$ ermittle $x \in \mathbb{N}_0$ so, daß

$$\begin{aligned}
 & t_{\text{Bef}}^{\text{gesamt}}(\overline{\text{ID}}, x) - T_{\text{Bef}}^{\text{gesamt}} = \min \\
 \text{unter} \quad & T_{\text{Sy}_{\text{max}}, j \rightarrow m} = 0 \\
 & T_{\text{Sy}_{\text{max}}, j \rightarrow k} = T_{\text{Sy}_{\text{max}}, m \rightarrow j} = T_{\text{Sy}_{\text{max}}, l \rightarrow m} = x \\
 \text{mit} \quad & \\
 & L_j \in \mathcal{L}_{\text{Fern}} \quad L_l \in \mathcal{L}_{\text{Nah}} \\
 & L_k \in \mathcal{L}_{\text{Fern}} \quad L_m \in \mathcal{L}_{\text{Nah}} \\
 & \text{soweit definiert} \\
 \text{und} \quad & 1 \geq d_P \geq \epsilon_1
 \end{aligned} \tag{5.107}$$

Das in diesem Kapitel modellierte System „Eisenbahnnetz“ soll mittels Simulation untersucht werden auf

- optimale außerplanmäßige Synchronzeiten entsprechend (5.105), (5.106) und (5.107),
 - die Auswirkungen dieser außerplanmäßigen Synchronzeiten und der auftretenden Zuwachsverspätungen
 - auf den netzweiten Pünktlichkeitsgrad,
 - auf das netzweite Gesamtbeförderungszeitvolumen und seine Bestandteile
- und deren Abweichungen von planmäßigen Geschehen

6. Simulation des Systems

6.1. Überblick und Zielsetzung

Im vorangegangenen Kapitel wurde ein Streckennetz des Eisenbahnverkehrs modelliert. Auf einem solchen Streckennetz mit mehreren Bahnhöfen gibt es mehrere Linien, die ein Liniennetz bilden. Es besteht eine Nachfrage nach Beförderungsleistungen des Eisenbahnverkehrs, die sich durch Reisen in diesem Liniennetz konkretisiert. Dabei werden nicht einzelne Reisen betrachtet, sondern die Reisendenströme, die sich aus der Vielzahl einzelner Reisen ergeben. Um die Verkehrsnachfrage zu decken, gibt es auf den Linien Zugfahrten, die nach einem Taktfahrplan verkehren. Bei diesen Zugfahrten können Verspätungen auftreten, die dazu führen, daß Reisen nicht mehr planmäßig durchgeführt werden können. Dies führt zu der Notwendigkeit, im Bedarfsfall außerplanmäßige Synchronzeiten zu gewähren. Für die Zielsetzung, eine Regelung für die Gewährung außerplanmäßiger Synchronzeiten derart zu finden, daß die netzweiten Abweichungen des Ist-Gesamtbeförderungszeitvolumens vom Plan-Gesamtbeförderungszeitvolumen unter Berücksichtigung des netzweiten Pünktlichkeitsgrades möglichst gering werden, wurden in (5.105), (5.106) und (5.107) entsprechende Optimierungsprobleme und Untersuchungsziele formuliert. Diese Optimierungsprobleme und Untersuchungsziele erfordern es, bestimmte Kennzahlen zu berechnen: die Bestandteile des Gesamtbeförderungszeitvolumens (Plan und Ist) sowie den Pünktlichkeitsgrad. Dafür werden Plan- und Ist-Daten der Zugfahrten und der Reisendenströme benötigt. Für die Erzeugung der Ist-Daten der Zugfahrten müssen Zuwachsverspätungen in geeigneter Weise generiert werden. Die Zusammenhänge, die bisher bei der Darstellung des Strecken- und Liniennetzes und der Reiseverbindungen sowie bei der Modellierung des Eisenbahnbetriebes gezeigt wurden, geben lediglich eine Momentaufnahme wieder: Welche Zusammenhänge sind beim Auftreten bestimmter Ereignisse und Vorgänge in dem betrachteten Liniennetz erkennbar? Das Modell ist damit statisch, weil es sich auf bestimmte Zeitpunkte bezieht.

Es kommt nun darauf an, das Geschehen in diesem Liniennetz über einen bestimmten Zeitraum hinweg zu betrachten, also eine dynamische Betrachtung zu ermöglichen. Erst diese Dynamik gestattet es, die für die Lösung der genannten Optimierungsprobleme und für die Untersuchung benötigten Kennzahlen laufend zu erheben und schließlich zu aggregieren. Zuwachsverspätungen der Zugfahrten sollen dabei durch geeignete Zufallszahlen abgebildet werden. Diese stochastische Komponente erfordert eine entsprechende

Simulation der Zuwachsverspätungen auf der Grundlage einer geeigneten Zufallsverteilung.¹ Das Verspätungsniveau als mittlere Zuwachsverspätung aller Züge mit positiver Zuwachsverspätung im Netz ist auch in den Optimierungsproblemen enthalten: Die Höhe der außerplanmäßigen Synchronzeiten ist nämlich abhängig vom Verspätungsniveau. Hinzu kommt, daß realitätsnahe Liniennetze mit mehreren Bahnhöfen und mehreren Linien unterschiedlicher Zugattungen, die mehrfach an Umsteigebahnhöfen untereinander verknüpft sind, sehr komplex werden. Bereits die Untersuchung von Meng², die sich auf nur einen Bahnhof in einem Liniennetz beschränkt, enthält eine Simulation des Anschlußgeschehens an diesem Bahnhof, um sein Lösungsmodell zu validieren und zu konkreten Aussagen zu gelangen. Damit ist eine analytische Lösung der Problemstellung unzweckmäßig.

Die Lösung der formulierten Optimierungsprobleme und die Untersuchung der genannten Zusammenhänge erfolgen daher mit Hilfe einer diskreten Simulation. Diese Simulation bildet während eines bestimmten Zeitraumes, dem Simulationszeitraum, das Geschehen der Zugfahrten und der Reisendenströme im Liniennetz nach. Ein Simulationsschritt entspricht dabei einer Minute an einem Betriebstag. Innerhalb des Simulationszeitraumes kann ein bestimmter Zeitraum festgelegt werden, in dem die benötigten Kennzahlen erfaßt werden. Der kleinste sinnvolle Simulationszeitraum ist dabei ein Betriebstag, da die Soll-Fahrpläne der Liniendefinitionen sich ebenfalls auf einen Betriebstag beziehen. Um der Komplexität des Untersuchungsgegenstandes Rechnung zu tragen und um die Realisierung der Simulation anhand des vorgestellten Modells methodisch strukturiert anzugehen, wurde ein objektorientierter Ansatz gewählt. Bei der Entwicklung der Software, die die Simulation realisieren soll, kam es an auf

- jederzeitige Überprüfbarkeit der Funktionalität anhand des Modells
- Stabilität und akzeptable Laufzeit der Simulation auch bei komplexen Liniennetzen
- Erweiterbarkeit hinsichtlich möglicher weiterer Aspekte, die für die Problemstellung bedeutsam sind
- Wiederverwendbarkeit bereits implementierter Programmteile, um eine effiziente Entwicklung zu ermöglichen
- Erzeugung des Streckennetzes, des Liniennetzes und der Reisendenströme möglichst ohne Eingriffe in den Quelltext des Programmes
- benutzerfreundliche Steuerung der Simulation

Diese Anforderungen an die Entwicklung einer geeigneten Simulation zur Untersuchung der Problemstellung und zur Lösung der Optimierungsprobleme werden durch einen objektorientierten Ansatz gestützt.³

¹Siehe dazu Abschnitt 6.3.6.2 dieser Arbeit

²Vgl. [Men91] und Abschnitt 4.3.3 dieser Arbeit

³Siehe dazu z.B. [SR96]

Im folgenden werden die Bestandteile und der Ablauf des Simulationsmodells dargestellt.

6.2. Die Klassen der Simulation

6.2.1. Bahnhöfe

Die Bahnhöfe als die Knoten des zu simulierenden Streckennetzes werden in der Simulation durch folgende Eigenschaften (Attribute) charakterisiert:

- **Schlüssel:** Jeder Bahnhof im Netz erhält als identifizierenden Schlüssel eine natürliche Zahl. Der Bahnhofsschlüssel entspricht der Knotennummer eines Bahnhofsknotens im Streckennetz-Graphen.
- **Name:** Jeder Bahnhof wird durch einen Namen gekennzeichnet. Innerhalb der Simulation hat der Bahnhofname untergeordnete Bedeutung, denn die Identifikation eines Bahnhofes erfolgt durch seinen Schlüssel. Der Name hat primär Bedeutung für die Benutzerschnittstelle.
- **Mindesthaltezeit:** Die Mindesthaltezeit an einem Bahnhof ist für alle dort haltenden Züge gleich.
- **Mindestübergangszeit:** Die Mindestübergangszeit an einem Bahnhof ist für alle dort umsteigenden Reisenden gleich.
- **Einwohnerzahl:** Jeder Bahnhof hat einen Einzugsbereich, in dem eine bestimmte Anzahl an Personen wohnt. Dies ist die Einwohnerzahl. Die Einwohnerzahl im Einzugsbereich des Bahnhofes wird als Grundlage für die Schätzung der Verkehrsnachfrage in der Belastungssimulation benötigt.

Jeder Umsteigebahnhof enthält zu jedem Zeitpunkt der Simulation eine bestimmte Anzahl von Reisenden, die mit einem Zubringerzug an diesem Bahnhof angekommen sind und nun auf den nächsten verkehrenden Zug einer bestimmten anderen Linie warten, um auf diesen Zug umzusteigen. Diese Umsteigenden werden unterschieden nach der Linie, in die sie umsteigen wollen und nach der Zeit, die sie noch mindestens warten müssen, um den nächsten Anschlußzug dieser Linie zu erreichen. Für die Verwaltung der Umsteigenden ist eine Unterklasse „Umsteigende“ der Klasse „Bahnhof“ vorhanden. Für jede Linie, auf die umgestiegen wird, gibt es ein Objekt der Unterklasse „Umsteigende“.

Umsteigende an einem Bahnhof. Die Umsteigenden an einem Bahnhof werden durch folgende Attribute charakterisiert:

- **Anzahl Umsteigende:** Anzahl von Reisenden, die mit einem Zubringerzug an diesem Bahnhof angekommen sind und nun auf den nächsten verkehrenden Zug einer bestimmten anderen Linie warten, um auf diesen Zug umzusteigen. Diese Anzahl kann auch 0 sein.

- **Anschlußlinie:** Linie, mit der die Umsteigenden ihre Reise fortsetzen wollen.
- **planmäßige Abfahrtszeit** des planmäßigen Anschlußzuges der Anschlußlinie
- **planmäßige Umsteigezeit** auf den nächsten Anschlußzug der Anschlußlinie
- **tatsächliche Umsteigezeit** auf den nächsten Anschlußzug der Anschlußlinie

Für folgende Ereignisse, die an einem Bahnhof auftreten können, gibt es in der Klasse „Bahnhof“ passende Methoden:

- Reisende erreichen mit einem Zug einen Umsteigebahnhof. Ein Anteil dieser Reisenden steigt auf eine andere Linie um. Die Anzahl der auf einem Bahnhof befindlichen Umsteigenden (das ist die Summe der Anzahl Umsteigender über alle Umsteigende-Objekte für einen Bahnhof) erhöht sich entsprechend.
- Umsteigende verlassen mit einem Zug einen Umsteigebahnhof. Die Anzahl der auf einem Bahnhof befindlichen Umsteigenden vermindert sich entsprechend.

Die zugehörigen Methoden sind:

- **Bestimme die Anzahl der Umsteigenden:** Diese Methode ermittelt die $R_{\%Um,z,l \rightarrow m,s}$ und die $R_{Umab,z,l \rightarrow m,s}$ für den s -ten Bahnhof der Linie L_l . Als Argumente benötigt die Methode die Zubringerlinie L_l , die Zugnummer z des eintreffenden Zuges der Linie L_l und die Linie L_m , auf die umgestiegen werden soll.
- **Füge Umsteigende dem Bahnhof hinzu:** Diese Methode fügt eine Anzahl von Umsteigenden $R_{Umab,z,l \rightarrow m,s}$ zusammen mit der Angabe der Anschlußlinie L_m dem entsprechenden Objekt der Unterklasse „Umsteigende“ des Bahnhofs hinzu und erhöht damit die Anzahl der auf einem Bahnhof befindlichen Umsteigenden.
- **Entferne Umsteigende aus dem Bahnhof:** Diese Methode entfernt die Anzahl von Umsteigenden $r_{Uman,z,l \rightarrow m,s}$, die mit einem Anschlußzug der Linie L_m die Reise forsetzen konnten, aus dem Bahnhof-Objekt. Gleichzeitig schreibt sie die Kennzahlen für die planmäßige und die tatsächliche Umsteigezeit in Minuten und in Personenminuten fort und gibt diese Werte zurück. Die Methode erhält als Argument die Anschlußlinie L_m sowie die planmäßige und die tatsächliche Abfahrtszeit des Anschlußzuges. Das entsprechende Objekt der Unterklasse „Umsteigende“ wird anschließend entfernt.

Ankünfte und Abfahrten der Züge an Bahnhöfen hängen von den Fahrplänen der Linien ab. Sie werden daher nicht der Klasse „Bahnhof“, sondern der Klasse „Linie“ zugeordnet. Die Anzahl Reisender $r_{Aus,z,l,s}$, die bei realisiertem Betrieb am s -ten Bahnhof einer Linie L_l aus einem eintreffenden Zug Nr. z dieser Linie aussteigen, um an diesem Bahnhof (Zielbahnhof) eine Reise zu beenden, werden nicht in den „Bahnhof“-Objekten

verwaltet, da solche Reisenden unmittelbar nach ihrer Ankunft das simulierte System verlassen und daher keine Daten über einen Aufenthalt an einem Bahnhof anfallen. Auch für die Anzahl der Direktfahrer DF_{lzs} , die am betrachteten Bahnhof eine Reise beginnen, werden in den „Bahnhof“-Objekten keine Daten gespeichert. Es wird angenommen, daß solche Reisenden erst mit dem Zeitpunkt der planmäßigen Abfahrtszeit des Zuges Nr. z einer Linie L_l vom r -ten Bahnhof dieser Linie für eine Erfassung der Beförderungszeitanteile bedeutsam sind. Die Zeit, die solche Reisenden eventuell vor der planmäßigen Abfahrtszeit ihres Zuges auf einem Bahnhof verbringen, wird in dem Simulationsmodell nicht berücksichtigt.

6.2.2. Linien

In der Klasse „Linie“ sind die Topologie des Eisenbahnnetzes und die geltenden Soll-Fahrpläne enthalten. Reisen können nur mit Zugfahrten durchgeführt werden, und alle Zugfahrten sind in der Klasse „Linie“ enthalten. Damit enthält die Linien-Klasse auch alle Informationen über die Reisendenströme, die zur Ermittlung der für die Untersuchung und die Lösung der Optimierungsprobleme benötigten Kennzahlen nach (5.97) auf Seite 90 und (5.101) auf Seite 90 benötigt werden.

Jede Linie des zu simulierenden Systems „Eisenbahnnetz“ erhält folgende Attribute:

- **Schlüssel:** Jede Linie erhält als identifizierenden Schlüssel eine natürliche Zahl.
- **Anzahl Zugfahrten:** Anzahl der Zugfahrten, die auf einer Linie an einem Betriebstag verkehren.
- **Abfahrtszeit des ersten Zuges** an einem Betriebstag in Minuten seit Mitternacht.
- **Taktzeit** auf der Linie in Minuten.
- **Startbahnhof:** Schlüssel des ersten Bahnhofes der Linie. Der Startbahnhof kennzeichnet den Linienanfang.
- **Direktfahrer:** Jede Linie L_l enthält für alle $z \in \mathcal{Z}_l$ die Anzahl DF_{lzs} der Direktfahrer von jedem Einstiegsbahnhof r (das sind alle Bahnhöfe der Linie außer dem Endbahnhof) zu jedem Ausstiegsbahnhof s (das sind alle Bahnhöfe der Linie außer dem Anfangsbahnhof) der Linie. Diese Direktfahrerzahlen sind für jede Linie in einem Array abgelegt, das die entsprechenden Anzahlen von Direktfahrern für alle $z \in \mathcal{Z}_l$ und alle Einstiegsbahnhof-Ausstiegsbahnhof-Kombinationen mit $s > r$ aufnehmen kann. Gemäß Definition bildet eine Linie immer genau eine Richtung im Streckennetz ab. Ein Ziel- oder Umsteigebahnhof einer Reise soll weder vor deren Startbahnhof liegen noch mit ihm identisch sein. Es ist daher $DF_{lzs} = 0$ für $s \leq r$.

Die Liniendefinitionen gemäß (5.4) auf Seite 53 sind in einer Datei abgelegt (siehe hierzu auch Abschnitt 6.3.2.3 dieser Arbeit).

Es gibt in der Klasse „Linie“ Methoden für

- das Setzen der Direktfahrer $DF_{l,z,r,s}$, die mit einem Zug z von einem Einstiegsbahnhof r zu einem Ausstiegsbahnhof s fahren,
- die Bestimmung der planmäßigen Abfahrtszeit $T_{Ab,z,l,1}$ der nächsten Zugfahrt z (bezogen auf den aktuellen Simulationszeitpunkt) vom Anfangsbahnhof der Linie
- die Ermittlung der planmäßigen Beförderungszeit eines Zuges zwischen zwei Bahnhöfen der Linie (der zweite Bahnhof muß dazu hinter dem ersten Bahnhof liegen) unter Verwendung von (5.13) auf Seite 62
- die Ermittlung der planmäßigen Beförderungszeit $T_{B,z,l,s}$ eines Zuges z vom Anfangsbahnhof zu einem anderen Bahnhof s der Linie
- die Ermittlung der planmäßigen Ankunfts- und Abfahrtszeiten des nächsten Zuges bzw. eines Zuges Nr. z

Jede Linie enthält eine Folge von Haltebahnhöfen nach dem Startbahnhof. Jeder dieser Haltebahnhöfe ist der Endpunkt eines Linienabschnittes, der am davorliegenden Haltebahnhof beginnt. Eine Linie kann also als Menge von Linienabschnitten angesehen werden. Im folgenden werden diese Linienabschnitte betrachtet. Es ist damit bequem möglich, weitere Daten, die für die Durchführung des Betriebes auf einer Linie von Bedeutung sind, als Attribute eines Linienabschnitts zu erfassen. Für diese Linienabschnitte ist eine Unterklasse „Abschnitt“ der Klasse „Linie“ vorhanden.

Linienabschnitte. Die Abschnitte einer Linie werden durch folgende Attribute charakterisiert:

- Schlüssel des Haltebahnhofes, der der Endpunkt des Abschnittes ist
- Zähler für die Anzahl ankommender und abfahrender Züge an diesem Haltebahnhof
- Mindestbeförderungszeit auf dem Linienabschnitt vom vorhergehenden Bahnhof zum betrachteten Haltebahnhof
- Plan-Beförderungszeitvolumen auf diesem Linienabschnitt in Personenminuten (Produkt aus der Zugauslastung und der Mindestbeförderungszeit)
- realisierte Beförderungszeit auf diesem Linienabschnitt
- Ist-Beförderungszeitvolumen auf diesem Linienabschnitt in Personenminuten (Produkt aus der Zugauslastung und der realisierten Beförderungszeit)

- Ankunftsverspätung eines ankommenden Zuges in Minuten
- Zähler für die Anzahl pünktlich ankommender Züge am betrachteten Haltebahnhof
- Ankunftsverspätungsvolumen bei einem ankommenden Zug in Personenminuten im betrachteten Bahnhof (Produkt aus der Zugauslastung und der Ankunftsverspätung)
- Haltezeitvolumina (Ist und Plan) in Personenminuten (Produkt aus der Anzahl der Durchfahrer auf dem betrachteten Bahnhof und der Plan- bzw. Ist-Haltezeit)
- Umsteigezeitvolumina (Ist und Plan) in Personenminuten der Anzahl der Umsteiger (aufnehmende Perspektive) auf dem betrachteten Bahnhof (Produkt aus der Anzahl der Umsteiger von der betrachteten Linie und der planmäßigen bzw. tatsächlichen Umsteigezeit von Zügen anderer Linien)
- außerplanmäßige Synchronzeit, die einem Zug der betrachteten Linie am betrachteten Haltebahnhof eingeräumt wird
- Synchronzeitvolumen in Personenminuten (Produkt aus der Anzahl der Durchfahrer auf dem betrachteten Haltebahnhof und der außerplanmäßigen Synchronzeit)
- Abfahrtverspätung eines abfahrenden Zuges beim Verlassen des betrachteten Bahnhofs
- Abfahrtverspätungsvolumen bei einem abfahrenden Zug in Personenminuten (Produkt aus der Zugauslastung und der Abfahrtverspätung)

Folgende Ereignisse, die an den Haltebahnhöfen einer Linie auftreten können, werden den Linienabschnitten, aus denen sich die Linie zusammensetzt, als Methoden zugeordnet:

- Ein bestimmter Zug z kommt mit einer bestimmten Ankunftsverspätung und einer bestimmten Ist-Auslastung nach einer bestimmten Ist-Fahrzeit auf dem zugehörigen Linienabschnitt der Linie L_l an einem Haltebahnhof (das sei der s -te Bahnhof dieser Linie) an. Die zugehörige Methode erhält als Argumente
 - die Ankunftsverspätung $t_{AD,z,l,s}$ des Zuges bei der Ankunft am Haltebahnhof,
 - die Information, ob der Zug pünktlich ist, d.h. ob $t_{AD,z,l,s} \leq D_P$ gilt,
 - die Anzahl der Reisenden $z_{a,z,l,s}$ die tatsächlich ankommen,
 - die Anzahl der Reisenden $Z_{A,z,l,s}$, die planmäßig hätten ankommen sollen,
 - die realisierte Beförderungszeit $t_{F,z,l,s}$ und die Mindestbeförderungszeit $T_{F,z,l,s}$ für die Fahrt auf dem zum s -ten Bahnhof gehörenden Linienabschnitt.

Mit diesen Angaben werden die Attribute des Linienabschnittes, die sich auf die Ankunft einer Zugfahrt am zugehörigen Haltebahnhof beziehen, fortgeschrieben.

- Ein bestimmter Zug z fährt mit einer bestimmten Abfahrtverspätung und einer bestimmten Auslastung von diesem Haltebahnhof ab. Dieser Zug hat zuvor eine bestimmte Zeit dort gehalten und ihm wurde eine bestimmte außerplanmäßige Synchronzeit eingeräumt. Ferner ist ihm – neben den Direktfahrern – eine bestimmte Anzahl Umsteiger zugestiegen, nachdem für diese eine bestimmte Umsteigezeit am Haltebahnhof verstrichen ist. Die zugehörige Methode erhält als Argumente
 - die Abfahrtverspätung $t_{DD,z,l,s}$,
 - die Anzahl der Reisenden $z_{a,z,l,s+1}$ die tatsächlich abfahren,
 - die Anzahl der Reisenden $Z_{A,z,l,s+1}$, die planmäßig hätten abfahren sollen,
 - das Haltezeitvolumen (Ist und Plan) in Personenminuten (Produkt aus der Anzahl der Durchfahrer auf dem betrachteten Bahnhof und der Plan- bzw. Ist-Haltezeit),
 - das Umsteigezeitvolumen (Ist und Plan) in Personenminuten der Anzahl der Umsteiger (aufnehmende Perspektive) auf dem betrachteten Bahnhof (Produkt aus der Anzahl der Umsteiger von der betrachteten Linie und der planmäßigen bzw. tatsächlichen Umsteigezeit von Zügen anderer Linien),
 - die außerplanmäßige Synchronzeit $t_{Sy,z,l,s}$, die dem Zug gewährt wurde,
 - das Synchronzeitvolumen in Personenminuten (Produkt aus der Anzahl der Durchfahrer auf dem betrachteten Haltebahnhof und der außerplanmäßigen Synchronzeit).

Mit diesen Angaben werden die Attribute eines Linienabschnittes, die sich auf die Abfahrt einer Zugfahrt beziehen, fortgeschrieben. Es gibt also zwei Methoden für einen Linienabschnitt, die mit den genannten Argumenten die Attribute eines Linienabschnittes ändern.

6.3. Ablauf der Simulation

6.3.1. Die funktionalen Bestandteile

Das Programm, das die Simulation realisiert, besteht im wesentlichen aus Komponenten, die

- das System in einen definierten Anfangszustand versetzen
- mittels einer Belastungssimulation die Direktfahrerzahlen auf den Linien des Liniennetzes und die Umsteigeranteile erzeugen,
- den Eisenbahnbetrieb im Liniennetz über einen bestimmten Zeitraum hinweg simulieren,

- die während der Betriebssimulation ermittelten Kennzahlen aggregieren und so ausgeben, daß eine Analyse der Kennzahlen möglich ist.

Den grundsätzlichen Ablauf der Simulation zeigt Abb. 6.1. Die funktionalen Bestandteile der Simulation werden im folgenden näher betrachtet.

6.3.2. Initialisierung des Systems

6.3.2.1. Zurücksetzen dynamischer Werte

Zweck ist es, das simulierte System in einen definierten Anfangszustand zu versetzen. Hierzu werden beim Start der Simulation zunächst alle dynamischen Datenstrukturen und Kennzahlen der Simulation, die während des Ablaufes verändert werden, initialisiert. Das bedeutet:

- Alle Daten der Linien-Objekte über Zugfahrt-Ereignisse an einem Haltebahnhof werden gelöscht
- Alle Daten der Bahnhof-Objekte über umsteigende Reisende an einem Bahnhof werden gelöscht
- Alle Zähler und Kennzahlen der Linienabschnitts-Objekte werden auf den Wert 0 gesetzt

Anschließend werden die Simulationsparameter gesetzt und die Liniennetzdaten aus einer entsprechenden Datei gelesen.

6.3.2.2. Setzen der Simulationsparameter

Die Simulationsparameter lassen sich unterscheiden in solche, die zunächst mit einem sinnvollen Wert vorbelegt werden (systemdefinierte Parameter), vor einem Simulationslauf jedoch durch Benutzerangaben überschrieben werden können, und solche, die explizit durch den Anwender gesetzt werden müssen (benutzerdefinierte Parameter). Systemdefinierte Simulationsparameter sind:

- Die maximale außerplanmäßige Synchronzeit $T_{\text{Sy}_{\max},l \rightarrow m}$ aller Züge der Linie L_m um Anschlußreisende der Linie L_l aufzunehmen. Dieser Parameter wird mit

$$T_{\text{Sy}_{\max},l \rightarrow m} = 0 \quad \forall L_l, L_m \in \mathcal{L}$$

initialisiert, falls durch den Anwender keine abweichende Angabe erfolgt.

- Der Name einer Datei, die die Bahnhöfe mit ihren Attributen sowie die Definitionen der Linien gemäß 5.4 auf Seite 53 enthält. Dieser Dateiname wird mit `netzdaten` initialisiert, falls durch den Anwender keine abweichende Angabe erfolgt. Siehe zum Einlesen der Liniennetzdaten aus dieser Datei Abschnitt 6.3.2.3.

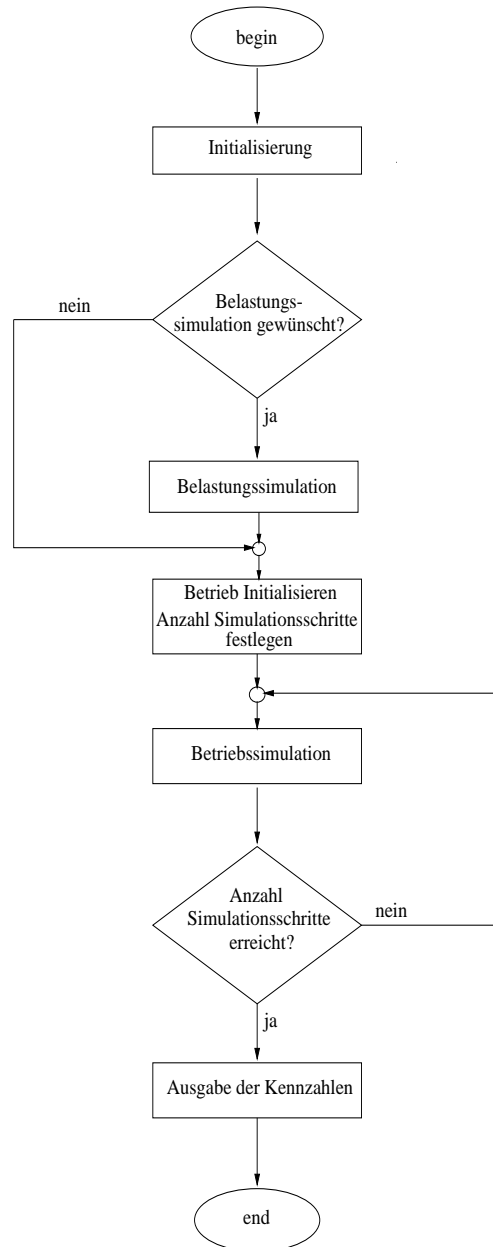


Abbildung 6.1.: Flußdiagramm des Simulationsprogrammes

- Parameter für die Initialisierung des Pseudo-Zufallszahlengenerators.⁴
- Die Angabe, welcher Simulationsteil durchlaufen werden soll (nur Belastungssimulation, nur Betriebssimulation, beide Simulationsteile). Diese Parameter werden so initialisiert, daß lediglich die Betriebssimulation, nicht aber die Belastungssimulation ausgeführt wird, falls durch den Anwender keine abweichende Angabe erfolgt.

Benutzerdefinierte Simulationsparameter sind:

- Der Simulationszeitraum, angegeben als Anzahl der Simulationsschritte. Ein Simulationsschritt entspricht einer Minute im realen System.
- Der Zeitpunkt ab Simulationsbeginn, ab dem mit der Erhebung der Kennzahlen begonnen werden soll. Dieser Zeitpunkt ist in der Einheit „Anzahl Schritte ab Simulationsbeginn“ anzugeben.
- Der Zeitpunkt vor dem Ende der Simulation, zu dem die Erhebung der Kennzahlen beendet werden soll. Dieser Zeitpunkt ist in der Einheit „Anzahl Schritte vor Simulationsende“ anzugeben.
- Der Schwellwert $D_P \geq 0$ zur Bestimmung des Pünktlichkeitsgrades.
- Die Angabe des Regelzuschlages T_{Zuschl} mit $0 \leq T_{\text{Zuschl}} \leq 1$.
- Die Angabe der mittleren Zuwachsverspätung \overline{ID} aller Zugfahrten mit positiver Zuwachsverspätung für die Simulation der Zuwachsverspätungen mittels einer Zufallsverteilung (zur Verteilung der Zuwachsverspätungen siehe Abschnitt 6.3.6.2 dieser Arbeit).
- Die Angabe eines Wertes für die Konstante C , die für die Ermittlung der Verkehrsnachfrage zwischen zwei Orten benötigt wird (zu den Bestimmungsgrößen der Verkehrsnachfrage siehe Abschnitt 6.3.3.2 dieser Arbeit).
- Die Angabe von zwei Zeitpunkten, die die Maxima der Verkehrsnachfrage an einem Betriebstag angeben. Diese Angabe erfolgt in Minuten seit Mitternacht.
- Die Angabe, mit welcher Varianz die Verkehrsnachfrage um diese Maxima streut (siehe zur Oszillation der Verkehrsnachfrage an einem Betriebstag Abschnitt 6.3.3.3 dieser Arbeit).

⁴Für die Erzeugung von Zufallszahlen für die Simulation wird ein additiver Kongruenz-Generator verwendet, wie er in [Knu98, S. 33] beschrieben ist und in der gcc-Version 2.7.2.3 für Solaris 2.6 implementiert wurde.

Die benutzerdefinierten Simulationsparameter und durch Benutzerangaben geänderte systemdefinierte Simulationsparameter sind in einer Datei gespeichert, deren Inhalt bei der Initialisierung eingelesen wird. Alternativ dazu können die Parameter auch beim Aufruf des Simulationsprogrammes in der Kommandozeile übergeben werden. Derart übergebene Simulationsparameter haben Vorrang vor denjenigen, die in der Parameterdatei gesetzt werden.⁵ Wenn notwendige Parameter fehlen oder mit unzulässigen Werten belegt sind, kann die Initialisierung der Simulation nicht korrekt ausgeführt werden. In diesem Fall wird die Simulation abgebrochen.

6.3.2.3. Einlesen der Liniennetzdaten

Nachdem die Simulationsparameter gesetzt worden sind, erfolgt die Initialisierung der Simulation mit den Struktur- und Fahrplandaten des zu simulierenden Eisenbahnnetzes. Die in den Abschnitten 6.2.1 und 6.2.2 beschriebenen Bahnhof- und Linien-Objekte werden entsprechend dieser Angaben erzeugt. Die Beschreibung des Liniennetzes erfolgt in einer Textdatei, die vor Beginn des ersten Simulationslaufes manuell erstellt werden muß. Diese Beschreibung gliedert sich in drei Sektionen:

1. **Bahnhöfe:** Diese Sektion enthält s_{\max} Datensätze. Jeder Datensatz enthält eine Bahnhofsdefinition, bestehend aus dem Schlüssel und dem Namen eines Bahnhofes, der Mindesthaltezeit und der Mindestübergangszeit an dem Bahnhof sowie aus der Einwohnerzahl im Einzugsbereich dieses Bahnhofes als den Eigenschaften eines Bahnhof-Objektes. Die Anzahl der Umsteigenden auf einem Bahnhof kann erst zur Laufzeit der Simulation dynamisch ermittelt werden.
2. **Linien:** Diese Sektion enthält l_{\max} Datensätze. Jeder Datensatz enthält eine Liniendefinition gemäß (5.4) auf Seite 53, die aus dem Linienschlüssel, dem Anfangsbahnhof-Schlüssel mit den Angaben $Zf_{\max,l}$, $T_{0,l}$ und $T_{\Pi,l}$ sowie den Haltebahnhöfen dieser Linie besteht. Die Haltebahnhöfe werden durch ihren Bahnhof-Schlüssel, die planmäßigen Beförderungszeiten $T_{B,z,l,s}$ aller Züge Nr. $z \in \mathcal{Z}_l$ vom Anfangsbahnhof dieser Linie bis zum s -ten Bahnhof dieser Linie (diese werden für alle Zugfahrten einer Linie als gleich angenommen) und die planmäßige Haltezeit $T_{H,z,l,s}$ aller Züge Nr. $z \in \mathcal{Z}_l$ am s -ten Bahnhof dieser Linie (diese werden für alle Zugfahrten einer Linie als gleich angenommen) beschrieben. Die Methoden einer Klasse „Linie“ zur Bestimmung der planmäßigen Abfahrts-, Beförderungs- und Ankunftszeiten lesen diese Angaben aus und berechnen damit die entsprechenden Zeitangaben. Die Kennzahlen, die in den Attributen der Linienabschnitt-Objekte gespeichert werden, werden erst während des Simulationslaufes erhoben; die Direktfahrerzahlen für die Zugfahrten einer Linie an einem Betriebstag werden später bei der Initialisierung der Betriebssimulation eingelesen.

⁵Vgl. dazu [Suc97, S. 27-30]

3. **Außerplanmäßige Synchronzeiten:** Ein für alle Zugfahrten aller Linien geltender Vorgabewert für die maximale außerplanmäßige Synchronzeit, um Anschlußreisende anderer Linien aufzunehmen, wird bereits als systemdefinierter Simulationsparameter festgelegt. Von dieser Vorgabe abweichende Angaben erfolgen in dieser Sektion. Dies gestattet es beispielsweise, zuggattungsabhängige Synchronzeitregelungen, wie sie etwa bei der Deutschen Bahn AG Anwendung finden⁶ oder wie sie in den Problemstellungen in (5.106) und (5.107) auf Seite 93ff. dargestellt sind, zu untersuchen. Dazu werden zunächst Zuggattungen definiert (etwa: Nahverkehrslinien und Fernverkehrslinien als größte Unterscheidung der Linien nach Zuggattungen). Dann wird jede Linie genau einer dieser Zuggattungen zugeordnet. Für alle Linien dieser Zuggattung werden dann dieselben Regelungen für die Gewährung außerplanmäßiger Synchronzeiten in dieser Sektion festgelegt. Die Definition der Zuggattungen und die Zuordnung der Linien wird also nicht explizit vorgenommen, sondern kann implizit der Festlegung entnommen werden, die in dieser Sektion vorgenommen wurde.

Wenn die Beschreibung der Liniennetzdaten hinsichtlich der Formatanforderungen oder hinsichtlich der inhaltlichen Plausibilität (z.B. wenn ein Bahnhof in einer Liniendefinition erscheint, der nicht vorab in der Sektion „Bahnhöfe“ deklariert wurde) fehlerhaft ist, kann die Simulation nicht korrekt initialisiert werden. In diesem Fall wird die Simulation abgebrochen.

Für die Initialisierung des zu simulierenden Systems ergibt sich schließlich der in 6.2 dargestellte Ablauf.

6.3.3. Belastungssimulation

6.3.3.1. Allgemeines

Die Verkehrsnachfrage von einem Startbahnhof zu einem Zielbahnhof, der vom Startbahnhof aus ohne einen Umsteigevorgang erreichbar ist, wird mittels der Direktfahrernumern DF_{lzs} wiedergegeben. Die Anzahl der Direktfahrer kann z.B. empirisch bei der Ermittlung der Verkehrsnachfrage im Rahmen der hierarchischen Verkehrsplanung⁷ festgestellt werden oder durch Auswertung von Buchungsdaten elektronischer Reservierungs- und Fahrscheinverkaufssysteme bestimmt werden. Es wird vor Beginn der Betriebssimulation davon ausgegangen, daß die Anzahl der Direktfahrer bekannt ist.

Ist es nicht möglich oder nicht sinnvoll, auf empirisch ermittelte Verkehrsnachfragedaten zuzugreifen, kann eine Schätzung der Verkehrsnachfrage mittels einer Belastungssimulation der Betriebssimulation vorgeschaltet werden. Anstelle empirisch ermittelter Verkehrsnachfragedaten wird dann die durch diese Belastungssimulation geschätzte Verkehrsnachfrage zugrundegelegt.⁸

⁶vgl. [Deu95c] und Tabelle 2.2 auf S. 18 dieser Arbeit

⁷Vgl. dazu Abschnitt 3.1 dieser Arbeit

⁸Zur Ermittlung der Reisendenströme siehe u.a. [MBG+85, S. 147 ff.]

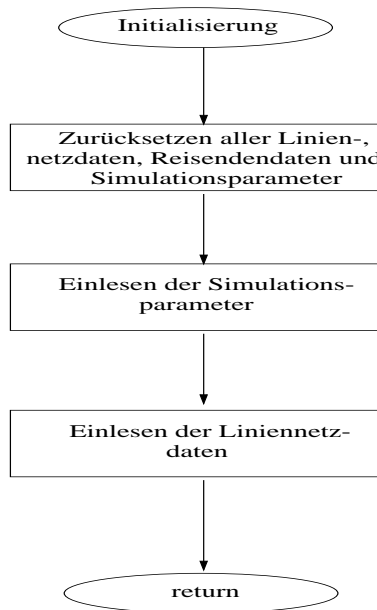


Abbildung 6.2.: Flußdiagramm der Systeminitialisierung

6.3.3.2. Bestimmungsgrößen der Verkehrsnachfrage

Die Verkehrsnachfrage zwischen zwei Orten wird durch verschiedene Aspekte beeinflusst. Dies sind beispielsweise:⁹

- die Größe der Orte, z.B. ausgedrückt durch die Einwohnerzahl
- die wirtschaftliche Bedeutung der Orte, z.B. ausgedrückt durch das örtliche Bruttoinlandsprodukt
- die wirtschaftliche Funktion der Orte (z.B. Zentrum von Handel, Dienstleistungen, Industrie, Verwaltung, Wohnen, Erholung)
- die Reisedauer zwischen den beiden Orten
- die Reisekosten zwischen den beiden Orten
- die Qualität der Verkehrsverbindungen zwischen den beiden Orten

Viele Verkehrsnachfragemodelle, die u.a. auch als Grundlage der hierarchischen Verkehrsplanung verwendet werden, bauen auf dem Gravitationsgesetz auf.¹⁰ Wenn mehrere Verkehrsmittel zur Verfügung stehen, wird die gesamte Verkehrsnachfrage an einem

⁹Vgl. dazu die sehr ausführliche Darstellung in [Voi73, S. 405 ff.]

¹⁰Eine Übersicht verschiedener Verkehrsnachfragemodelle findet sich z.B. in [BDD72, S. 311 ff.]

durchschnittlichen Wochentag ausgehend von einem Ort i in Richtung eines Ortes j (mit $i \neq j$) mit Verkehrsmittel k mit V_{ijk} bezeichnet. Sie läßt sich allgemein ausdrücken als

$$V_{ijk} = C \cdot \frac{B_i^{a_i} \cdot B_j^{a_j}}{E_{ijk}^b} \quad (6.1)$$

Die Einwohnerzahl B_i des Ortes i ist dabei Erzeugungsfaktor von Verkehrsnachfrage. Entsprechend ist B_j als die Einwohnerzahl des Ortes j Faktor der Verkehrsanziehung (Attraktionsfaktor). Die Entfernung E_{ijk} zwischen beiden Orten stellt für die Verkehrsnachfrage zwischen beiden Orten einen Widerstandsfaktor dar. Dieser Widerstandsfaktor kann je nach Zweck in räumlichen oder zeitlichen Einheiten, aber auch in Geldeinheiten ausgedrückt werden. Die Aspekte, die eine Verkehrsnachfrage zwischen i und j entstehen lassen, sind in den Konstanten C , a_i und a_j implizit enthalten. Durch die Wahl unterschiedlicher a_i und a_j kann eine unterschiedliche Bedeutung der Einwohnerzahlen B_i und B_j für die Verkehrsnachfrage berücksichtigt werden. Die Bedeutung des Verkehrsmittels für die Verkehrsnachfrage ist implizit im Parameter b enthalten. Auf diese Weise kann die Verkehrsnachfrage nach verschiedenen Verkehrsmitteln unterschieden werden, indem die Entfernung E_{ijk} je nach Verkehrsmittel unterschiedlich gewichtet wird.

In dieser Arbeit wird ausschließlich das Verkehrsmittel „Eisenbahn“ betrachtet. Es wird grundsätzlich und vereinfachend davon ausgegangen, daß die Bedeutung der Einwohnerzahl im Einzugsbereich eines Bahnhofes in Bezug auf die Verkehrsnachfrage bei jedem betrachteten Ort gleich ist. Ferner läßt sich häufig eine Entwicklung der Verkehrsnachfrage derart beobachten, daß die Verkehrsnachfrage mit dem Produkt aus Erzeugung- und Attraktionsfaktor wächst und mit dem Quadrat des Widerstandsfaktors abnimmt.¹¹ Es soll daher

$$\begin{aligned} a_i = a_j &= 1 \\ b &= 2 \end{aligned} \quad (6.2)$$

gesetzt werden. Ferner kann der Index k hier entfallen, da nur ein Verkehrsmittel betrachtet wird. Damit ergibt sich eine vereinfachte Formel für die Berechnung der Verkehrsnachfrage:

$$V_{ij} = C \cdot \frac{B_i \cdot B_j}{E_{ij}^2} \quad (6.3)$$

Diese Gesetzmäßigkeit wurde erstmals 1889 im Rahmen von Untersuchungen über die Verkehrsnachfrage bei der österreichischen Nordwestbahn ausgedrückt.¹² Sie ist bis heute Grundlage einfacher Modelle zur Bestimmung der Verkehrsnachfrage.¹³ In der Konstante C muß im wesentlichen die Tatsache berücksichtigt werden, daß diejenige Verkehrsnachfrage bestimmt werden soll, die mit dem Verkehrsmittel Eisenbahn im simulierten

¹¹Entsprechende Darstellungen, die diese Feststellung zu bestätigen scheinen, finden sich u.a. in [Pir49, S. 178 f. und S. 182 f.] und verallgemeinert in [Tho78, S. 37 ff.]

¹²Vgl. [BDD72, S. 311 ff.]

¹³Vgl. z.B. [BDD72]

Liniennetz an einem Betriebstag gedeckt wird. Wenn ein reales Netz des Eisenbahnpersonenverkehrs untersucht wird, dann ist zu berücksichtigen welcher Anteil der im realen System durchgeführten Zugfahrten im simulierten Netz abgebildet sind. Dazu sei Zf_{Sim} mit $0 \leq Zf_{\text{Sim}} \leq 1$ der Anteil der Zugfahrten des zu untersuchenden Realsystems, der in der Simulation abgebildet wird. Es wird dann C mit

$$C = Zf_{\text{Sim}} \quad (6.4)$$

festgelegt.

Bei der Festlegung der Einwohnerzahlen B_i und B_j ist der Marktanteil des Verkehrsmittels Eisenbahn und der Einzugsbereich eines Bahnhofs zu berücksichtigen. Das bedeutet:

- Es wird nur das Verkehrsmittel Eisenbahn betrachtet. Hierzu bezeichne M_{Bahn} mit $0 \leq M_{\text{Bahn}} \leq 1$ den durchschnittlichen Marktanteil der Eisenbahn am Personenverkehr. Dieser betrug 1997 rund 9,9%¹⁴. Es wird bei der Festlegung der Einwohnerzahl im Einzugsbereich eines Bahnhofs daher davon ausgegangen, daß nur rund 10% der Einwohner des jeweiligen Ortes die Verkehrsnachfrage mit der Eisenbahn decken (Bahnreisende).
- Es wird festgelegt, daß rund 25% der Bahnreisenden eines Ortes im Einzugsbereich eines Bahnhofs wohnen, der in der Simulation betrachtet wird. Dies entspricht der Anzahl Bahnreisender, die einen Bahnhof des betrachteten Liniennetzes zum Antritt einer Reise in einem Zeitraum von bis zu 10 Minuten erreichen.¹⁵

Eine derartige Festlegung der Konstante C und der Einwohnerzahlen im Einzugsbereich eines Bahnhofs ermöglicht es, mit (6.3) die Beförderungskapazität der eingesetzten Reisezüge für Fahrten zwischen zwei Orten i und j sinnvoll zu approximieren.¹⁶

6.3.3.3. Zeitabhängige Oszillation der Verkehrsnachfrage

Charakteristisch für die Verkehrsnachfrage im Reiseverkehr sind periodisch auftretende Schwankungen. Diese Schwankungen können

- tageszeitlich
- wöchentlich
- saisonal, d.h. innerhalb eines Jahreszeitraumes
- konjunkturabhängig, d.h. innerhalb des Zeitraumes eines Konjunkturzyklus

¹⁴Vgl. [Sta98, S. 301]

¹⁵Der verbleibende Anteil Bahnreisender benötigt eine längere Zugangszeit oder wohnt im Einzugsbereich eines anderen Bahnhofs, der in dieser Simulation nicht betrachtet wird. Zur Lage und zum Einzugsbereich von Bahnhöfen vgl. [Wei99]

¹⁶Zur Kapazität der eingesetzten Reisezugwagen siehe z.B. [WTR95] und [Deu96c, S. 74 ff.]

- als allgemeiner Trend während eines längeren Zeitraumes von mehreren Jahrhunderten
- aufgrund sonstiger Ereignisse außergewöhnlicher Art (z.B. Streiks, überregionale Großveranstaltungen)

beobachtet werden.¹⁷ Während eines Tages zeigen sich deutliche Unterschiede bei der Verkehrsnachfrage auf einer bestimmten Relation (d.h. einer bestimmten Verbindung zwischen zwei Orten):

- Nachts wird in der Regel eine geringere Verkehrsnachfrage festgestellt als tagsüber.
- Es kann ein vormittägliches und ein nachmittägliches Maximum der Verkehrsnachfrage beobachtet werden.
- In den frühen Morgenstunden nimmt die Verkehrsnachfrage bis zum vormittäglichen Maximum meist stetig zu, danach erfolgt zunächst eine stetige Abnahme und dann erneut eine stetige Zunahme bis zum nachmittäglichen Maximalwert. Dann nimmt die Verkehrsnachfrage wieder stetig ab, bis ein nächtlicher Minimalwert erreicht wird.

Eine mögliche tageszeitabhängige Verteilung der Verkehrsnachfrage auf einer bestimmten Relation zeigt Abb. 6.3.¹⁸

Bezogen auf eine Woche kann festgestellt werden, daß die Verkehrsnachfrage an den Wochenenden (etwa von Freitagmittag bis Sonntagabend) meist eine andere Struktur, Richtung und Höhe hat als an den übrigen Wochentagen. Wesentliche Ursachen hierfür sind Fahrten der Wochenendpendler und Ausflugsverkehr. Verkehrsnachfrageschwankungen, die im Laufe eines Jahres beobachtet werden können, sind beispielsweise durch Urlaubsreiseverkehr und Reiseverkehr zu bestimmten Feiertagen begründet. In Zeiten konjunktureller Schwäche kann häufig eine grundsätzlich geringere Verkehrsnachfrage festgestellt werden als zu konjunkturstarke Zeitabschnitten.¹⁹

Als Bezugszeitraum für die Belastungssimulation wird ein Betriebstag gewählt. Wöchentliche, saisonale und konjunkturelle Schwankungen der Verkehrsnachfrage sowie Schwankungen der Verkehrsnachfrage im Rahmen eines allgemeinen langfristigen Trends und aufgrund sonstiger Ereignisse sollen in der Belastungssimulation nicht berücksichtigt werden. Für den Fall, daß der Simulationszeitraum größer als ein Tag gewählt wird, wird angenommen, daß die Verkehrsnachfrage an jedem Tag gleich sei. Es ist denkbar, daß an verschiedenen Tagen unterschiedliche Verkehrsnachfrage auftritt. Das zugrundeliegende Verkehrsnachfragemodell nach (6.1) bzw. nach (6.3) gestattet es grundsätzlich, dies zu berücksichtigen. Es lagen jedoch keine geeigneten Daten vor, die es erlauben, die Belastungssimulation entsprechend zu parametrisieren.

¹⁷Vgl. [Pir49, S. 171 ff.]

¹⁸Entsprechende Darstellungen finden sich u.a. auch in [Pir49, S. 175] und [Tho78, S. 44]

¹⁹Vgl. [Voi73, S. 544 ff.]

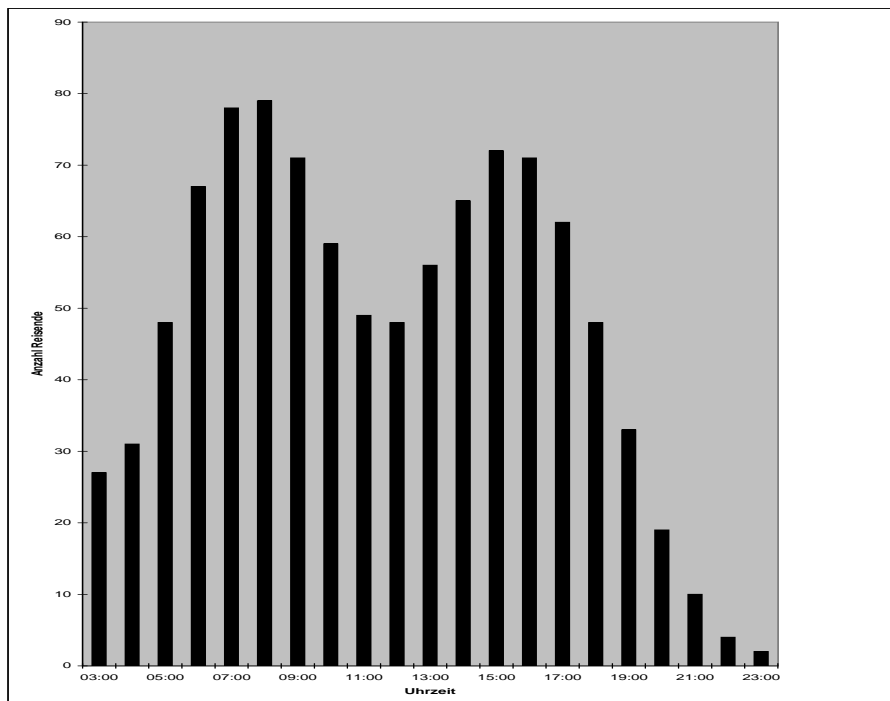


Abbildung 6.3.: Höhe der Verkehrsnachfrage in Abhängigkeit von der Tageszeit auf einer bestimmten Relation

Insgesamt zeigt sich also, daß die Anzahl der Direktfahrer $DF_{l_z r s}$, die auf Linie L_l mit Zug Nr. z vom r -ten Bahnhof bis zum s -ten Bahnhof dieser Linie fahren²⁰ entsprechend (6.3) einerseits abhängig ist

- von der Konstante C der Verkehrsnachfrage,
- von der Bevölkerungszahl B_{lr} im Einzugsbereich des r -ten und der Bevölkerungszahl B_{ls} im Einzugsbereich des s -ten Bahnhofes der Linie L_l ,
- von der Entfernung zwischen dem r -ten und dem s -ten Bahnhof der Linie L_l . Diese wird charakterisiert durch die entsprechende planmäßige Beförderungszeit. Deshalb wird die Entfernung E_{rs} zwischen dem r -ten und dem s -ten Bahnhof einer Linie L_l für die Belastungssimulation mit $E_{rs} = T_{An,z,l,s} - T_{Ab,z,l,r}$ festgelegt.

und andererseits

- von der Tageszeit, zu der ein Zug z auf dieser Linie planmäßig am r -ten Bahnhof als Quellort der Verkehrsnachfrage abfährt.

Das bedeutet allgemein

$$DF_{l_z r s} = f(C, B_{lr}, B_{ls}, T_{An,z,l,s}, T_{Ab,z,l,r}) \quad (6.5)$$

Die Modellierung der tageszeitlichen Schwankungen der Verkehrsnachfrage ist insbesondere von Bedeutung, weil für die Simulation ein Betriebstag als kleinste sinnvolle Untersuchungseinheit festgelegt ist.

Hierzu gebe es folgendes Zufallsexperiment E_Z : Betrachtet wird ein beliebiger Reisender, der an einem Betriebstag mit einer Linie L_l vom r -ten Bahnhof zum s -ten Bahnhof dieser Linie fahren will. Wann will dieser Reisende am r -ten Bahnhof abfahren? Mögliches Ergebnis ist ein Zeitpunkt t in einem Intervall $t_a \leq t \leq t_e$. Somit ist $T = [t_a, t_e]$ der Ereignisraum Ω von E_Z . Es soll nun die Wahrscheinlichkeit dafür bestimmt werden, daß Reisende bereit sind, zu einem Zeitpunkt t vom r -ten Bahnhof zum s -ten Bahnhof der Linie L_l abzufahren. Es sei $X : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ eine Zufallsvariable zu E_Z mit der Bedeutung $X(t) = t$, d.h. X repräsentiert den Abfahrtszeitpunkt eines Reisenden, der bei E_Z ermittelt wird.

Die Eigenschaften der täglichen Verkehrsnachfrageschwankungen legen es nahe, die Dichte von X mittels einer Konvexkombination zweier Normalverteilungen zu approximieren. Diese Normalverteilungen haben jeweils ein Maximum zum Zeitpunkt μ_{vorm} des vormittäglichen Maximums der Verkehrsnachfrage bzw. zum Zeitpunkt μ_{nachm} des nachmittäglichen Maximums der Verkehrsnachfrage²¹ und schwanken vormittags mit einer

²⁰Gemäß Definition bildet eine Linie immer genau eine Richtung im Streckennetz ab. Für die folgenden Ausführungen soll daher immer $DF_{l_z r s} = 0$ für $s \leq r$ gelten, weil ein Ziel- oder Umsteigebahnhof einer Reise weder vor deren Startbahnhof liegen soll noch mit ihm identisch sein soll. Vgl. dazu auch Abschnitt 5.5.3 dieser Arbeit.

²¹Diese Zeitpunkte werden in Minuten nach Mitternacht angegeben.

Standardabweichung von σ_{vorm} bzw. nachmittags mit einer Standardabweichung von σ_{nachm} um diese Maxima.²²

Die Dichtefunktionen lauten:

$$f_1(t) = \frac{1}{\sigma_{\text{vorm}}\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu_{\text{vorm}}}{\sigma_{\text{vorm}}}\right)^2} \quad (6.6)$$

$$f_2(t) = \frac{1}{\sigma_{\text{nachm}}\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu_{\text{nachm}}}{\sigma_{\text{nachm}}}\right)^2} \quad (6.7)$$

Für die gemeinsame Dichtefunktion wird angenommen

$$f(t) = q_1 \cdot f_1(t) + q_2 \cdot f_2(t) \quad \text{mit} \quad q_1 + q_2 = 1 \quad (6.8)$$

Dann gilt für die gemeinsame Verteilungsfunktion

$$\begin{aligned} F(t) = P(X \leq t) &= q_1 \cdot \int_{-\infty}^t \frac{1}{\sigma_{\text{vorm}}\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu_{\text{vorm}}}{\sigma_{\text{vorm}}}\right)^2} dt \\ &+ q_2 \cdot \int_{-\infty}^t \frac{1}{\sigma_{\text{nachm}}\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu_{\text{nachm}}}{\sigma_{\text{nachm}}}\right)^2} dt \end{aligned} \quad (6.9)$$

Die Reisendenverteilung kann durch Variation der q_i für den Vormittags- und den Nachmittagszeitraum unterschiedlich gewichtet werden. Ein Beispiel für eine entsprechende Dichtefunktion mit $\mu_{\text{vorm}} = 450$ (entspricht 07.30 Uhr), $\mu_{\text{nachm}} = 990$ (entspricht 16.30 Uhr), $\sigma_{\text{vorm}} = 150$, $\sigma_{\text{nachm}} = 165$ und $q_1 = q_2 = 0.5$ zeigt Abb. 6.4.

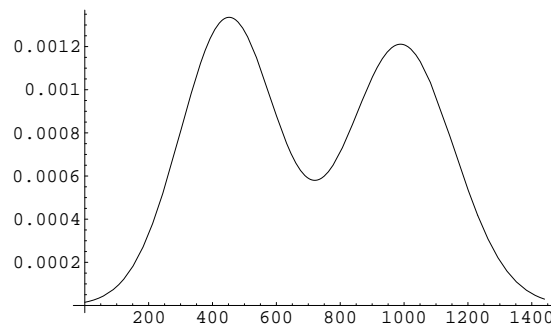


Abbildung 6.4.: Dichtefunktion für die Wahrscheinlichkeit, daß Reisende zu einem bestimmten Zeitpunkt einen Startbahnhof verlassen

Es seien DF_{lrs} mit $s > r$ die Anzahl der Reisenden, die an einem Betriebstag insgesamt auf der Linie L_l vom r -ten Bahnhof zu einem nachfolgenden s -ten Bahnhof dieser Linie

²²Es kann sich bei diesen Zeitpunkten der Verkehrsnachfrage-Maxima grundsätzlich um zwei beliebige Zeitpunkte an einem Betriebstag handeln. Sie sind nicht an spezielle Tageszeiten gebunden. Aus Gründen einer realitätsnahen Modellbildung wurden jedoch die Bezeichnungen „Vormittag“ und „Nachmittag“ gewählt.

fahren wollen. Diese Anzahl läßt sich beispielsweise mit dem Verkehrsnachfragemodell aus (6.3) bestimmen. Diejenigen Direktfahrer DF_{lzs} , die an einem Betriebstag auf einer Linie L_l mit Zug Nr. z vom r -ten Bahnhof zum s -ten Bahnhof fahren wollen, ist der Anteil Fahrwilliger aus DF_{lrs} , der seit der Abfahrt des letzten Zuges Nr. $z - 1$ und bis zur Abfahrt dieses Zuges Nr. z abfahrbereit ist. Das heißt

$$\begin{aligned} DF_{lzs} &= [F(t_2) - F(t_1)] \cdot DF_{lrs} \\ \text{mit } t_1 &= T_{\text{Ab},z-1,l,r} + 1 \\ \text{und } t_2 &= T_{\text{Ab},z,l,r} \end{aligned}$$

6.3.4. Ablauf der Belastungssimulation

Im ersten Schritt der Belastungssimulation wird zunächst für jede Linie mittels (6.3) und (6.4) die Verkehrsnachfrage ermittelt, die an einem Betriebstag zwischen jedem Paar aus Einstiegs- und nachfolgendem Ausstiegsbahnhof auf der Basis planmäßiger Zugfahrten dieser Linie gedeckt wird. In einem nächsten Schritt werden die tageszeitlichen Schwankungen der Verkehrsnachfrage berücksichtigt.

Die so für alle Zugfahrten einer Linie von jedem Einstiegsbahnhof zu jedem Ausstiegsbahnhof dieser Linie ermittelten Direktfahrerzahlen DF_{lzs} werden für jede Linie in eine editierbare Datei ausgegeben. Zu jeder Linie $L_l \in \mathcal{L}$ gibt es je eine derartige Direktfahrer-Datei (insgesamt gibt es also l_{\max} Direktfahrer-Dateien). Zu jedem Einstiegsbahnhof $S_{l,r}$, $1 \leq r \leq \text{Bf}_l - 1$ gibt es in jeder Direktfahrer-Datei je eine Sektion (insgesamt gibt es also $\text{Bf}_l - 1$ Sektionen) mit jeweils $Zf_{\max,l}$ Zeilen und $\text{Bf}_l - 1$ Spalten. Jede Spalte repräsentiert einen Ausstiegsbahnhof $S_{l,s}$ mit $2 \leq s \leq \text{Bf}_l$.²³

Sodann wird für jeden Umsteigebahnhof der durchschnittliche Anteil $R_{\% \text{Um},z,l \rightarrow m,s}$ der auf einer Linie L_l mit Zug Nr. z bei planmäßigem Betrieb am s -ten Bahnhof dieser Linie eintreffenden Direktfahrer, die auf den nächsten planmäßigen Anschlußzug einer Linie L_m umsteigen, ermittelt. Stehen entsprechende Daten aus empirischen Untersuchungen hierzu nicht zur Verfügung, kann dies durch die Belastungssimulation geleistet werden. Hierzu werden folgende Annahmen getroffen:

1. Umsteiger steigen nicht in eine Linie um, die als Zielbahnhof des nächsten Abschnittes einen Bahnhof hat, der auch Haltebahnhof der Linie ist, von der aus umgestiegen werden soll (Vermeidung von Rück- und Rundfahrten und ständigem Linienwechsel bei parallel laufenden Linien),
2. umsteigende Reisende akzeptieren keine planmäßigen Umsteigezeiten, die eine Stunde überschreiten. Es soll dann $R_{\% \text{Um},z,l \rightarrow m,s} = 0$ gelten.
3. Sonst liege für alle Umsteigebahnhöfe, alle in Frage kommenden Linienpaare und alle Zugfahrten der durchschnittliche Anteil der Umsteiger in einem Intervall $0 \leq R_{\% \text{Um},z,l \rightarrow m,s} \leq R_{\% \text{Um}}^{\max}$ mit $0 \leq R_{\% \text{Um}}^{\max} \leq 1$

²³Zur Erinnerung: Es wird $DF_{lzs} = 0$ für $s \leq r$ gesetzt.

Auch wenn die Punkte 1 und 2 nicht erfüllt sind, kann es vorkommen, daß aus einem bestimmten Zug keine Reisenden auf eine andere Linie umsteigen. Um dies abzubilden, wird ein Wert von 0 in das Intervall für $R_{\%Um,z,l \rightarrow m,s}$ bzw. für $R_{\%Um}^{\max}$ einbezogen.

Folgende Aspekte sind darüberhinaus zu beachten:

- Umsteiger steigen nicht in dieselbe Linie um, mit der sie am Umsteigebahnhof angekommen sind,
- Umsteiger können nicht in eine Linie umsteigen, die am Umsteigebahnhof ihren Endbahnhof erreicht hat,
- Umsteiger können nicht aus einer Linie umsteigen, die am Umsteigebahnhof ihren Anfangsbahnhof hat,
- an jedem Umsteigebahnhof muß $\sum_i R_{\%Um,z,l \rightarrow i,s} \leq 1$ erfüllt sein, weil höchstens 100% der eintreffenden Direktfahrer einer bestimmten Zugfahrt auf andere Linien umsteigen können. Dies muß durch eine geeignete Wahl von $R_{\%Um}^{\max}$ gewährleistet werden.

Betrachtet werde nun ein Umsteigebahnhof $S_{l,s} = S_{m,t}$. Es sei X eine gleichverteilte Zufallszahl aus dem Intervall $[0; R_{\%Um}^{\max}]$. Dann wird dieser durchschnittliche Anteil $R_{\%Um,z,l \rightarrow m,s}$ der auf Linie L_l mit Zug Nr. z bei planmäßigem Betrieb am s -ten Bahnhof der Linie L_l eintreffenden Direktfahrer, die auf den nächsten planmäßigen Anschlußzug der Linie L_m umsteigen, wie folgt festgelegt:

$$R_{\%Um,z,l \rightarrow m,s} = \begin{cases} 0 & \text{falls } l = m \\ 0 & \text{falls } S_{l,s} = S_{m,Bf_m} \\ 0 & \text{falls } s = 1 \\ 0 & \text{falls } \exists S_i \in \{S_{l,1}, \dots, S_{l,s-1}, S_{l,s+1}, \dots, S_{l,Bf_l}\} \\ & \text{mit } S_{m,t+1} = S_i \\ 0 & \text{falls } T_{Um,z,l \rightarrow m,s} > 60 \\ X & \text{sonst} \end{cases} \quad (6.10)$$

Diese Umsteigeranteile $R_{\%Um,z,l \rightarrow m,s}$ werden in editierbare Dateien geschrieben. Es gibt zu jedem Umsteigebahnhof S_i mit $S_i = S_{l,s} = S_{m,t}$ eine derartige Datei. Jede Datei enthält $|\mathcal{L}_i|$ Sektionen mit jeweils einer Sektion für jedes $L_k \in \mathcal{L}_i$. Jede Sektion enthält $Zf_{\max,k}$ Zeilen und $|\mathcal{L}_i|$ Spalten. Jede Zeile repräsentiert eine Zugfahrt z einer zubringenden Linie L_k , von der aus umgestiegen werden soll, und jede Spalte repräsentiert eine Linie $L_k \in \mathcal{L}_i$, in die umgestiegen werden kann.

Es ergibt sich schließlich der in Abb. 6.5 dargestellte Ablauf der Belastungssimulation. Diese Belastungssimulation dient nicht dazu, das Verhalten des Systems „Eisenbahn-Liniennetz“ über einen bestimmten Zeitraum hinweg abzubilden, sondern vielmehr dazu, die Voraussetzungen hinsichtlich der Verkehrsnachfrage für das zu simulierende System zu schaffen. Diese Belastungssimulation erzeugt quasi statisch eine Plan-Verkehrsnachfrage

für einen bestimmten Betriebstag, wie sie zu Beginn der dynamischen Betriebssimulation zugrundegelegt werden soll. Daher enthält die Belastungssimulation auch keinerlei Komponenten (wie z.B. eine Simulationsuhr), die dynamisches Systemverhalten abbilden.

Die Ergebnisse der Belastungssimulation können durch Editieren der entsprechenden Dateien modifiziert werden, z.B. mit empirisch ermittelten Werten der Verkehrsnachfrage oder entsprechenden Versuchsdaten.

6.3.5. Initialisierung der Betriebssimulation

Ein Großteil der für die Betriebssimulation wesentlichen Parameter wird bereits bei der Initialisierung des Gesamtsystems gesetzt²⁴. Die zur Initialisierung der Betriebssimulation zusätzlich notwendigen Schritte liegen daher lediglich darin, Daten der Verkehrsnachfrage einzulesen, die Simulationsuhr zurückzusetzen und anschließend zu starten. Eine erfolgreiche Initialisierung der Betriebssimulation setzt voraus, daß

- es zu jedem $L_l \in \mathcal{L}$ eine Direktfahrer-Datei gibt, die dem erforderlichen Format genügt.²⁵
- es für jeden Umsteigebahnhof eine Datei gibt, die die Umsteigeranteile im erforderlichen Format enthält.

Die entsprechenden Dateien können durch die Belastungssimulation erzeugt und danach ggf. durch manuelles Editieren anhand empirischer Daten angepaßt werden oder von vornherein manuell mittels eines Texteditors erstellt werden. Bei der Initialisierung der Betriebssimulation wird geprüft, ob die genannten Voraussetzungen hinsichtlich Existenz und der Formatanforderungen der Dateien erfüllt sind. Wenn dies nicht der Fall ist, wird die Simulation beim Erkennen eines Fehlers beendet. Anderenfalls sind nun alle Voraussetzungen vorhanden, die für den Ablauf der eigentlichen Simulation des Eisenbahnbetriebes erforderlich sind. Es ergibt sich damit der in Abb. 6.6 dargestellte Ablauf für die Initialisierung der Betriebssimulation.

6.3.6. Betriebssimulation

6.3.6.1. Darstellung eines Simulationsschrittes

Die in der Realität stetig laufende Zeit wird in der Betriebssimulation zu vollen Minuten diskretisiert. Jeder Simulationsschritt bildet das Geschehen im Liniennetz zu Beginn einer vollen Minute ab. Ein Betriebstag umfaßt damit 1440 Simulationsschritte. Dies entspricht den realen Gegebenheiten des Eisenbahnbetriebes, in dem sich Abfahrts- und

²⁴siehe Abschnitt 6.3.2 dieser Arbeit

²⁵Siehe dazu auch den Abschnitt 6.3.4 dieser Arbeit

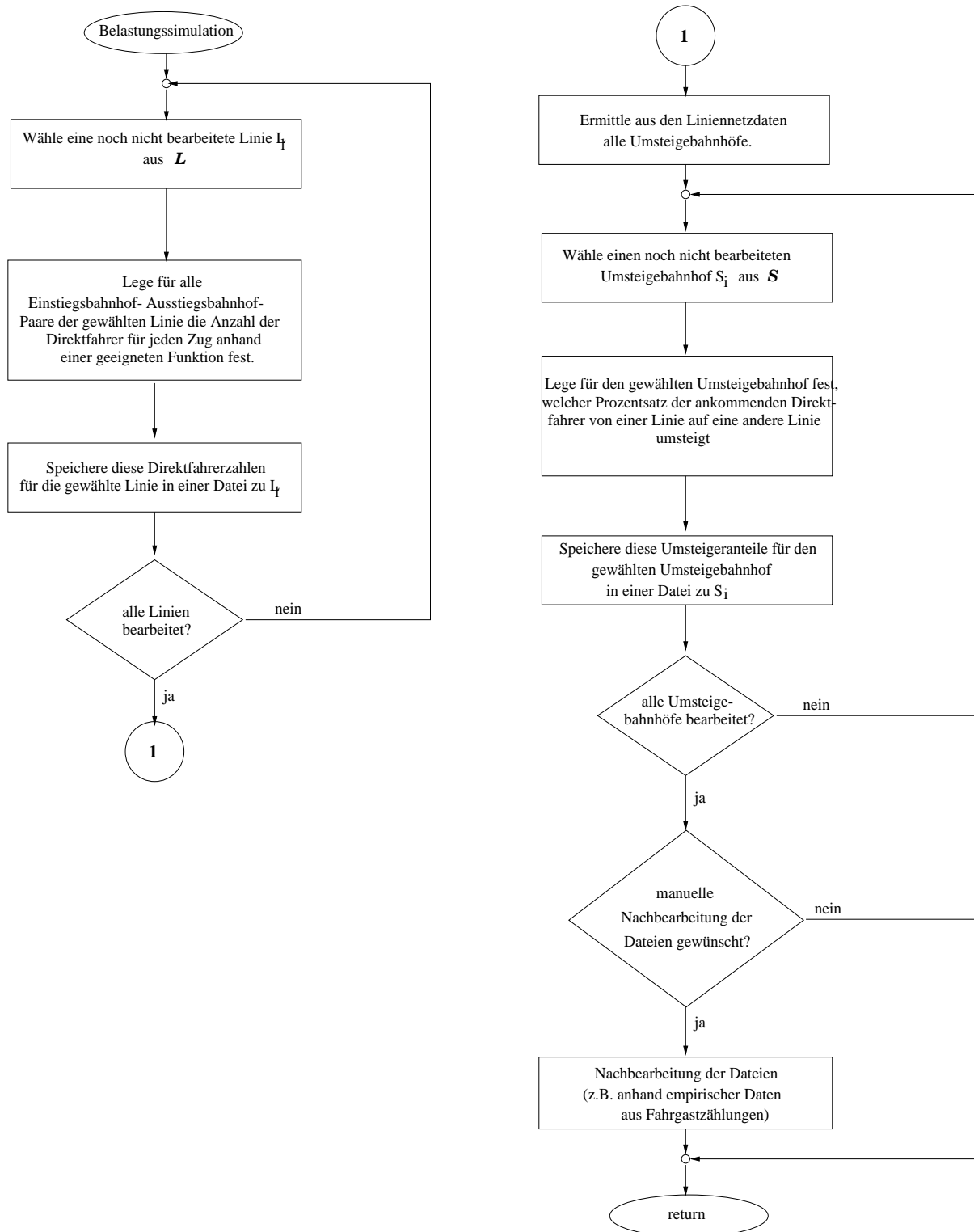


Abbildung 6.5.: Flußdiagramm der Belastungssimulation

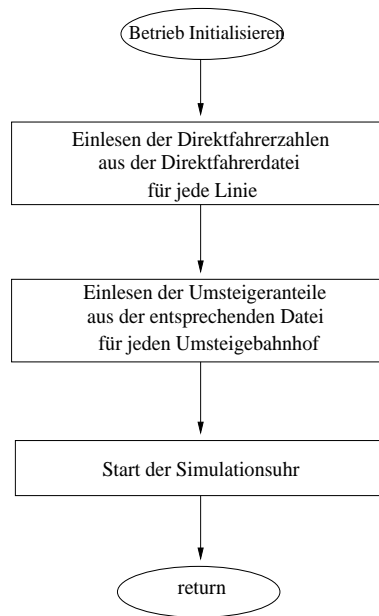


Abbildung 6.6.: Flußdiagramm für die Initialisierung der Betriebssimulation

Ankunftsereignisse im Fahrplan ebenfalls auf den Beginn einer vollen Minute beziehen.²⁶ Es bezeichne $t_{\text{Sim}}^{\text{max}}$ den Simulationszeitraum und t_{Sim} mit $0 \leq t_{\text{Sim}} \leq t_{\text{Sim}}^{\text{max}}$ die Anzahl der bisher durchlaufenen Simulationsschritte. Jeder Simulationszeitraum beginnt um Mitternacht mit $t_{\text{Sim}} = 0$. Mit $t_{\text{Sim}}^{\text{Tag}}$ wird die Anzahl der Simulationsschritte ($\hat{=}$ Minuten) seit dem Beginn eines neuen Betriebstages (Mitternacht) bezeichnet. Alle Fahrplanangaben beziehen sich auf diese Größe. Für $t_{\text{Sim}}^{\text{max}} > 1440$ gilt: $t_{\text{Sim}}^{\text{Tag}} = t_{\text{Sim}} \bmod 1440$.

In jedem Simulationsschritt können die in den Abschnitten 6.2.1 und 6.2.2 bei der Beschreibung der Bahnhof- und Linien-Objekte genannten Ereignisse auftreten:

- Ein Zug kommt mit einer bestimmten Ankunftsverspätung (diese kann auch kleiner oder gleich 0 sein) und einer bestimmten Ist-Auslastung nach einer bestimmten Ist-Fahrzeit auf dem vorangegangenen Linienabschnitt an einem Haltebahnhof an.
- Reisende erreichen mit diesem Zug einen Haltebahnhof. Diese Reisenden beenden entweder ihre Reise oder sie steigen – wenn der Bahnhof ein Umsteigebahnhof ist – auf den nächsten Anschlußzug einer anderen Linie um.
- Ein Zug fährt mit einer bestimmten Abfahrtverspätung (diese kann auch 0 sein) und einer bestimmten Auslastung von einem Haltebahnhof ab. Dieser Zug hat zuvor eine bestimmte Zeit dort gehalten und ihm wurde gegebenenfalls eine bestimmte außerplanmäßige Synchronzeit größer als 0 Minuten eingeräumt.

²⁶Vgl. z.B. [LOBW84, S. 83f.] und (5.7) auf Seite 61

- Reisende verlassen mit diesem Zug einen Bahnhof. Diese Reisenden können entweder Direktfahrer sein oder Umsteiger, die aus einer anderen Linie in diesen Zug umgestiegen sind (vorausgesetzt, der Bahnhof ist ein Umsteigebahnhof).

Die Betriebssimulation besteht im wesentlichen darin, das Auftreten solcher Ereignisse nachzubilden, die Objekte der Simulation entsprechend zu modifizieren und entsprechende Kennzahlen fortzuschreiben.

Kern der Betriebssimulation sind die Zugfahrten, die aufgrund der Fahrpläne, die in den Linien-Objekten verwaltet werden, im simulierten System vorhanden sind. Eine Zugfahrt kann sich während der Simulation grundsätzlich in folgenden Zuständen befinden, wobei sowohl das planmäßige Geschehen als auch das tatsächliche Geschehen für die Simulation von Bedeutung ist:

- Die planmäßige Abfahrt eines Zuges z vom Anfangsbahnhof der Linie L_l stehe an diesem Betriebstag noch bevor, wenn $t_{\text{Sim}}^{\text{Tag}} < T_{\text{Ab},z,l,1}$ ist. Entsprechend steht die tatsächliche Abfahrt bevor, wenn $t_{\text{Sim}}^{\text{Tag}} < t_{\text{Ab},z,l,1}$ ist. Zum Zeitpunkt der planmäßigen Abfahrtszeit am Anfangsbahnhof einer Linie tritt ein Zug in das simulierte System ein.
- Ein Zug z der Linie L_l verlasse planmäßig einen Bahnhof, wenn $t_{\text{Sim}}^{\text{Tag}} = T_{\text{Ab},z,l,i}$ ist mit $i = 1, \dots, \text{Bf}_l - 1$. Entsprechend verläßt dieser Zug tatsächlich einen Bahnhof, wenn $t_{\text{Sim}}^{\text{Tag}} = t_{\text{Ab},z,l,i}$ ist mit $i = 1, \dots, \text{Bf}_l - 1$.
- Ein Zug z der Linie L_l erreiche planmäßig einen Bahnhof, wenn $t_{\text{Sim}}^{\text{Tag}} = T_{\text{An},z,l,i}$ ist mit $i = 2, \dots, \text{Bf}_l$. Er erreicht diesen Bahnhof tatsächlich, wenn $t_{\text{Sim}}^{\text{Tag}} = t_{\text{An},z,l,i}$ ist mit $i = 2, \dots, \text{Bf}_l$.
- Ein Zug z der Linie L_l sei planmäßig zwischen zwei aufeinanderfolgenden Haltebahnhöfen i und $i + 1$ dieser Linie unterwegs, wenn $T_{\text{Ab},z,l,i} < t_{\text{Sim}}^{\text{Tag}} < T_{\text{An},z,l,i+1}$ ist mit $i = 1, \dots, \text{Bf}_l - 1$. Er ist tatsächlich unterwegs, wenn $t_{\text{Ab},z,l,i} < t_{\text{Sim}}^{\text{Tag}} < t_{\text{An},z,l,i+1}$ ist mit $i = 1, \dots, \text{Bf}_l - 1$.
- Ein Zug z der Linie L_l halte planmäßig an einem Haltebahnhof i dieser Linie, wenn $T_{\text{An},z,l,i} < t_{\text{Sim}}^{\text{Tag}} < T_{\text{Ab},z,l,i}$ ist mit $i = 2, \dots, \text{Bf}_l - 1$. Er hält tatsächlich, wenn $t_{\text{An},z,l,i} < t_{\text{Sim}}^{\text{Tag}} < t_{\text{Ab},z,l,i}$ ist mit $i = 2, \dots, \text{Bf}_l - 1$.
- Die planmäßige Ankunft eines Zuges z am Endbahnhof der Linie L_l sei an diesem Betriebstag bereits erfolgt, wenn $t_{\text{Sim}}^{\text{Tag}} > T_{\text{An},z,l,\text{Bf}_l}$ ist. Sie ist tatsächlich erfolgt, wenn $t_{\text{Sim}}^{\text{Tag}} > t_{\text{An},z,l,\text{Bf}_l}$ ist. Zum Zeitpunkt der tatsächlichen Ankunft eines Zuges an seinem Endbahnhof wird der Zug aus dem simulierten System entfernt.

Eine Zugfahrt tritt zum Zeitpunkt der planmäßigen Abfahrt von ihrem Anfangsbahnhof in das simulierte System ein. Sie wird aus dem simulierten System entfernt, wenn sie

tatsächlich ihren Endbahnhof erreicht hat und die Aus- und Umsteiger aus diesem Zug erfaßt worden sind. Es bezeichne

$$\mathcal{Z} = \{z | T_{\text{Ab},z,l,1} \leq t_{\text{Sim}}^{\text{Tag}} \leq t_{\text{An},z,l,\text{Bf}_l}, L_l \in \mathcal{L}, z \in \mathcal{Z}_l\}$$

die Menge derjenigen Zugfahrten, die im Simulationsschritt $t_{\text{Sim}}^{\text{Tag}}$ im simulierten Eisenbahnnetz „unterwegs“ sind. In jedem Simulationsschritt werden alle $|\mathcal{Z}|$ Zugfahrten erfaßt, die zu diesem Zeitpunkt $t_{\text{Sim}}^{\text{Tag}}$ unterwegs sind. Dies erfolgt in drei Teilschritten:

Teilschritt 1 (Bearbeitung der Zugfahrten und Ankunft): Den Ablauf dieses ersten Teilschrittes zeigt Algorithmus 1.²⁷ Bei jedem unterwegs befindlichen Zug wird die Ist-Beförderungszeit seit seiner planmäßigen Abfahrt vom Anfangsbahnhof inkrementiert. Bei Zügen, die zwischen zwei Haltebahnhöfen unterwegs sind, wird die realisierte Fahrzeit auf dem entsprechenden Linienabschnitt inkrementiert, bei Zügen, die halten, die tatsächliche Haltezeit. Erreicht ein Zug im betrachteten Simulationsschritt einen Bahnhof, wird seine tatsächliche Ankunftszeit mit der planmäßigen Ankunftszeit verglichen, falls der Zug im Sinne der Bestimmung des Pünktlichkeitsgrades pünktlich ist²⁸, wird die Anzahl pünktlicher Züge erhöht. Dann werden alle Kennzahlen erfaßt, die sich auf die Ankunft einer Zugfahrt am Zielbahnhof eines Linienabschnitts beziehen (siehe dazu die Ausführungen in Abschnitt 6.2.2). Ferner wird an Umsteigebahnhöfen die Anzahl der Umsteigenden bestimmt, die auf einen Anschlußzug einer anderen Linie umsteigen wollen. Die Umsteiger werden aus dem Zug entfernt und dem Bahnhof hinzugefügt (vgl. dazu Abschnitt 6.2.1 ab Seite 97). Es werden für die Umsteiger die Umsteigezeiten bis zur planmäßigen Abfahrtszeit des nächsten Anschlußzuges bestimmt. Hat der Zug seinen Endbahnhof erreicht, werden alle weiteren Reisenden aus dem Zug entfernt, und der Zug wird aus dem simulierten System entnommen. Für haltende Züge wird der Zeitpunkt der frühestmöglichen Abfahrtszeit bestimmt. Der Zug wird zunächst bis zu diesem Zeitpunkt am Bahnhof halten. Dabei ist zu den $z \in \mathcal{Z}$ das l und s bekannt und es sei

- $t_{\text{B},z,l}$ die tatsächliche Beförderungszeit des Zuges z auf Linie L_l , die seit der Abfahrt dieses Zuges am Anfangsbahnhof bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt realisiert wurde
- $t_{\text{F},z,l,s}^{\text{rest}} = t_{\text{An},z,l,s} - t_{\text{Sim}}^{\text{Tag}}$ die bis zum Erreichen des nächsten Haltebahnhofes (das sei der s -te Bahnhof der Linie L_l) noch verbleibende Zeit
- $t_{\text{H},z,l,s}^{\text{rest}}$ diejenige Zeit, die einem Zug z der Linie L_l am s -ten Bahnhof dieser Linie noch bis zu seiner tatsächlichen Abfahrt verbleibt
- $t_{\text{AD},z,l,s}^{\text{pers}}$ das Ankunftsverspätungsvolumen in Personenminuten als Produkt der Ankunftsverspätung des Zuges z der Linie L_l am s -ten Bahnhof dieser Linie und der entsprechenden Ist-Zugauslastung

²⁷Zur Ermittlung der Kennzahlen an einem Bahnhof siehe Abschnitt 6.3.7 auf Seite 134f.

²⁸siehe dazu (5.96) auf Seite 89

- $T_{F,z,l,s}^{\text{pers}}$ das Plan-Fahrzeitvolumen in Personenminuten als Produkt der Mindestfahrzeit des Zuges Nr. z der Linie L_l für die Fahrt auf der Strecke vom $(s-1)$ -ten zum s -ten Bahnhof dieser Linie und der entsprechenden Plan-Zugauslastung
- $t_{F,z,l,s}^{\text{pers}}$ das Ist-Fahrzeitvolumen in Personenminuten als Produkt der realisierten Beförderungszeit des Zuges Nr. z der Linie L_l für die Fahrt auf der Strecke vom $(s-1)$ -ten zum s -ten Bahnhof dieser Linie und der entsprechenden Ist-Zugauslastung

Teilschritt 2 (Bearbeitung der Umsteigenden): Den Ablauf dieses Teilschrittes zeigt Algorithmus 2. Es werden nun die umsteigenden Reisenden, die in den Bahnhofs-Objekten verwaltet werden, bearbeitet. Zu relevanten z , l und s bedeute $t_{\text{Um},z,l \rightarrow m,s}^{\text{rest}}$ diejenige Zeit, die umsteigenden Reisenden bis zur tatsächlichen Abfahrt ihres Anschlußzuges der Linie L_m noch mindestens auf dem Umsteigebahnhof verbleibt (d.h. frühestens nach Ablauf dieser Zeit können umsteigende Reisende ihren Anschlußzug erreichen). Dieser Wert wurde bereits in Teilschritt 1 auf die Mindestübergangszeit gesetzt. Diese verbleibende Umsteigezeit wird dekrementiert.

Teilschritt 3 (Prüfung und Bearbeitung abfahrender Züge): Den Ablauf dieses Teilschrittes zeigt Algorithmus 3.²⁹ Es wird nun geprüft,

- ob planmäßig eine weitere Zugfahrt am Anfangsbahnhof einer Linie beginnen soll
- ob die planmäßige Haltezeit der haltenden Züge abgelaufen ist
- ob zur Abfahrt anstehenden Zügen³⁰ eine außerplanmäßige Synchronzeit eingeräumt werden soll und kann
- ob Umsteigende einen zur Abfahrt anstehenden Zug erreichen

Zu jeweils relevanten z , l und s bedeuten

- $T_{H,z,l,s}^{\text{pers}}$ das Plan-Haltezeitvolumen in Personenminuten als Produkt der planmäßigen Haltezeit des Zuges Nr. z der Linie L_l am s -ten Bahnhof dieser Linie und der Anzahl der Reisenden, die bei planmäßigem Betrieb am s -ten Bahnhof der Linie L_l im Zug Nr. z dieser Linie verbleiben wollen, um ihre Reise fortzusetzen (Plan-Durchfahrer)
- $t_{H,z,l,s}^{\text{pers}}$ das entsprechende Ist-Haltezeitvolumen

²⁹Zur Modellierung der Zuwachsverspätungen siehe Abschnitt 6.3.6.2 dieser Arbeit. Zur Ermittlung der Kennzahlen bei der Abfahrt eines Zuges an einem Bahnhof siehe Abschnitt 6.3.7 auf Seite 134

³⁰Zugfahrten, die im gegenwärtigen Simulationsschritt am Anfangsbahnhof einer Linie planmäßig beginnen sollen oder deren Haltezeit an einem Haltebahnhof abgelaufen ist, sollen „zur Abfahrt anstehende Züge“ genannt werden.

Algorithmus 1 Bearbeitung der Zugfahrten und Ankunft

```

for all  $z \in \mathcal{Z}$  do
   $t_{B,z,l} \leftarrow t_{B,z,l} + 1$  {Inkrementiere die Ist-Beförderungszeit}
   $t_{F,z,l,s} \leftarrow t_{F,z,l,s} + 1$  {Inkrementiere die realisierte Beförderungszeit des Zuges Nr.  $z$  der Linie
     $L_l$  für die Fahrt auf dem aktuellen Linienabschnitt}
  if  $t_{F,z,l,s}^{\text{rest}} \neq 0$  then {Der Zug  $z$  der Linie  $L_l$  hat seinen nächsten Haltebahnhof  $s$  noch nicht
    erreicht}
     $t_{F,z,l,s}^{\text{rest}} \leftarrow t_{F,z,l,s}^{\text{rest}} - 1$ 
    if  $t_{F,z,l,s}^{\text{rest}} = 0$  then {In diesem Moment erreicht der Zug seinen nächsten Halt}
      if  $t_{\text{An},z,l,s} - T_{\text{An},z,l,s} \leq D_P$  then {Vergleiche die tatsächliche Ankunftszeit mit der
        planmäßigen Ankunftszeit}
        Zug ist pünktlich
        Inkrementiere die Anzahl pünktlicher Züge
      else
        Zug ist nicht pünktlich
      end if
      Erfasse Kennzahlen bei der Zugankunft:  $t_{\text{AD},z,l,s}$ ,  $t_{\text{AD},z,l,s}^{\text{pers}}$ ,  $T_{F,z,l,s}^{\text{pers}}$ ,  $t_{F,z,l,s}$ ,  $t_{F,z,l,s}^{\text{pers}}$ 
      Ermittle die Anzahl der Direktfahrer zum Bahnhof  $s$  im Zug  $z$ 
      if  $s$  ist Umsteigebahnhof then
        Ermittle die Anzahl der Umsteiger  $r_{\text{Umab},z,l \rightarrow m,s}$ , die aus Zug  $z$  auf andere
        Linien umsteigen wollen
        if  $r_{\text{Umab},z,l \rightarrow m,s} > 0$  then
          Entferne die  $r_{\text{Umab},z,l \rightarrow m,s}$  aus dem Zug  $z$  und füge sie dem Bahnhof-Objekt  $s$ 
          hinzu
          Ermittle für alle Umsteigenden die Umsteigezeit bis zur planmäßigen Abfahrts-
          zeit des Anschlußzuges  $y^*$  der Linie  $L_m$ :  $T_{\text{Ab},y^*,m,t} - t_{\text{An},z,l,s}$ 
          Ermittle  $T_{\text{MÜZ},s}$ 
          setze die für die Umsteiger noch mindestens zur Verfügung stehende Umsteige-
          zeit:  $t_{\text{Um},z,l \rightarrow m,s}^{\text{rest}} \leftarrow T_{\text{MÜZ},s}$ 
        end if
      end if
      if  $s = \text{Bf}_l$  then {Der Zug hat seinen Endbahnhof erreicht}
        Entferne alle weiteren Reisenden aus dem Zug
         $\mathcal{Z} \leftarrow \mathcal{Z} \setminus z$ 
      else
        Ermittle die frühestmögliche Abfahrtszeit  $t_{\text{Ab}^*,z,l,s}$  des Zuges
        Ermittle die verbleibende Haltezeit des Zuges bis zu seiner frühestmöglichen Ab-
        fahrtszeit zunächst als:  $t_{H,z,l,s}^{\text{rest}} = t_{\text{Ab}^*,z,l,s} - t_{\text{An},z,l,s}$ 
      end if
    end if
  else
    if  $t_{H,z,l,s}^{\text{rest}} > 0$  then {Der Zug hält „noch eine Weile“}
       $t_{H,z,l,s}^{\text{rest}} \leftarrow t_{H,z,l,s}^{\text{rest}} - 1$  {Dekrementiere die verbleibende Haltezeit}
       $t_{H,z,l,s} \leftarrow t_{H,z,l,s} + 1$  {Inkrementiere die Ist-Haltezeit}
    end if
  end if
end for

```

Algorithmus 2 Bearbeitung der Umsteigenden

```

for all  $S_s \in \mathcal{S}$  do
  if  $S_s$  ist Umsteigebahnhof then
    for all Umsteigende an Bahnhof  $S_s$  do
       $t_{Um,z,l \rightarrow m,s} \leftarrow t_{Um,z,l \rightarrow m,s} + 1$  {Inkrementiere die Ist-Umsteigezeit}
      if  $t_{Um,z,l \rightarrow m,s}^{\text{rest}} > 0$  then {Umsteigezeit noch nicht abgelaufen}
         $t_{Um,z,l \rightarrow m,s}^{\text{rest}} \leftarrow t_{Um,z,l \rightarrow m,s}^{\text{rest}} - 1$  {Dekrementiere die noch verbleibende Umsteigezeit}
      end if
    end for
  end if
end for

```

- $t_{Sy,z,l,s}^{\text{pers}}$ das Synchronzeitvolumen in Personenminuten als Produkt der außerplanmäßigen Synchronzeit des anschlußaufnehmenden Zuges Nr. z der Linie L_l am s -ten Bahnhof dieser Linie und der Anzahl der Reisenden, die tatsächlich am s -ten Bahnhof der Linie L_l im Zug Nr. z dieser Linie verbleiben, um ihre Reise fortzusetzen (Ist-Durchfahrer)
- $t_{DD,z,l,s}^{\text{pers}}$ das Abfahrtverspätungsvolumen in Personenminuten als Produkt der Abfahrtverspätung des Zuges Nr. z auf Linie L_l bei seiner Abfahrt vom s -ten Bahnhof dieser Linie und der Ist-Zugauslastung des Zuges Nr. z der Linie L_l bei der planmäßigen Fahrt vom s -ten bis zum $s + 1$ -ten Bahnhof dieser Linie
- $T_{Um,z,c \rightarrow l,s}^{\text{pers}}$ das Plan-Umsteigezeitvolumen in Personenminuten als Produkt der Plan-Umsteigezeit und der Anzahl der Reisenden, die bei planmäßigem Betrieb im s -ten Bahnhof der Linie L_l aus Linie L_c in den Zug Nr. z der Linie L_l umsteigen
- $t_{Um,z,c \rightarrow l,s}^{\text{pers}}$ das entsprechende Ist-Umsteigezeitvolumen

Insgesamt ergibt sich der in Abb. 6.7 dargestellte Ablauf innerhalb eines Simulationsschrittes der Betriebssimulation. Dieser Simulationsschritt enthält eine Besonderheit, die in der Realität in dieser Weise nicht anzutreffen ist: Für einen abfahrenden Zug wird angenommen und bereits bei seiner Abfahrt berücksichtigt, ob er auf der Fahrt entlang des folgenden Streckenabschnittes bis zum nächsten Haltebahnhof eine Zuwachsverspätung erfährt und wie hoch diese ist. Diese von der Realität abweichende Modellannahme erweist sich für die Problemstellung dieser Arbeit dennoch als sinnvoll. Bedeutsam für den Simulationsablauf zum Zweck der Ermittlung der gesuchten Kennzahlen ist primär das Geschehen an den Bahnhöfen. Im Hinblick auf Verspätungen bedeutet dies, daß das Interesse den Ankunfts- und den Abfahrtverspätungen der Zugfahrten gilt. Hierfür ist es nicht erforderlich, das Geschehen auf einem bestimmten Streckenabschnitt bei einer

Algorithmus 3 Prüfung und Bearbeitung abfahrender Züge

for all $L_l \in \mathcal{L}$ **do**

if $t_{\text{Sim}} = T_{\text{Ab},z,l,1}$ **then** {Es soll eine weitere Zugfahrt z am Anfangsbahnhof der Linie L_l planmäßig beginnen}

initialisiere die Zugfahrt mit $t_{\text{DD},z,l,1} \leftarrow 0$, $t_{\text{F},z,l,2} \leftarrow 0$, $t_{\text{F},z,l,1}^{\text{rest}} \leftarrow 0$, $T_{\text{H},z,l,1} \leftarrow 0$,
 $t_{\text{H},z,l,1} \leftarrow 0$, $t_{\text{H},z,l,1}^{\text{rest}} \leftarrow 0$, $t_{\text{Sy},z,l,1} \leftarrow 0$, $t_{\text{B},z,l} \leftarrow 0$, $\text{ZA}_{z,l,2} \leftarrow 0$, $\text{za}_{z,l,2} \leftarrow 0$

$\mathcal{Z} \leftarrow \mathcal{Z} \cup z$ {Füge die neue Zugfahrt der Menge der „unterwegs“ befindlichen Züge hinzu}

end if

end for

for all $z \in \mathcal{Z}$ **do**

if $t_{\text{F},z,l,s}^{\text{rest}} = 0 \wedge t_{\text{H},z,l,s}^{\text{rest}} = 0$ **then** {Bei zur Abfahrt anstehenden haltenden Zügen ist die Fahrzeit zum gegenwärtigen Haltebahnhof s abgelaufen, und ihre restliche Haltezeit am Bahnhof s ist ebenfalls abgelaufen}

Ermittle die Erfordernis und ggf. die Höhe einer außerplanmäßigen Synchronzeit für den zur Abfahrt anstehenden Zug z

if $t_{\text{Sy},z,l,s} > 0$ **then**

$t_{\text{H},z,l,s}^{\text{rest}} \leftarrow t_{\text{Sy},z,l,s}$ {Die Abfahrt wird dadurch zurückgestellt}

$t_{\text{DD},z,l,s} \leftarrow t_{\text{DD},z,l,s} + t_{\text{Sy},z,l,s}$ {Es entsteht eine entsprechende Abfahrtverspätung}

Ermittle und erfasse das außerplanmäßige Synchronzeitvolumen $t_{\text{Sy},z,l,s}^{\text{pers}}$

CONTINUE: nächste Zugfahrt z

end if

$t_{\text{F},z,l,s+1} \leftarrow T_{\text{F},z,l,s+1} + t_{\text{ID},z,l,s+1}$ {Füge der planmäßigen Beförderungszeit zum nächsten Haltebahnhof eine Zuwachsverspätung hinzu}

Füge Direktfahrer und wartende Umsteigende dem abfahrbereiten Zug hinzu

Entferne Umsteigende auf den Zug z aus dem Bahnhof-Objekt s

Erfasse Kennzahlen bei der Zugabfahrt: $t_{\text{DD},z,l,s}$, $t_{\text{DD},z,l,s}^{\text{pers}}$, $T_{\text{Um},z,c \rightarrow l,s}^{\text{pers}}$, $t_{\text{Um},z,c \rightarrow l,s}^{\text{pers}}$,

$t_{\text{Sy},z,l,s}$, $t_{\text{Sy},z,l,s}^{\text{pers}}$, $T_{\text{H},z,l,s}^{\text{pers}}$, $t_{\text{H},z,l,s}^{\text{pers}}$

end if

end for

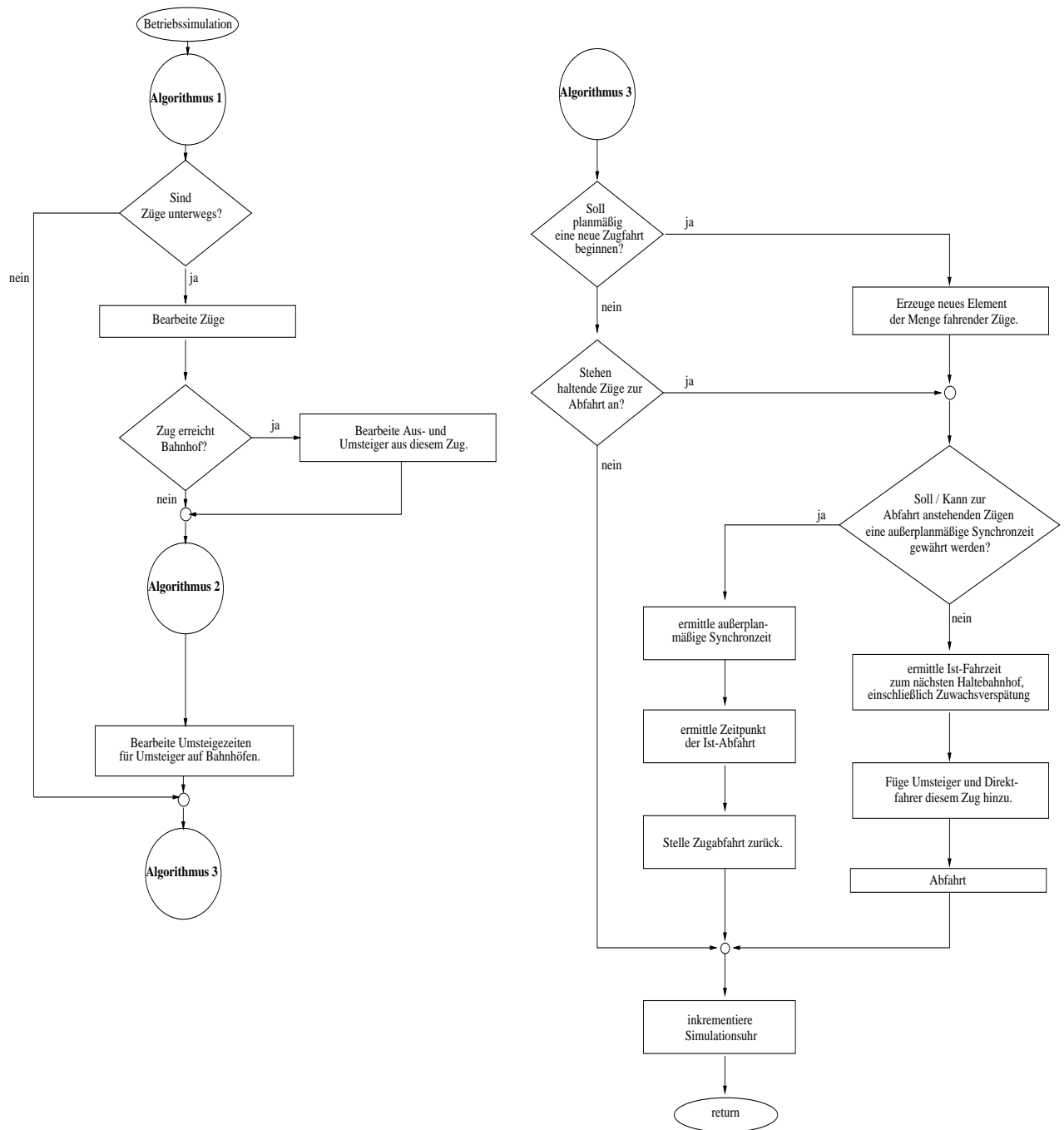


Abbildung 6.7.: Flußdiagramm für die Betriebssimulation

bestimmten Zugfahrt in jedem Simulationsschritt mitzuverfolgen. Erforderlich ist es lediglich, zu berücksichtigen, welcher Zeitraum insgesamt einer Zugfahrt der Linie L_l für die Fahrt von einem Haltebahnhof $S_{l,s-1}$ zum folgenden Haltebahnhof $S_{l,s}$ zur Verfügung steht. Dabei sind drei Fälle zu unterscheiden:

1. $t_{F,z,l,s} = T_{F,z,l,s}$, d.h. die tatsächliche Beförderungszeit des Zuges ist gleich der planmäßigen Beförderungszeit des Soll-Fahrplanes
2. $t_{F,z,l,s} < T_{F,z,l,s}$, d.h. die tatsächliche Beförderungszeit des Zuges ist kürzer als die, die im Soll-Fahrplan vorgesehen ist
3. $t_{F,z,l,s} > T_{F,z,l,s}$, d.h. die tatsächliche Beförderungszeit des Zuges ist höher als die, die im Soll-Fahrplan vorgesehen ist

Im ersten Fall kann für die Simulation die aus der Liniendefinition bekannte Mindestbeförderungszeit zugrundegelegt werden. Um den zweiten Fall zu simulieren, ist es erforderlich, die Mindestbeförderungszeit des Soll-Fahrplanes um einen bestimmten Zeitraum zu vermindern, um die tatsächliche Beförderungszeit zu erhalten. Dies geschieht mittels einer negativen Zuwachsverspätung, die entsprechend (5.16) auf Seite 63 bestimmt wird. Die Addition der so ermittelten negativen Zuwachsverspätung verkürzt die Beförderungszeit entsprechend. Für die Simulation des dritten Falles wird die tatsächliche Beförderungszeit dadurch bestimmt, daß zur planmäßigen Beförderungszeit des Soll-Fahrplanes eine positive Zuwachsverspätung hinzugeschlagen wird. Derartige Zeitabschläge oder Zeitzuschläge, die die Zuwachsverspätungen auf einem Streckenabschnitt simulieren, werden für eine Zugfahrt bereits bei ihrer Abfahrt ermittelt; damit kann auf eine Simulation des Geschehens auf einem Streckenabschnitt verzichtet werden kann und es ist in der Simulation dennoch bekannt, zu welchem Zeitpunkt das o.g. Ereignis „Ein Zug kommt mit einer bestimmten Ankunftsverspätung und einer bestimmten Auslastung nach einer bestimmten Beförderungszeit auf dem vorangegangenen Linienabschnitt an einem Haltebahnhof an“ eintreten wird.

Es kommt nun darauf an, das Auftreten und die Höhe der positiven Zuwachsverspätungen auf der Grundlage eines geeigneten Modells zu simulieren. Die Modellbildung, die der Simulation der Zuwachsverspätungen zugrundeliegt, wird im folgenden Abschnitt dargestellt.

6.3.6.2. Verteilung der Zuwachsverspätungen

Für eine Untersuchung des Eisenbahnbetriebes in einem Netz der Reiseverbindungen ist es erforderlich, neben den Daten aus den Soll-Fahrplänen auch die Abweichungen von den Soll-Fahrplänen zu berücksichtigen. Erfolgt diese Untersuchung im Rahmen einer Simulation, kommt es zunächst darauf an, die realen Gesetzmäßigkeiten der Abweichungen von den geplanten Zeiten genauer zu betrachten mit dem Ziel, diese für die Simulation in geeigneter Weise zu modellieren und zu implementieren.

Von besonderem Interesse sind hierbei die Zuwachsverspätungen, von denen die Ankunfts- und Abfahrtsverspätungen abhängen. In der verkehrswissenschaftlichen Literatur ist sehr häufig die Annahme negativ-exponentialverteilter Verspätungen vorzufinden.³¹ Diese Annahme soll hier geprüft werden. Hierzu wird durch eine Auswertung empirisch ermittelter Daten der Zuwachsverspätungen zunächst untersucht, ob eine Negativ-Exponentialverteilung auch für die erhobene Stichprobe angenommen werden kann. Trifft dies zu, dann können die in der Realität vorzufindenden Gesetzmäßigkeiten der Zuwachsverspätungen in der Simulation mittels eines geeigneten Zufallszahlengenerators auf Basis einer theoretischen Verteilung adäquat nachgebildet werden. Durch eine statistische Analyse der Verspätungen mehrerer Zugfahrten werden Häufigkeit und Höhe der jeweiligen Verspätungsarten ermittelt. Darauf aufbauend werden die Verteilungen und ihre Kenngrößen wie Mittelwert und Standardabweichung ermittelt.

Dazu wurden im Zeitraum von 26.11.1997 bis zum 15.02.1998 bei einer Stichprobe von $N = 280$ Zugfahrten die Abfahrts- und Ankunftsverspätungen getrennt nach Nah- und Fernverkehrszuggattungen erhoben und damit nach (5.9) auf Seite 62 die Zuwachsverspätungen ermittelt. Für die Zuggattungen des Nahverkehrs ($N_{\text{Nah}} = 147$ Zugfahrten) erfolgte die Erhebung auf den Strecken Maschen – Hamburg-Harburg – Hamburg Hbf – Hamburg-Wandsbek – Bad Oldesloe sowie Pforzheim – Karlsruhe Hbf. Die ermittelten Häufigkeiten n_{Nah} der Zuwachsverspätungen zeigt Tabelle 6.1.

Zuwachsverspätung t_{ID} [Min]	n_{Nah}	$\frac{n_{\text{Nah}}}{N_{\text{Nah}}} \cdot 100$	$\sum \frac{n_{\text{Nah}}}{N_{\text{Nah}}} \cdot 100$
-4	1	0.7	0.7
-3	3	2.0	2.7
-2	13	8.8	11.6
-1	34	23.1	34.7
0	54	36.7	71.4
1	16	10.9	82.3
2	19	12.9	95.2
3	2	1.4	96.6
5	1	0.7	97.3
6	2	1.4	98.6
7	2	1.4	100.0

Tabelle 6.1.: Empirische Häufigkeiten der Zuwachsverspätungen im Nahverkehr

Für die Zuggattungen des Fernverkehrs ($N_{\text{Fern}} = 133$ Zugfahrten) erfolgte die Erhebung auf der ICE-Linie 2 (Abschnitt Hamburg – Karlsruhe), der ICE-Linie 3 (Abschnitt Hamburg – Augsburg), der IC-Linie 11 (Abschnitt Bonn – München) und der IC-Linie 1

³¹Siehe dazu z.B. [Hei79] für Folgeverspätungen und [Men91] oder [Sch74] für Ankunftsverspätungen sowie die grundsätzlichen Ausführungen in [Müh90]

(Abschnitt Hamburg – Bonn). Die ermittelten Häufigkeiten n_{Fern} der Zuwachsverspätungen zeigt Tabelle 6.2.

Zuwachsverspätung t_{ID} [Min]	n_{Fern}	$\frac{n_{\text{Fern}}}{N_{\text{Fern}}} \cdot 100$	$\sum \frac{n_{\text{Fern}}}{N_{\text{Fern}}} \cdot 100$
-7	1	0.8	0.8
-5	4	3.0	3.8
-4	3	2.3	6.0
-3	10	7.5	13.5
-2	16	12.0	25.6
-1	17	12.8	38.3
0	44	33.1	71.4
1	19	14.3	85.7
2	7	5.3	91.0
3	5	3.8	94.7
4	3	2.3	97.0
5	1	0.8	97.7
6	2	1.5	99.2
13	1	0.8	100.0

Tabelle 6.2.: Empirische Häufigkeiten der Zuwachsverspätungen im Fernverkehr

Es fällt dabei auf, daß jeweils ein signifikanter Anteil der Zugfahrten negative Zuwachsverspätungen $t_{\text{ID},z,l,s} < 0$ realisiert.

Da eine negative Zuwachsverspätung geeignet ist, bereits bestehende Verspätungen abzubauen³², ist denkbar, daß ein signifikanter Zusammenhang derart besteht, daß $t_{\text{ID},z,l,s} < 0$ besonders häufig dann auftritt, wenn $t_{\text{DD},z,l,s-1} > 0$ gilt. Es müßte in diesem Falle eine hohe negative Korrelation zwischen den Abfahrtverspätungen und den Zuwachsverspätungen festgestellt werden können. Aufgrund der metrischen Skalierung von Zeitgrößen wird hierzu der Korrelationskoeffizient r_{XY} nach Bravais-Pearson ermittelt:

$$r_{XY} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sqrt{(\sum_{i=1}^N x_i^2 - n \bar{x}^2)(\sum_{i=1}^N y_i^2 - n \bar{y}^2)}} \quad (6.11)$$

Für die bei der Stichprobe von $N = 280$ Zugfahrten beobachteten Kombinationen der Merkmale X (Abfahrtverspätung eines Zuges bei seiner Abfahrt vom $(s-1)$ -ten Bahnhof seiner Linie, dieser Wert wurde direkt erhoben) und Y (Zuwachsverspätung, die bei einer Zugfahrt auf der Strecke vom $(s-1)$ -ten zum s -ten Bahnhof dieser Linie auftritt) ergibt sich der Korrelationskoeffizient r_{XY} zu $r_{XY} = -0,1298$. Die Merkmale sind also nur schwach negativ korreliert. Das bedeutet, eine starke Abhängigkeit des Merkmals „Zuwachsverspätung, die bei einer Zugfahrt auf der Strecke vom $(s-1)$ -ten zum s -ten

³²Vgl. Abschnitt 5.5.1 dieser Arbeit

Zuwachsverspätung t_{ID} [Min]	n	$\frac{n}{N} \cdot 100$	$\sum \frac{n}{N} \cdot 100$
-7	1	0.4	0.4
-5	4	1.4	1.8
-4	4	1.4	3.2
-3	13	4.6	7.9
-2	29	10.4	18.2
-1	51	18.2	36.4
0	98	35.0	71.4
1	35	12.5	83.9
2	26	9.3	93.2
3	7	2.5	95.7
4	3	1.1	96.8
5	2	0.7	97.5
6	4	1.4	98.9
7	2	0.7	99.6
13	1	0.4	100.0

Tabelle 6.3.: Empirische Häufigkeiten der Zuwachsverspätungen insgesamt

Bahnhof dieser Linie auftritt“ vom Merkmal „Abfahrtverspätung eines Zuges bei seiner Abfahrt vom $(s-1)$ -ten Bahnhof seiner Linie“ kann in dieser Stichprobe nicht festgestellt werden.

Die Höhe der negativen Zuwachsverspätung ist daher im wesentlichen abhängig von

- der Mindestbeförderungszeit $T_{F,z,l,i+1}$ zwischen zwei Bahnhöfen $S_{l,i}$ und $S_{l,i+1}$,
- der Höhe des Regelzuschlages T_{Zuschl} .

Damit ist es nicht erforderlich, einen eventuellen Zusammenhang zwischen einem Verspätungsabbau mittels negativer Zuwachsverspätungen durch Realisierung der kürzesten Fahrzeit (diese entspricht bei störungsfreier Fahrt und unter optimalen äußeren Bedingungen der reinen Fahrzeit) und einer Abfahrtverspätung zu berücksichtigen.

Das Auftreten positiver Zuwachsverspätungen $t_{ID,z,l,s} > 0$ kann als stochastisches Ereignis von nicht vorbestimmbarer Dauer betrachtet werden. Daher ist es sinnvoll, die Verteilung der positiven Zuwachsverspätungen gesondert zu untersuchen. Zunächst fällt auf, daß kleine positive Zuwachsverspätungen häufiger auftreten als große. Dies legt es nahe, die $t_{ID,z,l,s} \geq 0$ durch das Modell einer Negativ-Exponential-Verteilung zu beschreiben.

Die Dichtefunktion einer negativ-exponentialverteilten Zufallsvariablen X mit dem Parameter $\lambda > 0$ lautet

$$f_X(x) = \lambda e^{-\lambda x} \quad \text{für } x \geq 0 \quad (6.12)$$

Als Verteilungsfunktion ergibt sich

$$F_X(x) = \int_{-\infty}^x f_X(x) dx = 1 - e^{-\lambda x} \quad \text{für } x \geq 0 \quad (6.13)$$

Der Erwartungswert $E(X)$ einer negativ-exponentialverteilten Zufallsvariablen X ist

$$E(X) = \int_{-\infty}^x x \cdot f_X(x) dx = \frac{1}{\lambda} \quad (6.14)$$

Für den Parameter λ folgt hieraus

$$\lambda = \frac{1}{E(X)} \quad (6.15)$$

Es ist nun die Annahme zu prüfen: $t_{\text{ID},z,l,s} \geq 0$ ist negativ-exponentialverteilt mit Parameter $\lambda = \frac{1}{E(X)}$ und der Dichte gemäß (6.12). $E(X)$ ist das erste Moment der Zufallsvariablen X so daß sich nach der Momentenmethode als Schätzer für λ die Größe

$$\hat{\lambda} = \frac{1}{m_1} = \frac{1}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i} = \frac{1}{\bar{x}} \quad (6.16)$$

ergibt.

Werden die ermittelten positiven Zuwachsverspätungen im Nah- und Fernverkehr jeweils als Zufallsvariable X betrachtet, können demnach für die Stichproben vom Umfang N_{Nah} bzw. N_{Fern} sowie für die gesamte Stichprobe mit $N = N_{\text{Nah}} + N_{\text{Fern}}$ jeweils folgende Hypothesen aufgestellt werden:

$$H_0 : \quad f_X(x) = \frac{1}{\bar{x}} e^{-\frac{x}{\bar{x}}} \quad (6.17)$$

$$H_1 : \quad f_X(x) \neq \frac{1}{\bar{x}} e^{-\frac{x}{\bar{x}}} \quad (6.18)$$

Die Nullhypothese soll mittels eines χ^2 -Anpassungstests überprüft werden.

Im Nahverkehr wurden $N_{\text{IDNah}} = 42$ Fälle von positiven Zuwachsverspätungen erhoben. x_i^{IDNah} sei ein (beliebiges) Element dieser Stichprobe der positiven Zuwachsverspätungen im Nahverkehr. Die Summe dieser Zuwachsverspätungen beträgt $\sum_i x_i^{\text{IDNah}} = 91$ Minuten.³³ Dann ist die mittlere positive Zuwachsverspätung der Nahverkehrszüge

$$\overline{\text{IDNah}} = \frac{\sum_i x_i^{\text{IDNah}}}{N_{\text{IDNah}}} = \frac{91}{42} = 2,167 \quad (6.19)$$

Minuten.

³³Siehe Tabelle 6.1

Im Fernverkehr wurden $N_{\text{ID}_{\text{Fern}}} = 38$ Fälle von positiven Zuwachsverspätungen erhoben. Es sei $x_i^{\text{ID}_{\text{Fern}}}$ ein (beliebiges) Element dieser Stichprobe der positiven Zuwachsverspätungen im Fernverkehr. Die Summe dieser Zuwachsverspätungen beträgt dann $\sum_i x_i^{\text{ID}_{\text{Fern}}} = 90$ Minuten.³⁴ Die mittlere positive Zuwachsverspätung der Fernverkehrszüge beträgt

$$\overline{\text{ID}_{\text{Fern}}} = \frac{\sum_i x_i^{\text{ID}_{\text{Fern}}}}{N_{\text{ID}_{\text{Fern}}}} = \frac{90}{38} = 2,368 \quad (6.20)$$

Minuten.

Für die gesamte Stichprobe ergibt sich entsprechend eine mittlere Zuwachsverspätung aller Züge mit positiver Zuwachsverspätung von

$$\overline{\text{ID}} = \frac{\sum_i x_i^{\text{ID}}}{N_{\text{ID}}} = \frac{181}{80} = 2,2625 \quad (6.21)$$

Die jeweiligen χ^2 -Anpassungstests zeigen die Tabellen 6.4, 6.5 und 6.6. Die in der Stichprobe beobachteten Bereiche der positiven Zuwachsverspätungen umfassen bei den Nahverkehrszügen ein Intervall von $(0; 7]$ Minuten und bei den Fernverkehrszügen ein Intervall von $(0; 13]$ Minuten. Diese Bereiche werden in Klassen von je 1 Minute Zuwachsverspätung aufgeteilt. Dabei ist zu beachten, daß die Klassen so zusammengefaßt werden, daß die für χ^2 -Anpassungstests übliche Forderung von $h_i \geq 5$ stets erfüllt ist. Zunächst wird die theoretische Verteilung entsprechend der Nullhypothese nach (6.17) berechnet. Hierzu werden die Dichte- und die Verteilungsfunktion der Negativ-Exponentialverteilung nach (6.12) und (6.13) verwendet. Die für $\overline{\text{ID}_{\text{Nah}}}$, $\overline{\text{ID}_{\text{Fern}}}$ und $\overline{\text{ID}}$ ermittelten Werte werden jeweils als \bar{x} für die Schätzung des Parameters λ gemäß (6.16) eingesetzt. Da die Klassen aneinanderstoßen, können die relativen theoretischen Klassenhäufigkeiten mit

$$\Delta e^{\frac{x_i}{\bar{x}}} = e^{\frac{x_i}{\bar{x}}} - e^{\frac{x_{i+1}}{\bar{x}}}$$

berechnet werden. Die Spalten für $\frac{x_i}{\bar{x}}$ und $e^{\frac{x_i}{\bar{x}}}$ in den Tabellen 6.4, 6.5 und 6.6 enthalten die Hilfsgrößen zur Bestimmung der theoretischen Klassenhäufigkeiten. Die theoretischen Klassenhäufigkeiten h_i ergeben sich dann als

$$\Delta e^{\frac{x_i}{\bar{x}}} \cdot N$$

wobei N jeweils die $N_{\text{ID}_{\text{Nah}}}$ bzw. die $N_{\text{ID}_{\text{Fern}}}$ bzw. die N_{ID} bezeichnet. Die Spalte $N_i - h_i$ enthält jeweils die Differenz aus der tatsächlich beobachteten Klassenhäufigkeit (N_i) und der theoretischen Klassenhäufigkeit.

Für I Klassen ergibt sich die Anzahl der Freiheitsgrade für die χ^2 -Verteilung aus $I - 2$, da der Parameter λ geschätzt wurde. Für die Zuwachsverspätungen im Nahverkehr kann einer Tabelle der Schranken für eine χ^2 -Verteilung³⁵ bei 2 Freiheitsgraden und einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0,01$ ein Wert von $\chi_{0,01}^2 = 9,21034$ entnommen werden.

³⁴Siehe Tabelle 6.2

³⁵z.B. in [Eng73, S. 159]

i	Klasse [Minuten]	x_i	$\frac{x_i}{\bar{x}}$	$e^{\frac{x_i}{\bar{x}}}$	$\Delta e^{\frac{x_i}{\bar{x}}}$	h_i	$N_i - h_i$	$\frac{(N_i - h_i)^2}{h_i}$
1	(0; 1]	0	0,000000	1,000000	0,369687	15,526846	0,473154	0,014419
2	(1; 2]	1	0,461538	0,630313	0,233018	9,786776	9,213224	8,673285
3	(2; 4]	2	0,923077	0,397295	0,239452	10,056968	-8,056968	6,454702
4	> 4	4	1,846154	0,157843	0,157843	6,629410	-1,629410	0,400485
					1,000000	42,000000		15,542891

Tabelle 6.4.: χ^2 -Anpassungstest für den Nahverkehr

i	Klasse [Minuten]	x_i	$\frac{x_i}{\bar{x}}$	$e^{\frac{x_i}{\bar{x}}}$	$\Delta e^{\frac{x_i}{\bar{x}}}$	h_i	$N_i - h_i$	$\frac{(N_i - h_i)^2}{h_i}$
1	(0; 1]	0	0,000000	1,000000	0,344412	13,087643	5,912357	2,670914
2	(1; 2]	1	0,422222	0,655588	0,225792	8,580106	-1,580106	0,290991
3	(2; 3]	2	0,844444	0,429796	0,148027	5,625018	-0,625018	0,069448
4	> 3	3	1,266667	0,281769	0,281769	10,707233	-3,707233	1,283579
					1,000000	38,000000		4,314932

Tabelle 6.5.: χ^2 -Anpassungstest für den Fernverkehr

i	Klasse [Minuten]	x_i	$\frac{x_i}{\bar{x}}$	$e^{\frac{x_i}{\bar{x}}}$	$\Delta e^{\frac{x_i}{\bar{x}}}$	h_i	$N_i - h_i$	$\frac{(N_i - h_i)^2}{h_i}$
1	(0; 1]	0	0,000000	1,000000	0,357243	28,579461	6,420539	1,442411
2	(1; 2]	1	0,441989	0,642757	0,229621	18,369641	7,630359	3,169489
3	(2; 3]	2	0,883978	0,413136	0,147590	11,807211	-4,807211	1,957217
4	(3; 4]	3	1,325967	0,265546	0,094865	7,589164	-4,589164	2,775066
5	(4; 6]	4	1,767956	0,170682	0,100167	8,013345	-2,013345	0,505851
6	> 6	6	2,651934	0,070515	0,070515	5,641178	-2,641178	1,236590
					1,000000	80,000000		11,086623

Tabelle 6.6.: χ^2 -Anpassungstest für alle positiven Zuwachsverspätungen

Mit $\chi_{\text{emp}}^2 = 15,542891$ aus Tabelle 6.4 ergibt sich $\chi_{\text{emp}}^2 \not\leq \chi_{\alpha}^2$. Daher ist die Nullhypothese zu verwerfen. Die Abweichungen der erhobenen positiven Zuwachsverspätungen im Nahverkehr von der geschätzten Negativ-Exponentialverteilung können damit nicht mehr als zufällig angesehen werden.

Für die Zuwachsverspätungen im Fernverkehr ergibt sich bei ebenfalls 2 Freiheitsgraden und $\alpha = 0,01$ mit $\chi_{\text{emp}}^2 = 4,314932$ aus Tabelle 6.5 schließlich $\chi_{\text{emp}}^2 < \chi_{\alpha}^2$, so daß die Nullhypothese aufrecht erhalten werden kann und die Abweichungen der beobachteten Verspätungshäufigkeiten von der geschätzten Negativ-Exponentialverteilung als zufällig angesehen werden können.

Angesichts der unterschiedlichen Testergebnisse für Zugfahrten des Nah- und des Fernverkehrs ist zu prüfen, ob besser die Zuwachsverspätungen der gesamten Stichprobe für eine entsprechende Simulation zugrundegelegt werden können. Für die gesamte Stichprobe ergibt sich nach Tabelle 6.6: Bei 4 Freiheitsgraden und $\chi_{0,01}^2 = 13,2767$ gilt $\chi_{\text{emp}}^2 = 11,086623$, so daß $\chi_{\text{emp}}^2 < \chi_{\alpha}^2$ zutrifft. Bei den positiven Zuwachsverspätungen der gesamten Stichprobe kann die Annahme negativ-exponentialverteilter Zuwachsverspätungen daher aufrechterhalten werden. Deshalb soll als Grundlage einer Simulation von Zuwachsverspätungen angenommen werden, daß die positiven Zuwachsverspätungen einer für alle Zuggattungen gleichen Negativ-Exponentialverteilung genügen.

Insgesamt führt dies bei einer Simulation der Zuwachsverspätungen bei gegebenen $T_{F,z,l,s}$ zu folgender Vorgehensweise:

- Ein festzulegender, realitätsnaher Anteil aller Zugfahrten soll eine negative Zuwachsverspätung gemäß (5.16) auf Seite 63 erhalten, die die planmäßige Beförderungszeit $T_{F,z,l,s}$ entsprechend verkürzt. Dieser Anteil wird entsprechend der Stichprobenergebnisse aus Tabelle 6.3 mit 36% festgelegt.
- Der verbleibende Anteil aller Zugfahrten erhält negativ-exponentialverteilte

$$t_{\text{ID},z,l,s} \geq 0$$

die der planmäßigen Beförderungszeit $T_{F,z,l,s}$ zugeschlagen werden. Um unterschiedliche Verspätungsniveaus untersuchen zu können, wird der Parameter λ variiert mit $\lambda = 0, \dots, 5$.

6.3.7. Kennzahlenerstellung und Ausgabe der Kennzahlen

Bei der Ankunft und der Abfahrt eines Zuges an einem Bahnhof werden diejenigen Ist-Größen als Kennzahlen erfaßt bzw. fortgeschrieben, die für die Auswertung eines Simulationslaufes von Bedeutung sind.³⁶ Dies sind:

³⁶siehe dazu Algorithmus 1 auf Seite 123 und Algorithmus 3 auf Seite 125

- Die Ankunftsverspätung $t_{AD,z,l,s}$ eines Zuges z der Linie L_l am s -ten Bahnhof dieser Linie, die gemäß (5.7) auf Seite 61 ermittelt wird. Die Erfassung der Ankunftsverspätung dient dazu, den netzweiten Pünktlichkeitsgrad entsprechend (5.96) auf Seite 89 zu ermitteln.
- Das Ankunftsverspätungsvolumen $t_{AD,z,l,s}^{\text{pers}}$. Mittels der Ankunftsverspätung $t_{AD,z,l,s}$ und der Ist-Zugauslastung $z_{a,z,l,s}$, die nach (5.91) auf Seite 85 errechnet wird, wird auch das Ankunftsverspätungsvolumen $t_{AD,z,l,s}^{\text{pers}}$ in Personenminuten als Produkt der Ist-Zugauslastung und der Ankunftsverspätung eines Zuges z der Linie L_l am s -ten Bahnhof dieser Linie bestimmt. Die Addition der einzelnen Ankunftsverspätungsvolumina über alle Bahnhöfe und alle Zugfahrten ermöglicht es, das netzweite Ankunftsverspätungsvolumen zu bestimmen.
- Die realisierte Beförderungszeit $t_{F,z,l,s}$ eines Zuges z auf der Linie L_l für die Fahrt auf der Strecke vom $(s - 1)$ -ten zum betrachteten s -ten Bahnhof dieser Linie.
- Das Ist-Fahrzeitvolumen $t_{F,z,l,s}^{\text{pers}}$. Mittels der realisierten Beförderungszeit und der Ist-Zugauslastung $z_{a,z,l,s}$, wird das Ist-Fahrzeitvolumen $t_{F,z,l,s}^{\text{pers}}$ in Personenminuten bei der Zugfahrt auf dem genannten Linienabschnitt als Produkt der Ist-Zugauslastung und der realisierten Beförderungszeit berechnet. Durch die Addition der Ist-Fahrzeitvolumina über alle Zugfahrten läßt sich der Fahrzeitanteil des Ist-Gesamtbeförderungszeitvolumens entsprechend (5.102) auf Seite 90 bestimmen.
- Die Abfahrtverspätung $t_{DD,z,l,s}$ eines Zuges z der Linie L_l am s -ten Bahnhof dieser Linie, die gemäß (5.7) auf Seite 61 ermittelt wird.
- Das Abfahrtverspätungsvolumen $t_{DD,z,l,s}^{\text{pers}}$. Mittels der Abfahrtverspätung $t_{DD,z,l,s}$ und der Ist-Zugauslastung $z_{a,z,l,s+1}$, die nach (5.91) auf Seite 85 errechnet wird, wird auch das Abfahrtverspätungsvolumen $t_{DD,z,l,s}^{\text{pers}}$ in Personenminuten als Produkt der Ist-Zugauslastung und der Abfahrtverspätung eines Zuges z der Linie L_l am s -ten Bahnhof dieser Linie bestimmt. Die Addition der einzelnen Abfahrtverspätungsvolumina über alle Bahnhöfe und alle Zugfahrten ermöglicht es, das netzweite Abfahrtverspätungsvolumen zu bestimmen.
- Die realisierte Umsteigezeit $t_{Um,z,l \rightarrow m,s}$ für das Umsteigen von Zug Nr. z der Linie L_l auf den nächsten planmäßigen Anschlußzug der Linie L_m am s -ten Bahnhof der Linie L_l , die entsprechend (5.31) auf Seite 68 bestimmt wird.
- Das Ist-Umsteigezeitvolumen $t_{Um,z,l \rightarrow m,s}^{\text{pers}}$. Mittels der realisierten Umsteigezeit $t_{Um,z,l \rightarrow m,s}$ und der $r_{Uman,z,l \rightarrow m,s}$ (das ist die Anzahl der Reisenden, die bei planmäßigem Betrieb im s -ten Bahnhof der Linie L_m aus Linie L_l in den Zug Nr. z der Linie L_m umsteigen), die sich nach (5.90) auf Seite 85 berechnet, wird das Ist-Umsteigezeitvolumen $t_{Um,z,l \rightarrow m,s}^{\text{pers}}$ in Personenminuten als Produkt der realisierten

Umsteigezeit und der Anzahl der umsteigenden Reisenden bestimmt. Die Addition der einzelnen Ist-Umsteigezeitvolumina über alle Umsteigevorgänge und alle Bahnhöfe ermöglicht es, das netzweite Ist-Umsteigezeitvolumen als Umsteigezeitanteil des IstGesamtbeförderungszeitvolumens entsprechend (5.102) auf Seite 90 bestimmen.

- Die außerplanmäßige Synchronzeit $t_{\text{Sy},z,l,s}$ des anschlußaufnehmenden Zuges Nr. z der Linie L_l am s -ten Bahnhof dieser Linie. Diese wird entsprechend der dargestellten Verspätungsfälle in Abschnitt 100 auf Seite 72 bestimmt.
- Das außerplanmäßige Synchronzeitvolumen $t_{\text{Sy},z,l,s}^{\text{pers}}$ in Personenminuten wird auf dieser Basis bestimmt, indem die außerplanmäßige Synchronzeit $t_{\text{Sy},z,l,s}$ mit der Anzahl der Reisenden multipliziert wird, die in Zug z als Durchfahrer (siehe (5.92) auf Seite 87) auf die Abfahrt des Zuges z warten.
- Die realisierte Haltezeit $t_{\text{H},z,l,s}$ des Zuges Nr. z der Linie L_l am s -ten Bahnhof dieser Linie, die unter Berücksichtigung außerplanmäßiger Synchronzeiten entsprechend der dargestellten Verspätungsfälle in Abschnitt 100 bestimmt wird.
- Das Ist-Haltezeitvolumen $t_{\text{H},z,l,s}^{\text{pers}}$ in Personenminuten wird bestimmt als Produkt der realisierten Haltezeit $t_{\text{H},z,l,s}$ mit der Anzahl der Reisenden $r_{\text{Durch},z,l,s}$, die bei realisiertem Betrieb am s -ten Bahnhof der Linie L_l im Zug Nr. z dieser Linie verbleiben, um ihre Reise fortzusetzen (Durchfahrer).

Die wesentliche Plan-Vergleichgröße für die Problemstellungen nach (5.105), (5.106) und (5.107) auf Seite 92 ff. ist das netzweite planmäßige Gesamtbeförderungszeitvolumen. Diese aggregierte Kennzahl setzt sich entsprechend (5.97) auf Seite 90 zusammen aus dem netzweiten planmäßigen Fahrzeitvolumen, dem netzweiten planmäßigen Haltezeitvolumen und dem netzweiten planmäßigen Umsteigezeitvolumen. Um diese Kennzahlen ermitteln zu können, werden zunächst für jede einzelne Zugfahrt bei ihrem Eintreffen bzw. bei der Abfahrt an einem Haltebahnhof die entsprechenden Einzelwerte erfaßt. Dies sind:

- Das Plan-Fahrzeitvolumen $T_{\text{F},z,l,s}^{\text{pers}}$ in Personenminuten, das sich aus dem Produkt der planmäßigen Beförderungszeit des Zuges Nr. z der Linie L_l für die Fahrt auf der Strecke vom $(s-1)$ -ten zum s -ten Bahnhof dieser Linie und der entsprechenden Plan-Zugauslastung $ZA_{z,l,s}$ (diese wird entsprechend (5.86) berechnet, siehe Seite 82) ergibt
- Das Plan-Umsteigezeitvolumen $T_{\text{Um},z,l \rightarrow m,s}^{\text{pers}}$ in Personenminuten, das sich aus dem Produkt der planmäßigen Umsteigezeit für das Umsteigen von Zug Nr. z der Linie L_l auf den nächsten planmäßigen Anschlußzug der Linie L_m am s -ten Bahnhof der Linie L_l und den entsprechenden Plan-Umsteigerzahlen $R_{\text{Umab},z,l \rightarrow m,s}$ (diese werden entsprechend (5.85) auf Seite 82 berechnet), ergibt

- Das Plan-Haltezeitvolumen $T_{H,z,l,s}^{\text{pers}}$ in Personenminuten, das sich aus dem Produkt der planmäßigen Haltezeit des Zuges Nr. z der Linie L_l am s -ten Bahnhof dieser Linie und der entsprechenden Anzahl der Reisenden $R_{\text{Durch},z,l,s}$, die bei planmäßigem Betrieb am s -ten Bahnhof der Linie L_l im Zug Nr. z dieser Linie verbleiben, um ihre Reise fortzusetzen (diese Reisendenanzahl wird gemäß (5.88) berechnet, siehe Seite 84)

Durch Addition dieser Werte über alle Zugfahrten und alle Bahnhöfe werden schließlich die Plan-Volumen-Kennzahlen nach (5.98) auf Seite 90 ermittelt, aus denen sich das netzweite Gesamtbeförderungszeitvolumen zusammensetzt.

Die genannten zugfahrtbezogenen Einzeldaten werden in jedem entsprechenden Simulationsschritt erhoben. Die Aggregation der Plan-Kennzahlen gemäß (5.97) und (5.98) bzw. der Ist-Kennzahlen gemäß (5.101) und (5.102) erfolgt am Schluß eines Simulationslaufes, nachdem die Anzahl der Simulationsschritte erreicht worden ist.³⁷ Die aggregierten Kennzahlen werden in eine Datei ausgegeben, so daß z.B. eine graphische Aufbereitung möglich ist.

³⁷Vgl. Abb. 6.1 auf Seite 104

7. Anwendung der Simulation

7.1. Das Beispielnetz

Die Anwendbarkeit der dargestellten Simulation wird an einem Liniennetz-Beispiel gezeigt. Dieses Liniennetz besteht aus ausgewählten ICE- und IC-Linien sowie ausgewählten Nahverkehrslinien des Netzes der Deutschen Bahn AG mit dem Fahrplanstand des Kursbuches 1997/98¹.

Im Fernverkehr sind dies die folgenden Linien und Bahnhöfe:

- Linie 1 (IC), zusammengelegt mit Linie 12 (IC): Hamburg – Bremen – Osnabrück – Münster – Dortmund – Duisburg – Köln – Koblenz – Mainz – Frankfurt/M. – Würzburg – Nürnberg
- Linie 2a (ICE): Hamburg – Hannover – Göttingen – Kassel – Frankfurt/M. – Heidelberg – Stuttgart
- Linie 2b (ICE): Hamburg – Hannover – Göttingen – Kassel – Frankfurt/M. – Mannheim – Karlsruhe
- Linie 3a (ICE): Hamburg – Hannover – Göttingen – Kassel – Würzburg – Augsburg – München
- Linie 3b (ICE): Bremen – Hannover
- Linie 5 (ICE): Berlin-Zoo – Braunschweig – Hannover – Bielefeld – Dortmund – Duisburg – Köln
- Linie 6 (ICE): Berlin-Zoo – Braunschweig – Göttingen – Kassel – Fulda – Frankfurt/M. – Mannheim – Stuttgart – Ulm – Augsburg – München
- Linie 8 (IC): Hamburg – Berlin-Lichtenberg – Dresden
- Linie 8 (IC): Hamburg – Berlin-Zoo – Dessau – Leipzig – Jena – Nürnberg – Augsburg – München²

¹Vgl. [Deu97]

²beide Linien haben in [Deu97] dieselbe Liniennummer

- Linie 10 (IC): Bielefeld – Dortmund – Duisburg – Köln – Koblenz – Mainz – Mannheim – Karlsruhe
- Linie 11 (IC): Dortmund – Duisburg – Köln – Koblenz – Mainz – Mannheim – Heidelberg – Stuttgart – Ulm – Augsburg – München
- Linie 17 (IC): Saarbrücken – Mannheim – Frankfurt/M. – Fulda – Erfurt – Leipzig – Dresden

Die Linie 2 führt im stündlichen Wechsel Züge aus Hamburg über Frankfurt/M. nach Stuttgart bzw. nach Karlsruhe. Auf dem Streckenabschnitt Hamburg – Hannover – Göttingen – Kassel – Frankfurt/M. verkehren diese Züge im 1-Stunden-Takt, auf den Abschnitten Frankfurt/M. – Stuttgart bzw. Frankfurt/M. – Karlsruhe entsprechend im 2-Stunden-Takt. Dies ist in der Modellierung der Linien für die Simulation nicht vorgesehen. Daher wird diese Linie im Modell getrennt in eine Stammlinie Hamburg – Hannover – Göttingen – Kassel – Frankfurt/M. und in zwei Linienflügel Frankfurt/M. – Stuttgart und Frankfurt/M. – Karlsruhe.

Das Liniennetz-Beispiel enthält damit von 12 ICE/IC-Linien der Deutschen Bahn AG 10 Linien.

Von besonderem Interesse sind in dieser Arbeit solche Umsteigebahnhöfe, bei denen Linien des Fernverkehrs mit Linien des Nahverkehrs verknüpft sind und die im Fernverkehrs-Liniennetz wichtige Umsteigebahnhöfe darstellen. Die Problematik der außerplanmäßigen Synchronzeiten ist besonders bedeutend,

- wenn für das Umsteigen nur eine kurze planmäßige Umsteigezeit zur Verfügung steht,
- und wenn die Taktzeit auf den Anschlußlinien groß ist, d.h. mindestens 30 Minuten beträgt.

Es wurden daher einzelne Haltebahnhöfe des ICE/IC-Liniennetzes im Liniennetz-Beispiel unberücksichtigt gelassen und überwiegend solche Nahverkehrslinien im Liniennetz-Beispiel abgebildet, bei denen für das Umsteigen von und zu Linien des Fernverkehrs an bestimmten Umsteigebahnhöfen nur eine vergleichsweise knappe planmäßige Umsteigezeit von 4 bis 20 Minuten³ vorgesehen ist. Nahverkehrslinien, auf denen die Züge häufiger als alle 30 Minuten verkehren, blieben generell unberücksichtigt. Auf Fernverkehrslinien besteht ohnehin meistens eine Taktzeit von mindestens 60 Minuten. Damit wurden für das Liniennetz-Beispiel ausschließlich solche Linien ausgewählt, die für die Problemstellung dieser Arbeit hinsichtlich der Umsteigemöglichkeiten von Bedeutung sind.

Folgende Nahverkehrslinien mit Ihren Haltebahnhöfen wurden für das Liniennetz-Beispiel ausgewählt:

³An großen Bahnhöfen mit einer Mindestübergangszeit von 8 Minuten – dies sind beispielsweise die Bahnhöfe Köln Hbf und München Hbf – kann auch eine planmäßige Umsteigezeit von bis zu 20 Minuten noch als verhältnismäßig knapp angesehen werden.

- Kiel – Bordesholm – Neumünster – Wrist – Elmshorn – Hamburg Hbf (Streckentabelle⁴ 131) mit einer planmäßigen Umsteigezeit auf die IC-Linie 1 von 14 Minuten in Hamburg Hbf
- Lübeck - Reinfeld - Bad Oldesloe - Hamburg Hbf (Streckentabelle 140) mit einer planmäßigen Umsteigezeit auf die IC-Linie 1 von 8 Minuten in Hamburg Hbf
- Norddeich – Emden – Leer – Oldenburg(Oldb) – Hude – Delmenhorst – Bremen (Streckentabelle 390) mit einer planmäßigen Umsteigezeit auf die ICE-Linie 3b von 14 Minuten in Bremen
- Achim – Verden – Eyrstrup – Nienburg – Neustadt/Rbg. – Wunstorf – Hannover (Streckentabelle 380) mit einer planmäßigen Umsteigezeit auf die ICE-Linie 5 von 17 Minuten in Hannover
- Bielefeld – Herford – Löhne – Minden – Haste – Wunstorf – Hannover (Streckentabelle 370) mit einer planmäßigen Umsteigezeit auf die ICE-Linien 2a und 2b von 9 Minuten und auf die ICE-Linie 5 von 17 Minuten in Hannover
- Hannover – Letter – Seelze – Dedensen – Wunstorf (Streckentabelle 371) mit einer planmäßigen Umsteigezeit von den ICE-Linien 2a und 2b von 5 Minuten in Hannover
- Hannover – Wunstorf – Haste – Minden – Löhne(Westf) (Streckentabelle 370) mit einer planmäßigen Umsteigezeit von der ICE-Linie 5 von 13 Minuten in Hannover
- Schwedt(Oder) – Angermünde – Eberswalde – Bernau (b Berlin) – Berlin-Lichtenberg (Streckentabelle 203) mit einer planmäßigen Umsteigezeit auf die IC-Linie 8 von 17 Minuten in Berlin-Lichtenberg
- Leipzig – Taucha – Pönitz – Jesewitz – Wölpern – Eilenburg (Streckentabelle 215) mit einer planmäßigen Umsteigezeit von der ICE-Linie 8 von 16 Minuten in Leipzig
- Dieskau – Gröbers – Großkugel – Schkeuditz – Wiederitzsch – Leipzig (Streckentabelle 505) mit einer planmäßigen Umsteigezeit auf die IC-Linie 17 von 16 Minuten in Leipzig
- Mannheim – Limburgerhof – Schifferstadt – Böhl-Iggelheim – Haßloch(Pfalz) (Streckentabelle 670) mit einer planmäßigen Umsteigezeit von der IC-Linie 11 von 6 Minuten und von der ICE-Linie 2b von 16 Minuten in Mannheim

⁴Die Fahrplantabellen des Kursbuches werden dort *Streckentabelle* genannt. Sie sind im Nahverkehr mit natürlichen Zahlen von 100 bis 999 numeriert.

- Haßloch(Pfalz) – Böhl-Iggelheim – Schifferstadt – Limburgerhof – Mannheim – Heidelberg (Streckentabellen 665 und 670) mit einer planmäßigen Umsteigezeit von der IC-Linie 10 von 7 Minuten und von der IC-Linie 11 von 10 Minuten in Mannheim
- Köln – Rösrath – Overath – Engelskirchen – Runderoth – Dieringhausen – Gummersbach (Streckentabelle 459) mit einer planmäßigen Umsteigezeit von den IC-Linien 1, 5 und 10 von jeweils 16 Minuten in Köln
- Mönchengladbach – Grevenbroich – Rommerskirchen – Stommeln – Pulheim – Köln (Streckentabelle 490) mit einer planmäßigen Umsteigezeit auf die IC-Linie 1 von 8 Minuten, auf die IC-Linie 10 von 14 Minuten und auf die IC-Linie 11 von 11 Minuten in Köln
- Karlsruhe – Bruchhausen – Rastatt – Baden-Baden – Buehl – Achern – Renchen – Appenweier (Streckentabelle 702) mit einer planmäßigen Umsteigezeit von der ICE-Linie 2b von 5 Minuten und von der IC-Linie 10 von 14 Minuten in Karlsruhe
- Stuttgart – Ludwigsburg – Bietigheim-Bissingen – Besigheim – Walheim(Württ) – Lauffen(Neckar) – Heilbronn (Streckentabelle 780) mit einer planmäßigen Umsteigezeit von der ICE-Linie 6 von 7 Minuten in Stuttgart
- Heilbronn – Lauffen(Neckar) – Walheim(Württ) – Besigheim – Bietigheim-Bissingen – Ludwigsburg – Stuttgart (Streckentabelle 780) mit einer planmäßigen Umsteigezeit auf die IC-Linie 11 von 12 Minuten in Stuttgart
- Nürnberg – Schwabach – Rednitzhembach – Büchenbach – Roth (Streckentabelle 910) mit einer planmäßigen Umsteigezeit von der IC-Linie 1 von 5 Minuten und der IC-Linie 8 von 15 Minuten in Nürnberg
- Ulm – Erbach(Württ) – Laupheim West – Biberach(Riß) – Bad Schussenried – Aulendorf (Streckentabelle 751) mit einer planmäßigen Umsteigezeit von der ICE-Linie 6 von 11 Minuten in Ulm

Folgende Nahverkehrslinien mit längeren Umsteigezeiten wurden in das Liniennetz-Beispiel aufgenommen, um eine Anbindung von Nahverkehrslinie an den Anfangsbahnhof Saarbrücken und den Endbahnhof München der IC-Linie 17 bzw. der ICE-Linie 6 und der IC-Linien 8 und 11 abzubilden:

- Merzig(Saar) – Dillingen(S) – Saarlouis – Bous(Saar) – Völklingen – Saarbrücken (Streckentabelle 685) mit einer planmäßigen Umsteigezeit auf die IC-Linie 17 von 54 Minuten in Saarbrücken
- München – Geltendorf – Kaufering – Buchloe (Streckentabelle 970) mit einer planmäßigen Umsteigezeit von der ICE-Linie 3 von 60 Minuten, der ICE-Linie

6 von 35 Minuten, der IC-Linie 8 von 47 Minuten und der IC-Linie 11 von 42 Minuten in München

Auf allen genannten Linien verkehren die Züge in der Realität grundsätzlich im Takt. Vereinzelt kommt es im realen Liniennetz jedoch zu Abweichungen vom Taktfahrplan. Diese Abweichungen wurden im Liniennetz-Beispiel vernachlässigt, so daß dort die Züge auf allen Linien in einem Taktfahrplan verkehren.

Im Liniennetz-Beispiel sind insgesamt 119 Bahnhöfe (davon 42 Umsteigebahnhöfe) und 34 Linien (13 Fernverkehrslinien und 21 Nahverkehrslinien) mit zusammen 480 Zugfahrten pro Betriebstag vorhanden.⁵

7.2. Lösung der Optimierungsprobleme

Zur Lösung der Optimierungsprobleme aus (5.105), (5.106) und (5.107) auf den Seiten 92 bis 94 ist jeweils ein Wert $x \in \mathbb{N}_0$ für die obere Schranke $T_{\text{Sy}_{\max},j \rightarrow m}$ der außerplanmäßigen Synchronzeit gesucht, der die Abweichung des netzweiten realisierten Gesamtbeförderungszeitvolumens vom netzweiten Plan-Gesamtbeförderungszeitvolumen zu einem gegebenen Verspätungsniveau $\overline{\text{ID}}$ minimiert. Der netzweite Pünktlichkeitsgrad d_P soll dabei eine Schranke ϵ_1 nicht unterschreiten. Wegen $x \in \mathbb{N}_0$ handelt es sich um ein diskretes Problem, und es ist grundsätzlich eine Lösung durch „vollständige Enumeration“ möglich. Allerdings ist es aus zwei Gründen sinnvoll, den Lösungsraum für x weiter einzuzugrenzen:

1. Jeder Enumerationsschritt erfordert es, die Betriebssimulation zu gegebenem x und zu gegebenem $\overline{\text{ID}}$ über einen bestimmten Simulationszeitraum (mindestens ein Betriebstag) durchzuführen. Der Rechenaufwand dafür ist in realitätsnahen Liniennetzen beträchtlich.
2. In der Realität ist nur ein bestimmter Wertebereich für x und $\overline{\text{ID}}$ in Betracht zu ziehen. Für Aussagen über das Realsystem ist es wenig sinnvoll, mit großen Werten für x und $\overline{\text{ID}}$ zu kalkulieren.

In der Stichprobe, die in Abschnitt 6.3.6.2 untersucht wurde, konnte für das Verspätungsniveau ein Wert von $\overline{\text{ID}} = 2,2625$ beobachtet werden. Für die Vorgabe weiterer realistischer Verspätungsniveaus wird von

$$0 \leq \overline{\text{ID}} \leq 5$$

⁵Zum Vergleich: Das Liniennetz der Deutschen Bahn AG umfaßt rund 6100 Bahnhöfe und Haltepunkte (vgl. Geschäftsbericht 1997, Geschäftsbereich Personenbahnhöfe), pro Betriebstag 32055 Zugfahrten des Nahverkehrs (einschließlich der S-Bahnen) und 1119 Zugfahrten des Fernverkehrs (vgl. [Deu94b, S. 12]). Der weit überwiegende Teil dieser Netzdaten ist jedoch für die Problemstellung dieser Arbeit von untergeordneter Bedeutung und blieb daher unberücksichtigt, weil die Züge auf den Linien in kleinen Taktzeiten verkehren oder eine großzügige planmäßige Umsteigezeit im Soll-Fahrplan vorgesehen ist.

ausgegangen. Dieses Intervall wird den weit überwiegenden Anteil realistischer Verspätungsniveaus abdecken. Damit eine Lösung durch Enumeration bei einer hinreichend feinen Unterscheidung der Verspätungsniveaus möglich ist, wird dieses Intervall in einzelne Schritte zu je 0,5 Minuten aufgeteilt, d.h. es wird \overline{ID} mit $\overline{ID} = 0, 0,5, 1, \dots, 4,5, 5$ vorgegeben. Diese Vorgabe geht in die Betriebssimulation ein, indem der Zufallszahlengenerator, der für die Simulation der Zuwachsverspätungen benutzt wird, unter Verwendung des Wertes von \overline{ID} parametrisiert wird.

Es ist aus Gründen einer realitätsnahen Simulation zweckmäßig, auch für x nur ein bestimmtes Intervall in Betracht zu ziehen. Der Fall, daß die außerplanmäßige Synchronzeit vollständig variabel, d.h. nach oben unbeschränkt ist, wurde in der Problemstellung bereits als unzweckmäßig verworfen, weil dies bedeuten würde, daß sich Verspätungen der Zubringerzüge immer in vollem Umfang auf Anschlußzüge übertragen, was dazu führt, daß das gesamte Fahrplangefüge im Liniennetz schnell durcheinandergeraten würde. Dies hat zur Folge, daß die Abweichung des netzweiten realisierten Gesamtbeförderungszeitvolumens vom netzweiten Plan-Gesamtbeförderungszeitvolumen sehr groß wird. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, den Lösungsraum für x auf ein Intervall von 0 bis 10 Minuten zu begrenzen. Zeitangaben im Eisenbahnbetrieb werden immer zur vollen Minute diskretisiert, d.h. es wird x mit $x = 0, 1, \dots, 10$ durchlaufen. Durch eine zuggattungsabhängige Variation der Synchronzeitregelungen (mittels entsprechender Angaben in der Beschreibung des Liniennetzes, vgl. Abschnitt 6.3.2.3) und eine entsprechende Parametrisierung der Betriebssimulation kann eine Lösung der Problemstellungen (5.106) und (5.107) realisiert werden. Die optimale Lösung für die jeweilige Problemstellung ist dann derjenige Wert für x , bei dem die Betriebssimulation zu einem gegebenen Verspätungsniveau das Minimum der Abweichung des netzweiten realisierten Gesamtbeförderungszeitvolumens vom netzweiten Plan-Gesamtbeförderungszeitvolumen liefert. Dieser Wert für x wird mit $T_{Sy_{max}}^{opt}$ bezeichnet.

Die Restriktion für den Pünktlichkeitsgrad $d_P(\overline{ID}, x) \geq \epsilon_1$ wird bei der Parametrisierung des Lösungsalgorithmus zunächst nicht berücksichtigt. Der Pünktlichkeitsgrad hängt ab vom gegebenen Verspätungsniveau und dem Wert für x , der dazu ermittelt wird. Dieser netzweite Pünktlichkeitsgrad wird als Kennzahl der Betriebssimulation während eines Simulationslaufes bestimmt. Es kommt in der Problemstellung der vorliegenden Arbeit primär darauf an, einen optimalen Wert $T_{Sy_{max}}^{opt}$ zu finden. Die Restriktion für den Pünktlichkeitsgrad wird als „weiche“ Restriktion betrachtet, d.h. erst nachdem $T_{Sy_{max}}^{opt}$ ermittelt wurde, soll diese Restriktion in der folgenden Weise berücksichtigt werden:

1. Wähle ein ϵ_1 mit $0 \leq \epsilon_1 \leq 1$
2. Nimm zu $T_{Sy_{max}}^{opt}$ den Pünktlichkeitsgrad $d_P(\overline{ID}, T_{Sy_{max}}^{opt})$
3. Wenn $d_P(\overline{ID}, T_{Sy_{max}}^{opt}) \geq \epsilon_1$, dann akzeptiere das gefundene $x = T_{Sy_{max}}^{opt}$ als Lösung
4. Sonst nimm ein $x \neq T_{Sy_{max}}^{opt}$, für das $d_P(\overline{ID}, x) \geq \epsilon_1$ zutrifft.

5. Wenn es kein $x \neq T_{\text{Sy}_{\text{max}}}^{\text{opt}}$ gibt, für das $d_P(\overline{\text{ID}}, x) \geq \epsilon_1$ zutrifft, wähle ein geeigneteres ϵ_1 und gehe zu 2.

Die Ermittlung einer optimalen außerplanmäßigen Synchronzeit zu einem gegebenen Verspätungsniveau (ausgedrückt durch eine gegebene mittlere Zuwachsverspätung $\overline{\text{ID}}$ einer Negativ-Exponentialverteilung für $t_{\text{ID},z,l,s}$) auf der Basis gegebener Reisendenströme, die zuvor mit der Belastungssimulation bestimmt wurden, erfolgt durch ein wiederholtes Durchlaufen der Betriebssimulation mit jeweils wechselnden Parametern. Den Algorithmus zur Lösung der Optimierungsprobleme zeigt Algorithmus 4.

Algorithmus 4 Algorithmus der Problemlösung

```

 $\mu_{\text{vorm}} \leftarrow 450$  {Die Vormittagsspitze der Verkehrsnachfrage sei um 7:30 Uhr}
 $\sigma_{\text{vorm}}^2 \leftarrow 10000$ 
 $\mu_{\text{nachm}} \leftarrow 990$  {Die Nachmittagsspitze der Verkehrsnachfrage sei um 16:30 Uhr}
 $\sigma_{\text{nachm}}^2 \leftarrow 16900$ 
 $R_{\%U_{\text{m}}}^{\text{max}} \leftarrow 0.25$ 
 $C \leftarrow 0.01447$ 
Durchlaufe Belastungssimulation mit diesen Parametern
 $D_P \leftarrow 5$ 
 $T_{\text{Zuschl}} \leftarrow 0.04$  {Der Regelzuschlag betrage immer 4% der reinen Fahrzeit}
for  $\overline{\text{ID}} = 0$  to 5 step 0.5 do
     $t_{\text{Sim}}^{\text{max}} \leftarrow 4320$  {Simuliere einen Betriebstag, einschl. je 1 Tag Vor- und Nachlauf ohne Kennzahlenerfassung}
    for  $x = 0$  to 10 step 1 do
        Durchlaufe Betriebssimulation für den Simulationszeitraum  $t_{\text{Sim}}^{\text{max}}$ 
    end for
     $t_{\text{Sim}}^{\text{max}} \leftarrow 12960$  {Simuliere eine Betriebswoche, einschl. je 1 Tag Vor- und Nachlauf ohne Kennzahlenerfassung}
    for  $x = 0$  to 10 step 1 do
        Durchlaufe Betriebssimulation
    end for
end for

```

7.3. Ergebnisse

Insgesamt wurden zehn Läufe der Betriebssimulation mit verschiedenen Parametern für die Initialisierung des Pseudo-Zufallszahlengenerators durchgeführt. Die übrigen Bedingungen (Verspätungsniveau, Verkehrsnachfrage und die weiteren Parameter aus Algorithmus 4) blieben unverändert. Die aggregierten Kennzahlen für die netzweiten Plan- und Ist-Beförderungszeitanteile sowie den Pünktlichkeitsgrad wurden über diese zehn Läufe gemittelt.

Im folgenden beziehen sich die Ergebnisse auf eine Betriebswoche. Die Betrachtung einer Betriebswoche liefert einen größeren Stichprobenumfang als lediglich ein Betriebstag. Einflüsse der Zuwachsverspätungen auf die außerplanmäßigen Synchronzeiten und die Beförderungszeitanteile lassen sich damit besser erkennen. Bei der kleinen Stichprobe, die die Betrachtung eines Betriebstages liefert, sind bei den Beförderungszeitanteilen stärkere Schwankungen zu beobachten, die gegebenenfalls zu ungenauen Schlußfolgerungen führen können.

Im untersuchten Liniennetz-Beispiel mit den Linien aus Abschnitt 7.1 beträgt in einer Betriebswoche

- das netzweite Plan-Gesamtfahrzeitvolumen $T_F^{\text{gesamt}} = 90\,416\,940$ Personenminuten,
- das netzweite Plan-Gesamthaltezeitvolumen $T_{\text{Durch}}^{\text{gesamt}} = 3\,088\,513$ Personenminuten,
- das netzweite Plan-Gesamtumsteigezeitvolumen $T_{\text{Um}}^{\text{gesamt}} = 5\,033\,634$ Personenminuten,
- und damit das netzweite Plan-Gesamtbeförderungszeitvolumen $T_{\text{Bef}}^{\text{gesamt}} = 98\,539\,087$ Personenminuten.

Die Reisendenströme – charakterisiert durch die Direktfahrer DF_{lzs} und die Umsteigeranteile $R_{\%Um,z,l \rightarrow m,s}$ – wurden vorab durch eine Belastungssimulation ermittelt und für alle Simulationsläufe einheitlich gelassen.

Es wird angenommen, daß Verspätungsniveaus von 1 bis zu 2,5 Minuten in Eisenbahn-Liniennetzen besonders häufig anzutreffen sind (beispielsweise beträgt in der untersuchten Stichprobe aus Abschnitt 6.3.6.2 das Verspätungsniveau $\overline{ID} = 2,2625$.) Deshalb werden die Resultate bei einer mittleren Zuwachsverspätung \overline{ID} von 1 Minute, 1,5 Minuten, 2 Minuten und 2,5 Minuten jeweils bei einem Simulationszeitraum von $t_{\text{Sim}}^{\text{max}} = 12960$ (das entspricht der Kennzahlenerfassung für eine Betriebswoche zuzüglich je eines Betriebstages Vorlauf- und Nachlaufzeit) hier präsentiert und näher betrachtet. Die Abbildungen 7.1 bis 7.12 zeigen die die Abweichungen des Gesamtbeförderungszeitvolumens und seiner Bestandteile bezogen auf die oben genannten Plan-Volumina. In den Abbildungen sind folgende Kurven dargestellt (Angaben jeweils in Personenminuten):

- Die Kurve „BefVolAbw“ zeigt jeweils die absolute Abweichung des netzweiten Ist-Gesamtbeförderungszeitvolumens vom netzweiten Plan-Gesamtbeförderungszeitvolumen, d.h. $t_{\text{Bef}}^{\text{gesamt}} - T_{\text{Bef}}^{\text{gesamt}}$
- Die Kurve „FahrVolAbw“ zeigt jeweils die absolute Abweichung des netzweiten Ist-Gesamtfahrzeitvolumens vom netzweiten Plan-Gesamtfahrzeitvolumen, d.h. $t_F^{\text{gesamt}} - T_F^{\text{gesamt}}$
- Die Kurve „HalteVolAbw“ zeigt jeweils die absolute Abweichung des netzweiten Ist-Gesamthaltezeitvolumens vom netzweiten Plan-Gesamthaltezeitvolumen, d.h. $t_{\text{Durch}}^{\text{gesamt}} - T_{\text{Durch}}^{\text{gesamt}}$

- Die Kurve „UmstVolAbw“ zeigt jeweils die absolute Abweichung des netzweiten Ist-Gesamtumsteigezeitvolumens vom netzweiten Plan-Gesamtumsteigezeitvolumen, d.h. $t_{Um}^{gesamt} - T_{Um}^{gesamt}$

Die Abbildungen 7.1 bis 7.4 beziehen sich auf die Problemstellung (5.105) auf Seite 92, bei der für alle Linien die gleiche Synchronzeitregelung angewandt wird (*symmetrische Synchronzeitregelung*). Die Abbildungen 7.5 bis 7.8 beziehen sich auf die Problemstellung aus (5.106) auf Seite 93. Dort wird allen Zügen, die auf Nahverkehrslinien verkehren, eine außerplanmäßige Synchronzeit eingeräumt, um Anschlüsse von verspäteten Zubringerzügen anderer Nahverkehrslinien oder von Fernverkehrslinien sicherzustellen. Züge, die auf Fernverkehrslinien verkehren, erhalten hingegen keine außerplanmäßige Synchronzeit, um Anschlüsse aus verspäteten Nahverkehrszügen zu gewährleisten. Auf die Problemstellung aus (5.107) auf Seite 94 beziehen sich die Abbildungen 7.9 bis 7.12. Bei dieser Problemstellung wird allen Zügen, die auf Fernverkehrslinien verkehren, eine außerplanmäßige Synchronzeit eingeräumt, um Anschlüsse von verspäteten Zubringerzügen anderer Fernverkehrslinien oder von Nahverkehrslinien sicherzustellen. Züge, die auf Nahverkehrslinien verkehren, erhalten hingegen keine außerplanmäßige Synchronzeit, um Anschlüsse aus verspäteten Fernverkehrszügen zu gewährleisten (*asymmetrische Synchronzeitregelungen*).

Zusammengefaßt lassen sich folgende Ergebnisse feststellen:

1. Es wurde in jedem untersuchten Fall von $\overline{ID} > 0$ ein optimaler Wert $T_{Sy_{max}}^{opt}$ gefunden.⁶
2. Dieser Wert liegt überwiegend in einem Intervall von 2 bis 4 Minuten, wobei $T_{Sy_{max}}^{opt} = 2$ relativ häufig ermittelt wird.
3. Durch Anwendung einer optimalen Regelung für die Gewährung außerplanmäßiger Synchronzeiten bei gegebenem \overline{ID} kann die Abweichung des netzweiten Ist-Gesamtbeförderungszeitvolumens vom entsprechenden Planwert um bis zu 34,3% gegenüber dem Fall gesenkt werden, daß Zügen grundsätzlich keine außerplanmäßige Synchronzeit (d.h. $T_{Sy_{max}} = 0$) gewährt wird.
4. Bei außerplanmäßigen Synchronzeiten in diesem Intervall ist der synchronzeitbedingte Einfluß auf den Pünktlichkeitsgrad verhältnismäßig gering.
5. Die Gewährung einer außerplanmäßigen Synchronzeit wirkt sich deutlich auf das netzweite Gesamthaltezeitvolumen und das netzweite Gesamtumsteigezeitvolumen aus. Das netzweite Gesamtfahrzeitvolumen bleibt demgegenüber erwartungsgemäß

⁶Bei $\overline{ID} = 0$ treten keine positiven Ankunftsverspätungen auf, eine außerplanmäßige Synchronzeit braucht daher nicht gewährt zu werden. Dieses Verspätungsniveau repräsentiert den (theoretischen) Fall, das alle Züge pünktlich verkehren bzw. sogar früher als planmäßig an Bahnhöfen eintreffen, wenn der Regelzuschlag nicht ausgeschöpft wird. Dieses Szenario dient somit lediglich zu Vergleichszwecken.

unberührt, weil außerplanmäßige Synchronzeiten prinzipiell kaum Einfluß auf die Fahrzeiten der Züge haben, sondern bei Anschlußbindungen an Umsteigebahnhöfen ansetzen.

6. Mit zunehmenden Werten für $T_{\text{Sy}_{\text{max}}}$ steigt die netzweite Abweichung des Plan-Gesamthaltezeitvolumens vom Ist-Gesamthaltezeitvolumen an. Es ist also auch netzweit zu beobachten, daß sich die Gewährung außerplanmäßiger Synchronzeiten ungünstig auf solche Reisenden auswirkt, die an einem Umsteigebahnhof in einem anschlussaufnehmenden Zug verbleiben, um die Reise fortzusetzen.
7. Demgegenüber fällt mit zunehmenden Werten für $T_{\text{Sy}_{\text{max}}}$ meist die Abweichung des netzweiten Plan-Gesamtumsteigezeitvolumens vom entsprechenden Planwert. Lediglich für Werte von $\overline{\text{ID}} < 3$ und großen Werten für die maximale außerplanmäßige Synchronzeit, d.h. $T_{\text{Sy}_{\text{max}}} > 6$ kann mit zunehmendem $T_{\text{Sy}_{\text{max}}}$ wieder ein leichter Anstieg dieser Abweichung festgestellt werden.
8. Bei Verspätungsniveaus $\overline{\text{ID}} > 0.5$ gibt es einen Schnittpunkt der Kurven „HalteVolAbw“ und „UmstVolAbw“. In diesem Schnittpunkt sind jeweils die Abweichungen des netzweiten Plan-Gesamthaltezeitvolumens und des netzweiten Plan-Gesamtumsteigezeitvolumens von den entsprechenden Planwerten gleich groß. Es gibt also eine maximale außerplanmäßige Synchronzeit, bei der gilt:

$$t_{\text{Durch}}^{\text{gesamt}} - T_{\text{Durch}}^{\text{gesamt}} = t_{\text{Um}}^{\text{gesamt}} - T_{\text{Um}}^{\text{gesamt}}$$

9. Dieser Schnittpunkt kann als Punkt eines Gleichgewichts zwischen den synchronzeitbedingten Auswirkungen auf das Ist-Gesamthaltezeitvolumen und das Ist-Gesamtumsteigezeitvolumen interpretiert werden. Bei einer maximalen außerplanmäßigen Synchronzeit, für die die obige Gleichung gilt, sind also die synchronzeitbedingten Auswirkungen auf die Summe aller Umsteiger gleich der synchronzeitbedingten Auswirkungen auf die Summe aller Durchfahrer. An diesem Punkt sind also bei netzweiter Betrachtung die synchronzeitbedingten Nachteile für die Durchfahrer durch Herauszögern der Abfahrt gleich der synchronzeitbedingten Vorteile für die Umsteiger, die dadurch noch ihren geplanten Anschlußzug erreichen können.
10. Der Punkt dieses Gleichgewichts liegt für $\overline{\text{ID}} = 1$ unterhalb und sonst oberhalb der optimalen oberen Schranke für die außerplanmäßige Synchronzeit $T_{\text{Sy}_{\text{max}}}^{\text{opt}}$.
11. Der Punkt dieses Gleichgewichts verschiebt sich mit zunehmendem Verspätungsniveau $\overline{\text{ID}}$ in Richtung größerer Werte für die außerplanmäßige Synchronzeit.

Die Tabellen 7.1 bis 7.3 zeigen für die genannten Problemstellungen einen Vergleich der Ist-Gesamtbeförderungszeit-Volumenabweichungen, wenn jeweils das ermittelte Optimum für eine maximale außerplanmäßige Synchronzeit $T_{\text{Sy}_{\text{max}}}^{\text{opt}}$ Anwendung findet bzw.

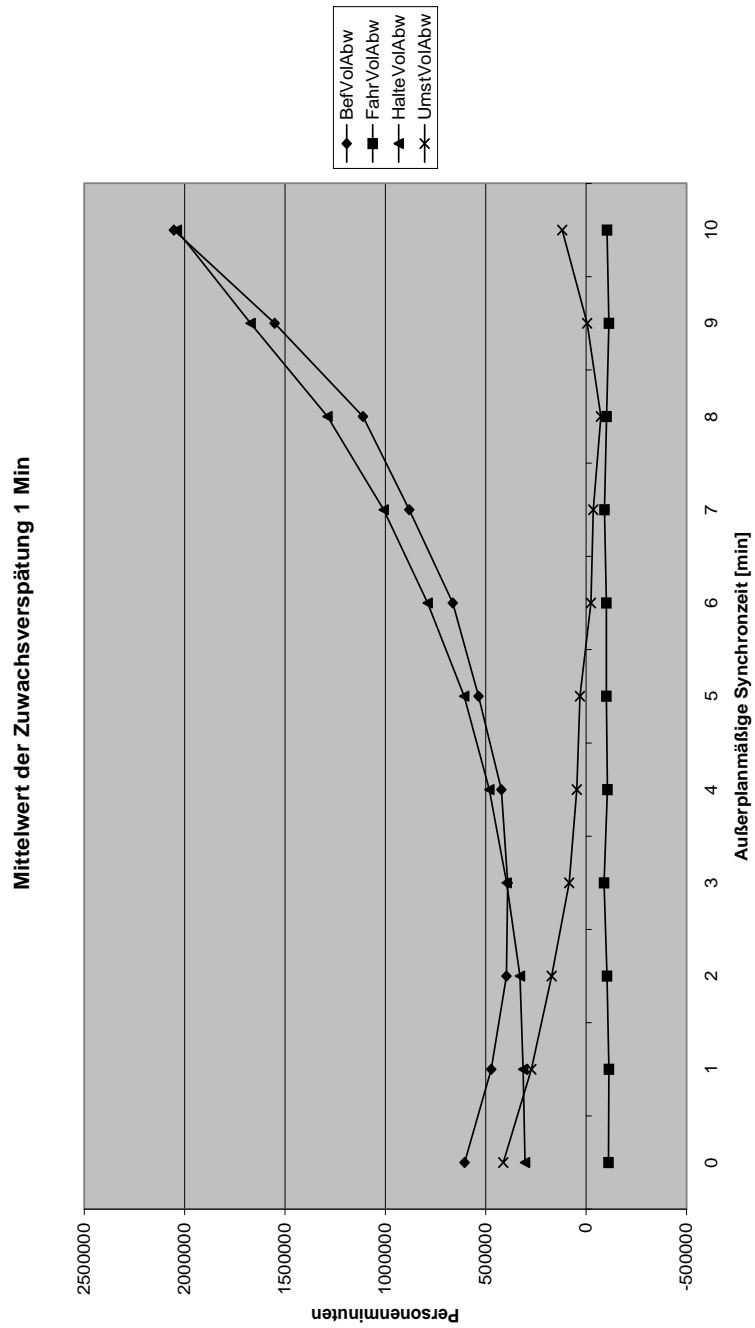


Abbildung 7.1.: Abweichungen der Beförderungszeitanteile bei vorgegebenem $\overline{ID} = 1$, abhängig von $T_{Sy_{max}}$: Symmetrische Synchronzeitregelung – alle Zuggattungen warten aufeinander

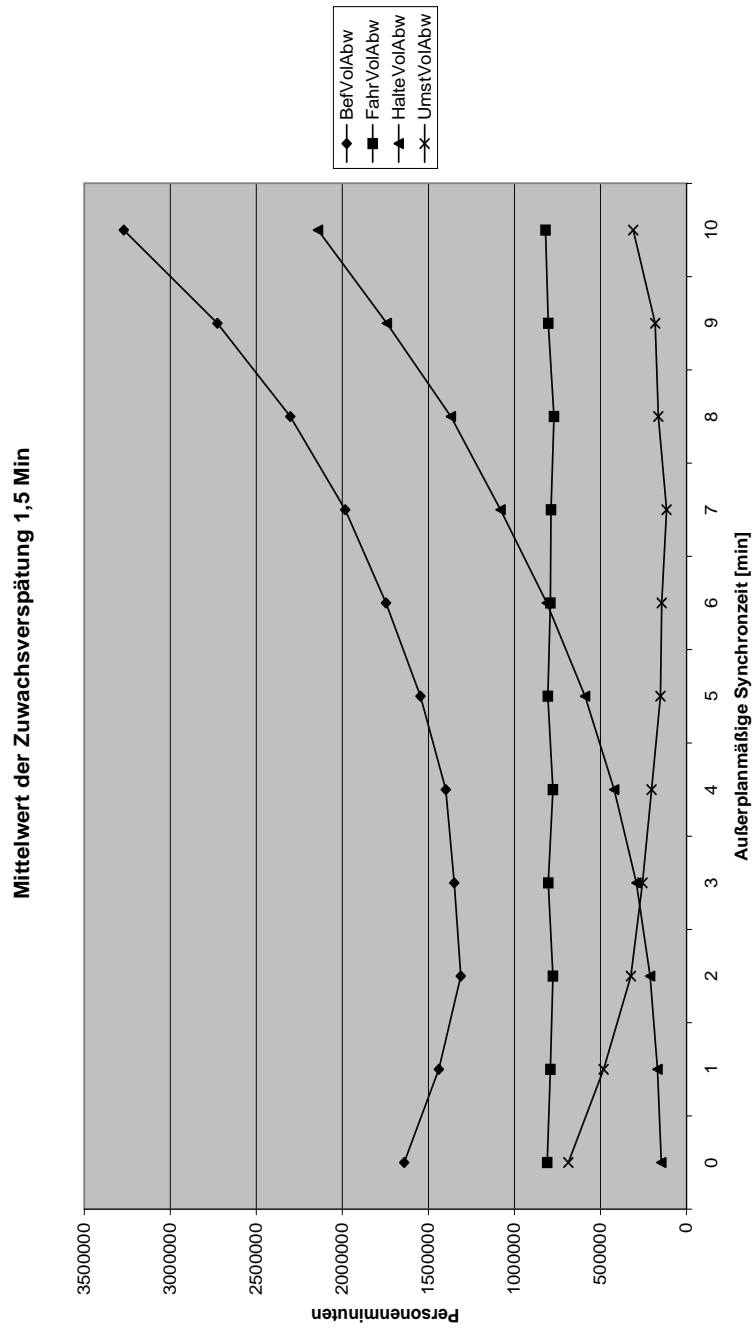


Abbildung 7.2.: Abweichungen der Beförderungszeitanteile bei vorgegebenem $\overline{ID} = 1.5$, abhängig von $T_{Sy_{max}}$: Symmetrische Synchronzeitregelung – alle Zugattungen warten aufeinander

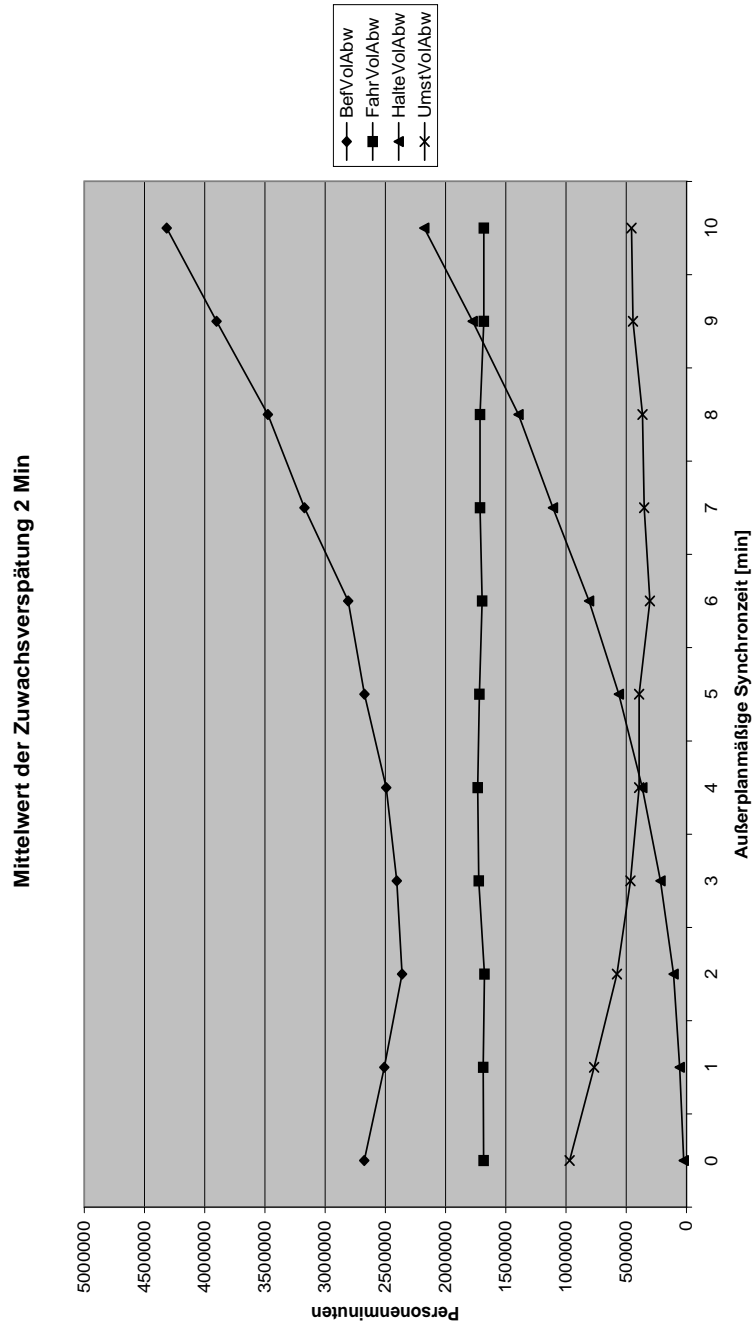


Abbildung 7.3.: Abweichungen der Beförderungszeitanteile bei vorgegebenem $\overline{ID} = 2$, abhängig von $T_{Sy_{max}}$: Symmetrische Synchronzeitregelung – alle Zuggattungen warten aufeinander

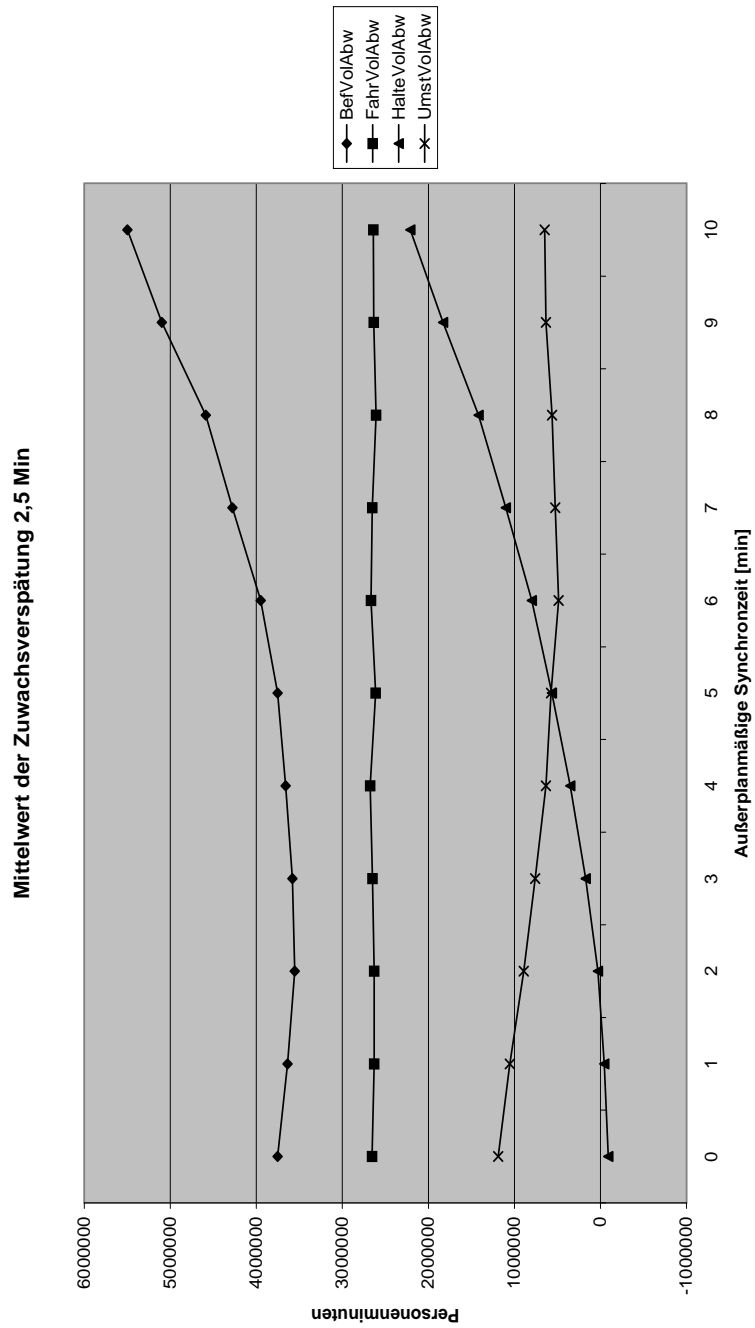


Abbildung 7.4.: Abweichungen der Beförderungszeitanteile bei vorgegebenem $\overline{ID} = 2.5$, abhängig von $T_{Sy_{max}}$: Symmetrische Synchronzeitregelung – alle Zuggattungen warten aufeinander

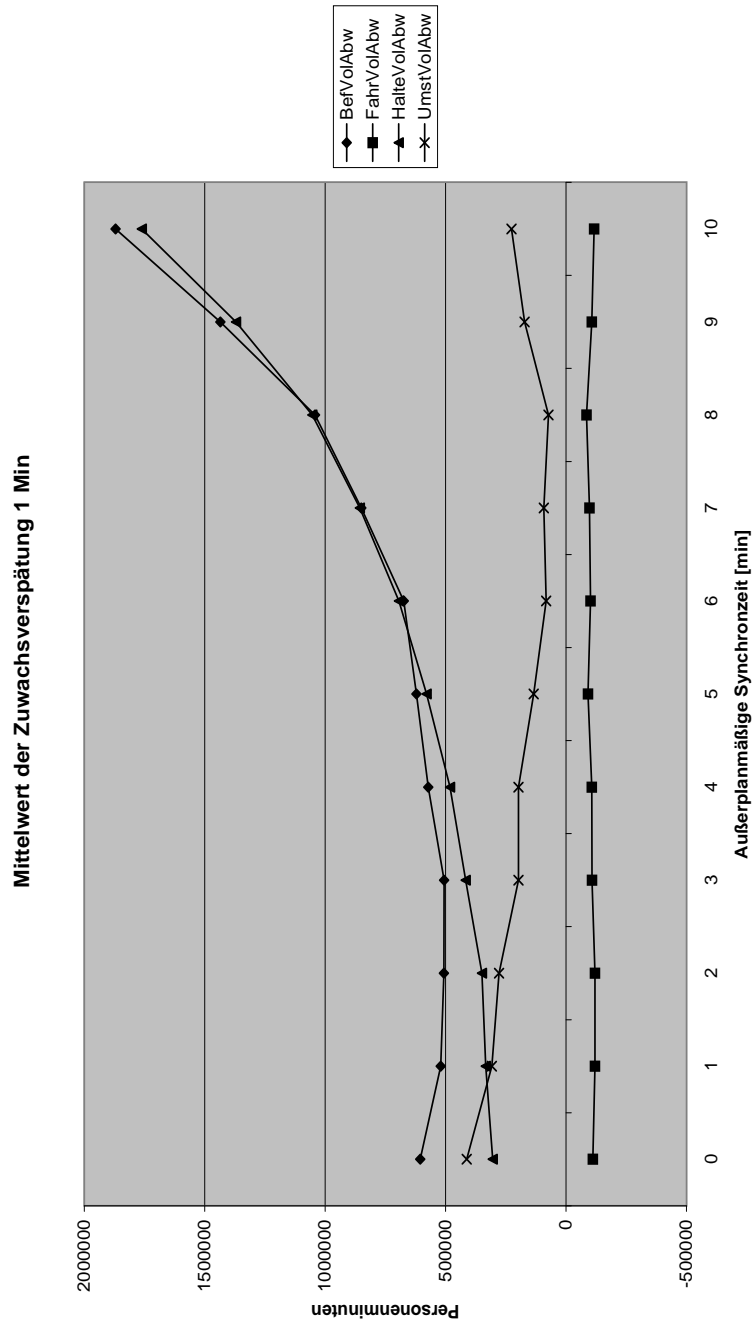


Abbildung 7.5.: Abweichungen der Beförderungszeitanteile bei vorgegebenem $\overline{ID} = 1$, abhängig von $T_{Sy_{max}}$: Asymmetrische Synchronzeitregelung – Nahverkehr wartet auf verspäteten Fernverkehr (nicht jedoch umgekehrt), gleiche Zugattungen warten aufeinander

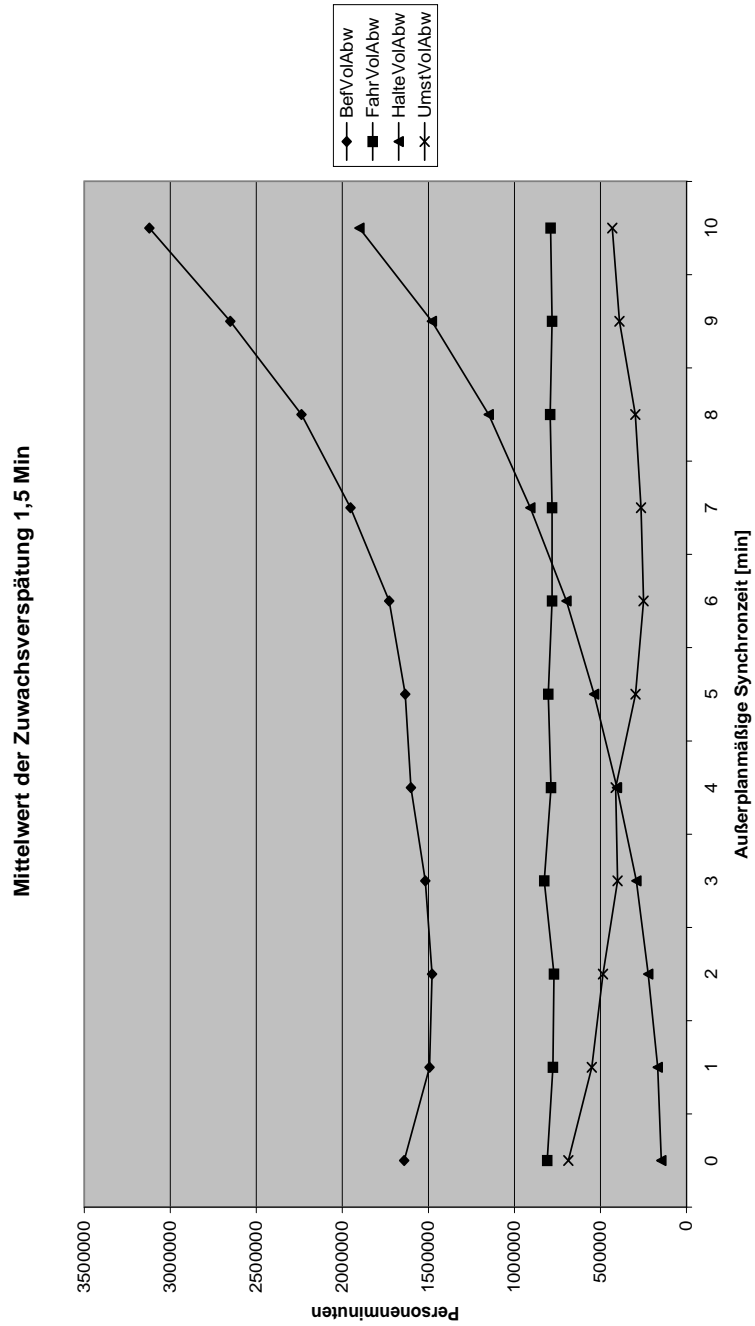


Abbildung 7.6.: Abweichungen der Beförderungszeitanteile bei vorgegebenem $\overline{ID} = 1.5$, abhängig von $T_{Sy_{max}}$: Asymmetrische Synchronzeitregelung – Nahverkehr wartet auf verspäteten Fernverkehr (nicht jedoch umgekehrt), gleiche Zugattungen warten aufeinander

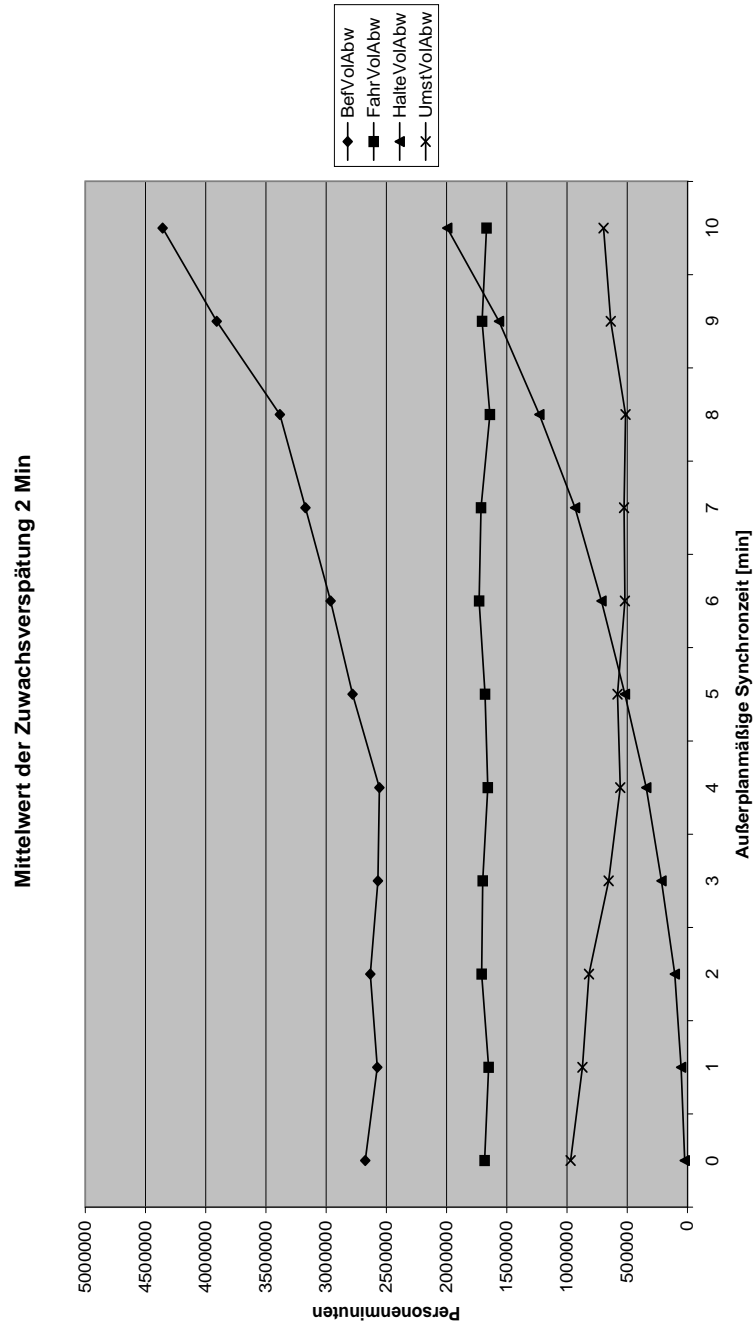


Abbildung 7.7.: Abweichungen der Beförderungszeitanteile bei vorgegebenem $\overline{ID} = 2$, abhängig von $T_{Sy_{max}}$: Asymmetrische Synchronzeitregelung – Nahverkehr wartet auf verspäteten Fernverkehr (nicht jedoch umgekehrt), gleiche Zugattungen warten aufeinander

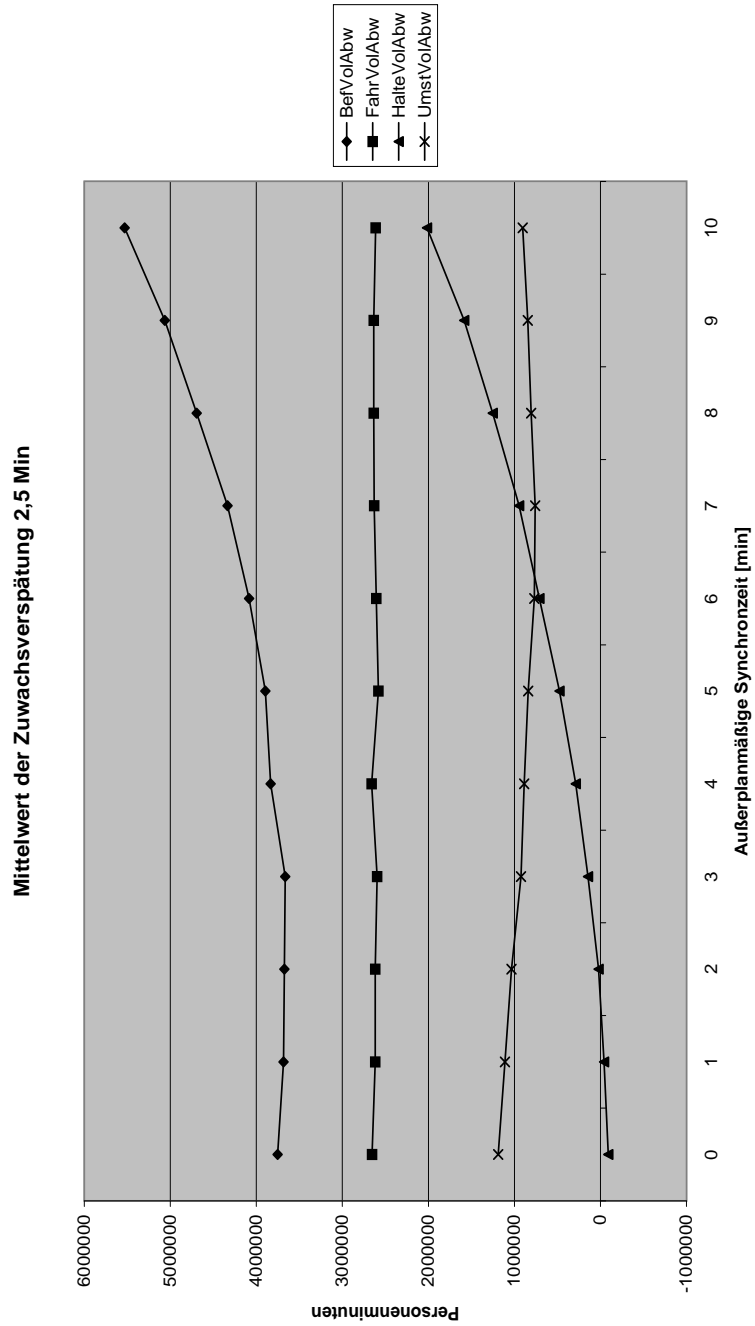


Abbildung 7.8.: Abweichungen der Beförderungszeitanteile bei vorgegebenem $\overline{ID} = 2.5$, abhängig von $T_{Sy_{max}}$: Asymmetrische Synchronzeitregelung – Nahverkehr wartet auf verspäteten Fernverkehr (nicht jedoch umgekehrt), gleiche Zugattungen warten aufeinander

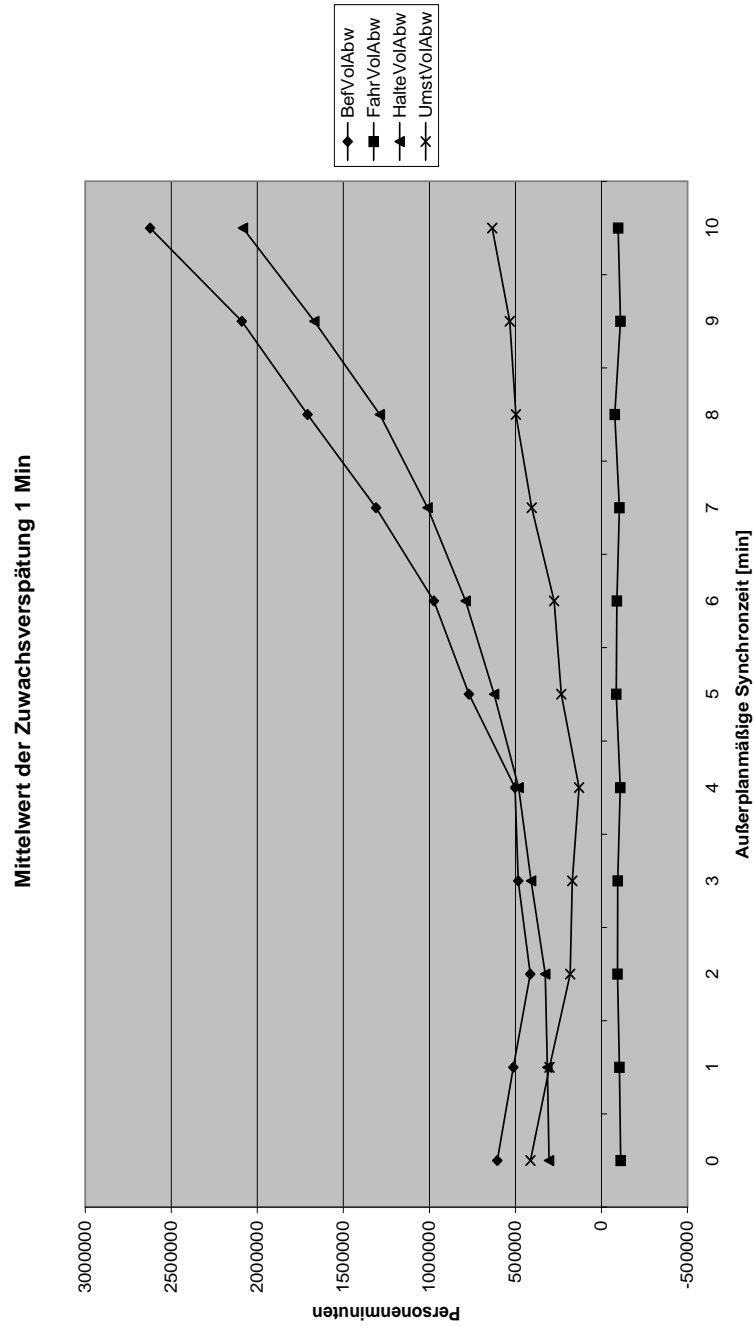


Abbildung 7.9.: Abweichungen der Beförderungszeitanteile bei vorgegebenem $\overline{ID} = 1$, abhängig von $T_{Sy_{max}}$: Asymmetrische Synchronzeitregelung – Fernverkehr wartet auf verspäteten Nahverkehr (nicht jedoch umgekehrt), gleiche Zugattungen warten aufeinander

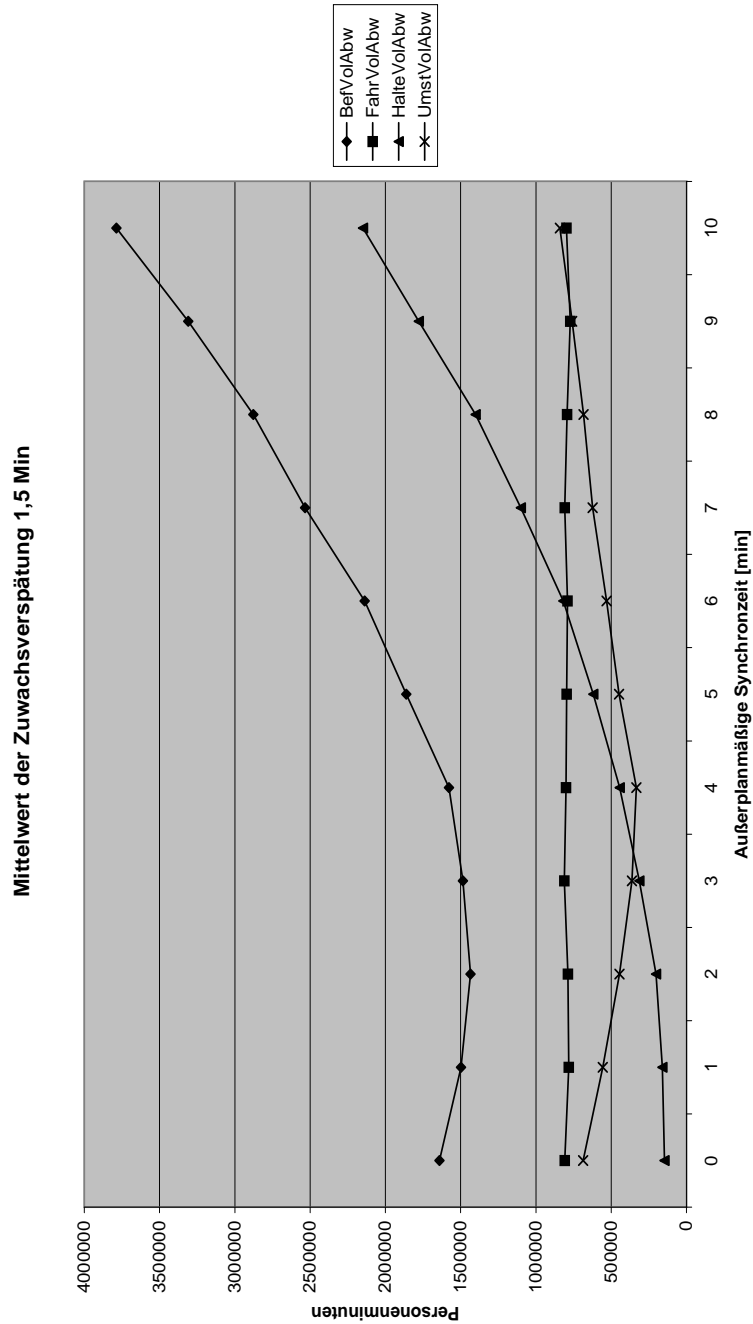


Abbildung 7.10.: Abweichungen der Beförderungszeitanteile bei vorgegebenem $\overline{ID} = 1.5$, abhängig von $T_{Sy_{max}}$: Asymmetrische Synchronzeitregelung – Fernverkehr wartet auf verspäteten Nahverkehr (nicht jedoch umgekehrt), gleiche Zugattungen warten aufeinander

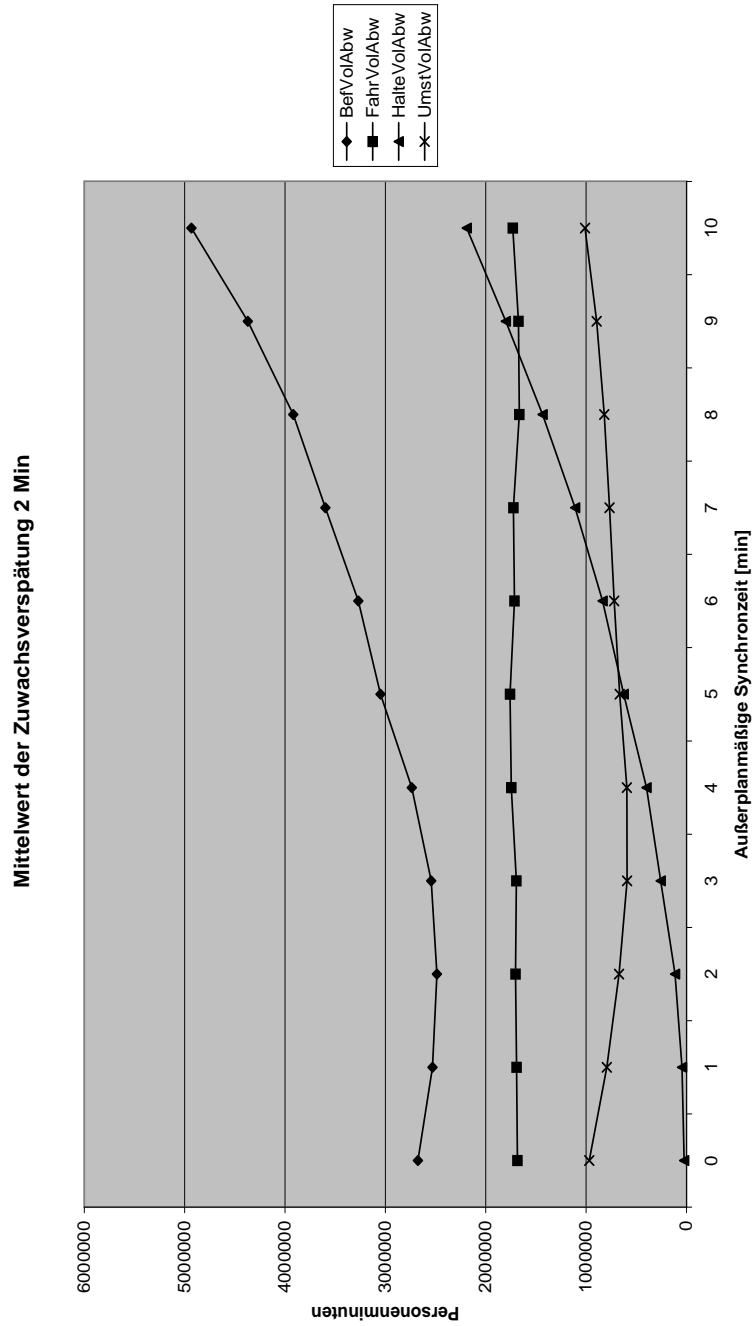


Abbildung 7.11.: Abweichungen der Beförderungszeitanteile bei vorgegebenem $\overline{ID} = 1$, abhängig von $T_{Sy_{max}}$: Asymmetrische Synchronzeitregelung – Fernverkehr wartet auf verspäteten Nahverkehr (nicht jedoch umgekehrt), gleiche Zugattungen warten aufeinander

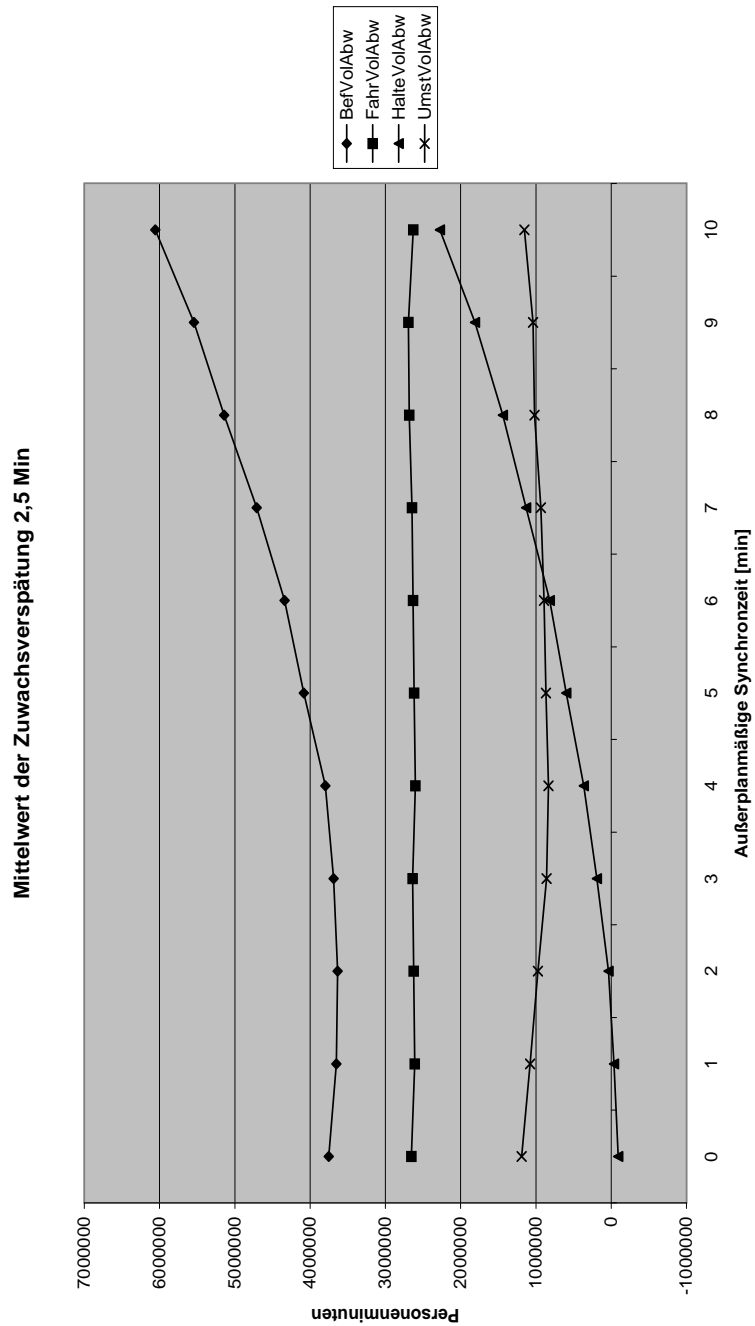


Abbildung 7.12.: Abweichungen der Beförderungszeitanteile bei vorgegebenem $\overline{ID} = 1$, abhängig von $T_{Sy_{max}}$: Asymmetrische Synchronzeitregelung – Fernverkehr wartet auf verspäteten Nahverkehr (nicht jedoch umgekehrt), gleiche Zugattungen warten aufeinander

wenn Zugfahrten grundsätzlich keine außerplanmäßige Synchronzeit ($T_{\text{Sy}_{\max}} = 0$) eingeräumt wird. Es zeigt sich im untersuchten Liniennetz-Beispiel, daß die Anwendung einer optimalen Synchronzeitregelung dann die günstigsten Auswirkungen auf die Plan-Ist-Abweichung des Gesamtbeförderungszeitvolumens hat, wenn diese Synchronzeitregelung als symmetrische Synchronzeitregelung für alle Linien angewandt wird. Die Plan-Ist-Abweichung des Gesamtbeförderungszeitvolumens kann dann um bis zu 34,3% gegenüber dem Fall reduziert werden, daß Zugfahrten grundsätzlich keine außerplanmäßige Synchronzeit eingeräumt wird.

ID	$T_{\text{Sy}_{\max}}^{\text{opt}}$	$t_{\text{Bef}}^{\text{gesamt}} - T_{\text{Bef}}^{\text{gesamt}}$	$t_{\text{Bef}}^{\text{gesamt}} - T_{\text{Bef}}^{\text{gesamt}}$ bei $T_{\text{Sy}_{\max}} = 0$	Abw %
1	3	397 247	605 007	-34.3
1.5	2	1 311 172	1 641 002	-20.1
2	2	2 361 836	2 675 537	-11.7
2.5	2	3 552 570	3 751 427	-5.3

Tabelle 7.1.: Abweichungen der Beförderungszeitanteile: Symmetrische Synchronzeitregelung – alle Zuggattungen warten aufeinander

ID	$T_{\text{Sy}_{\max}}^{\text{opt}}$	$t_{\text{Bef}}^{\text{gesamt}} - T_{\text{Bef}}^{\text{gesamt}}$	$t_{\text{Bef}}^{\text{gesamt}} - T_{\text{Bef}}^{\text{gesamt}}$ bei $T_{\text{Sy}_{\max}} = 0$	Abw %
1	3	506 257	605 007	-16.3
1.5	2	1 478 123	1 641 002	-9.9
2	4	2 558 169	2 675 537	-4.4
2.5	3	3 664 292	3 751 427	-2.3

Tabelle 7.2.: Abweichungen der Beförderungszeitanteile: asymmetrische Synchronzeitregelung – Nahverkehr wartet auf verspäteten Fernverkehr (nicht jedoch umgekehrt), gleiche Zuggattungen warten aufeinander

ID	$T_{\text{Sy}_{\max}}^{\text{opt}}$	$t_{\text{Bef}}^{\text{gesamt}} - T_{\text{Bef}}^{\text{gesamt}}$	$t_{\text{Bef}}^{\text{gesamt}} - T_{\text{Bef}}^{\text{gesamt}}$ bei $T_{\text{Sy}_{\max}} = 0$	Abw %
1	2	414 261	605 007	-31.5
1.5	2	1 433 756	1 641 002	-12.6
2	2	2 486 822	2 675 537	-7.1
2.5	2	3 634 067	3 751 427	-3.1

Tabelle 7.3.: Abweichungen der Beförderungszeitanteile: asymmetrische Synchronzeitregelung – Fernverkehr wartet auf verspäteten Nahverkehr (nicht jedoch umgekehrt), gleiche Zuggattungen warten aufeinander

\overline{ID}	$T_{Sy_{max}}^{opt}$	$d_P[\%]$	$d_P[\%]$ bei $T_{Sy_{max}} = 0$	Abw %-Punkte
1	3	96.3	97.8	1.5
1.5	2	89.7	91.3	1.6
2	2	80.2	82.7	2.5
2.5	2	71.4	74.2	2.8

Tabelle 7.4.: Netzweiter Pünktlichkeitsgrad in Abhängigkeit von \overline{ID} und $T_{Sy_{max}}$: Symmetrische Synchronzeitregelung – alle Zugattungen warten aufeinander

\overline{ID}	$T_{Sy_{max}}^{opt}$	$d_P[\%]$	$d_P[\%]$ bei $T_{Sy_{max}} = 0$	Abw %-Punkte
1	3	96.6	97.8	1.2
1.5	2	90.2	91.3	1.1
2	4	75.5	82.7	7.2
2.5	3	69.5	74.2	4.7

Tabelle 7.5.: Netzweiter Pünktlichkeitsgrad in Abhängigkeit von \overline{ID} und $T_{Sy_{max}}$: asymmetrische Synchronzeitregelung – Nahverkehr wartet auf verspäteten Fernverkehr (nicht jedoch umgekehrt), gleiche Zugattungen warten aufeinander

\overline{ID}	$T_{Sy_{max}}^{opt}$	$d_P[\%]$	$d_P[\%]$ bei $T_{Sy_{max}} = 0$	Abw %-Punkte
1	2	97.6	97.8	0.2
1.5	2	90.4	91.3	0.9
2	2	80.7	82.7	2.0
2.5	2	72.0	74.2	2.2

Tabelle 7.6.: Netzweiter Pünktlichkeitsgrad in Abhängigkeit von \overline{ID} und $T_{Sy_{max}}$: asymmetrische Synchronzeitregelung – Fernverkehr wartet auf verspäteten Nahverkehr (nicht jedoch umgekehrt), gleiche Zugattungen warten aufeinander

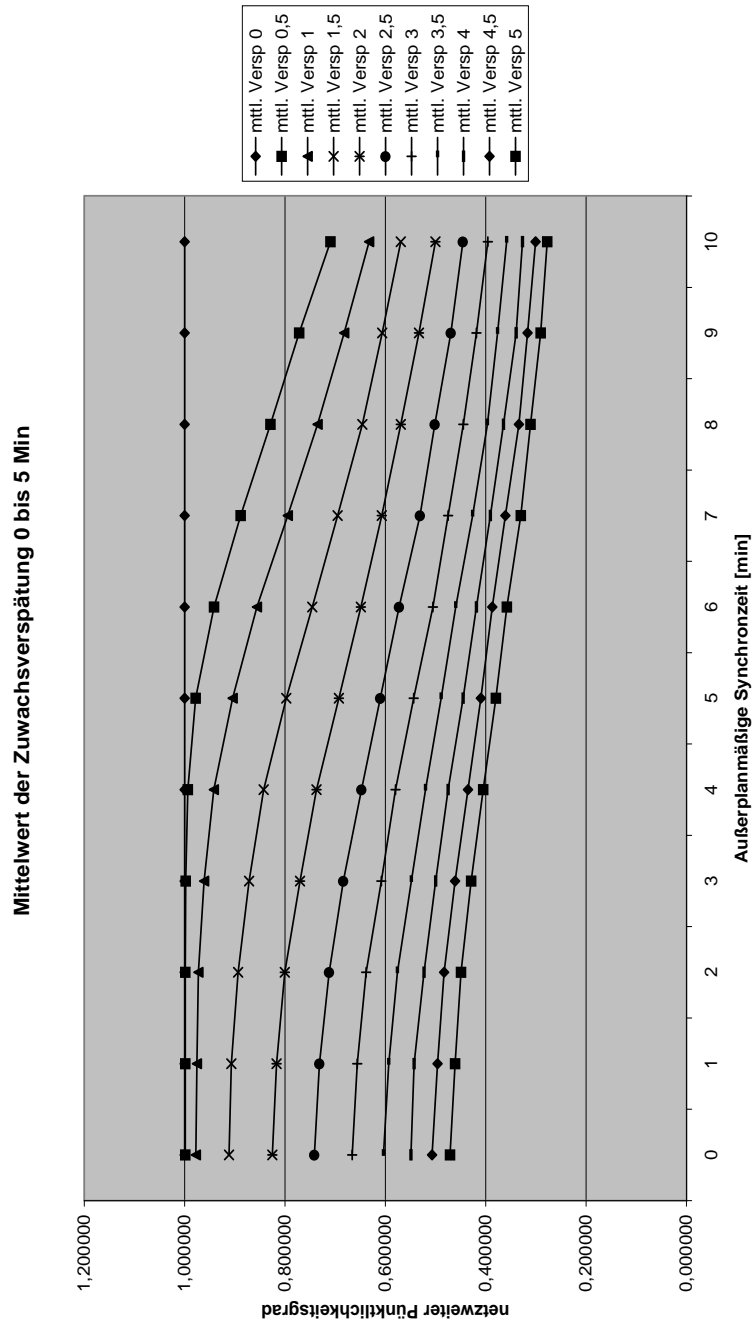


Abbildung 7.13.: Netzweiter Pünktlichkeitsgrad: Symmetrische Synchronzeitregelung – alle Zuggattungen warten aufeinander

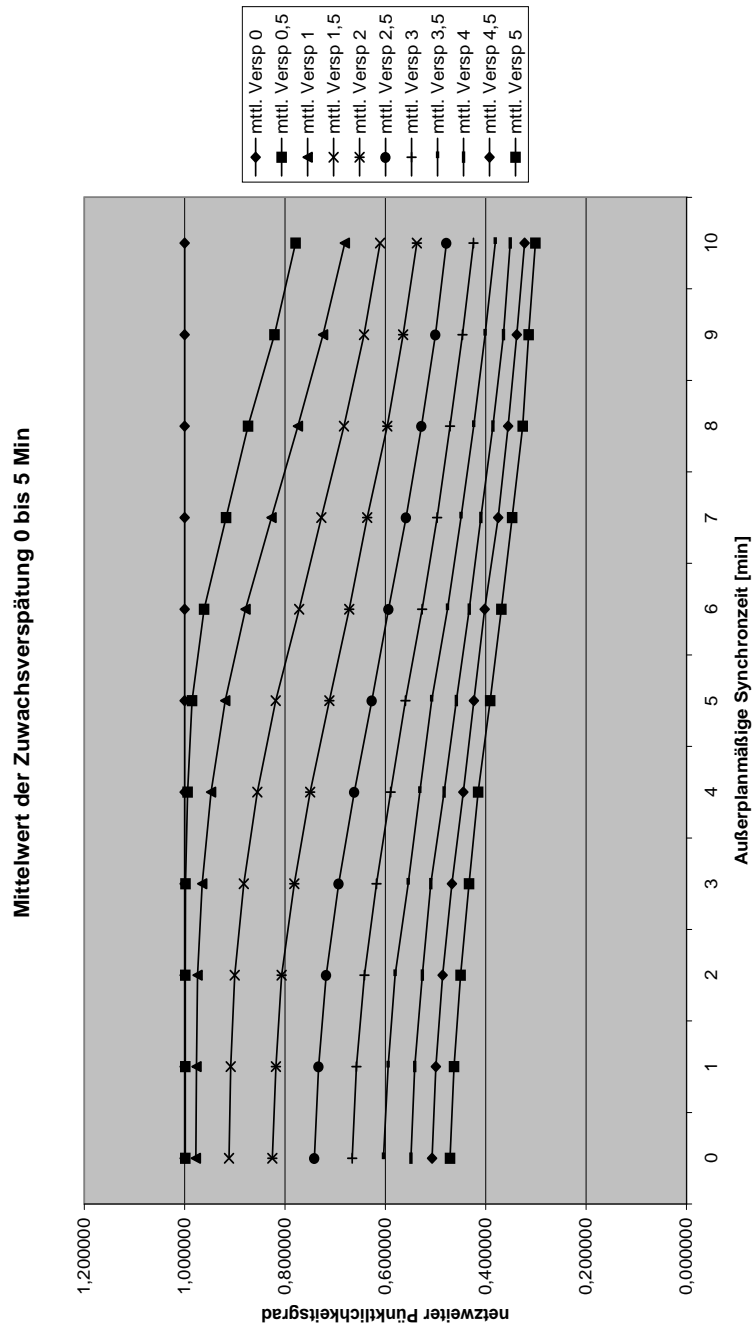


Abbildung 7.14.: Netzweiter Pünktlichkeitsgrad: Asymmetrische Synchronzeitregelung – Nahverkehr wartet auf verspäteten Fernverkehr (nicht jedoch umgekehrt), gleiche Zuggattungen warten aufeinander

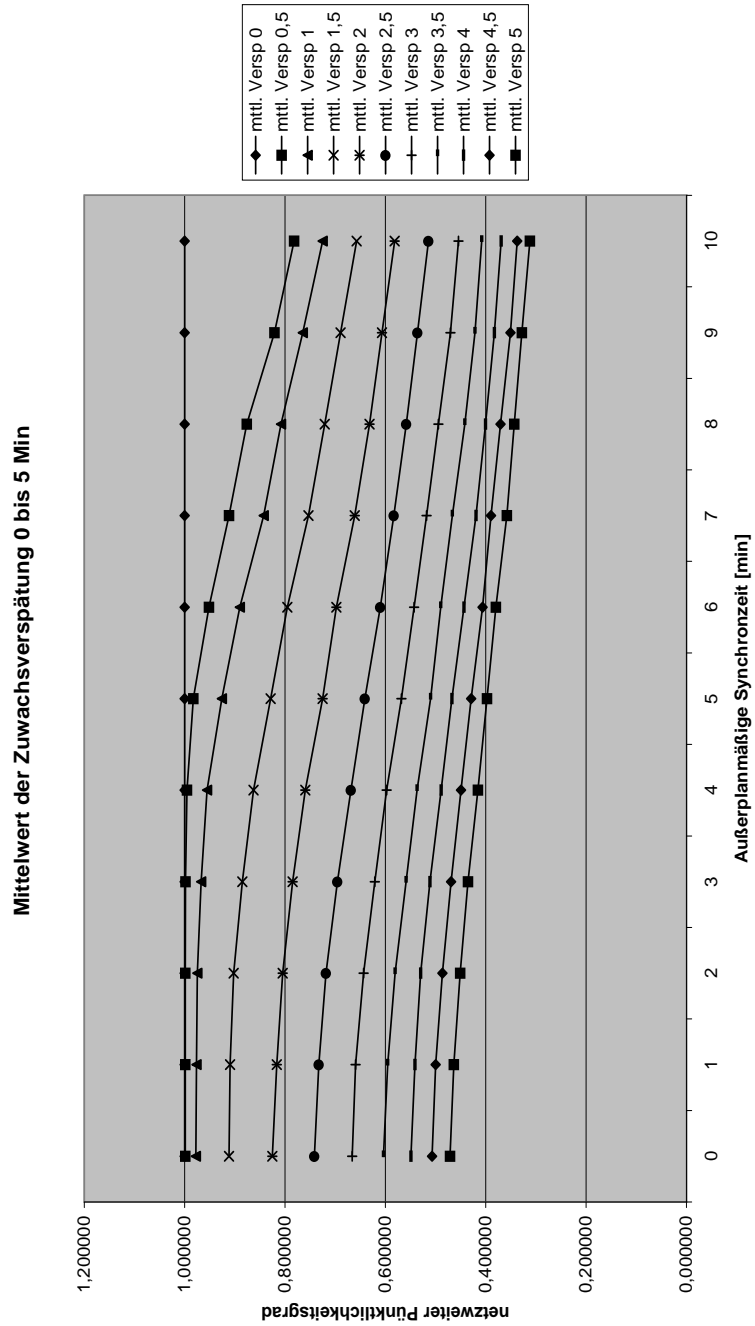


Abbildung 7.15.: Netzweiter Pünktlichkeitsgrad: Asymmetrische Synchronzeitregelung – Fernverkehr wartet auf verspäteten Nahverkehr (nicht jedoch umgekehrt), gleiche Zuggattungen warten aufeinander

Eine weitere Nebenbedingung der Optimierung liegt in der Betrachtung des netzweiten Pünktlichkeitsgrades. Die Tabellen 7.4 bis 7.6 zeigen den netzweiten Pünktlichkeitsgrad im untersuchten Liniennetz-Beispiel für die drei unterschiedlichen Synchronzeitregelungen bei den gegebenen vier Verspätungsniveaus, wenn jeweils das ermittelte Optimum für eine maximale außerplanmäßige Synchronzeit $T_{\text{Sy}_{\text{max}}}^{\text{opt}}$ Anwendung findet. Angegeben ist weiterhin der netzweite Pünktlichkeitsgrad für den Fall, daß Zugfahrten grundsätzlich keine außerplanmäßige Synchronzeit ($T_{\text{Sy}_{\text{max}}} = 0$) eingeräumt wird sowie die entsprechende Differenz des netzweiten Pünktlichkeitsgrades in Prozentpunkten. Den Abbildungen 7.13 bis 7.13 ist die Entwicklung des netzweiten Pünktlichkeitsgrades abhängig von den untersuchten Verspätungsniveaus und den untersuchten maximalen außerplanmäßigen Synchronzeiten zu entnehmen. Im Fall der symmetrischen Synchronzeitregelung, die von den drei untersuchten Problemstellungen im Liniennetz-Beispiel die günstigste Auswirkung auf die Abweichungen von netzweiten Gesamtbeförderungszeitvolumen hat, sind die Auswirkungen auf den netzweiten Pünktlichkeitsgrad vergleichsweise gering.

Dieses Ergebnis ist vergleichbar mit dem Fall einer asymmetrischen Synchronzeitregelung, bei der Fernverkehrszüge auf verspätete Nahverkehrszüge warten (nicht jedoch umgekehrt) und gleiche Zuggattungen aufeinander warten. Bei dieser Regelung hat die Anwendung der optimalen oberen Schranken für die außerplanmäßige Synchronzeit eine im Vergleich zur symmetrischen Synchronzeitregelung etwas geringere Auswirkung auf die Abweichungen von netzweiten Gesamtbeförderungszeitvolumen. Die Auswirkungen auf den Pünktlichkeitsgrad sind jedoch ebenfalls geringer.

Es kann damit für diese beiden Synchronzeitregelungen folgende grundsätzliche Abhängigkeit beobachtet werden: Je wirksamer die Synchronzeitregelung hinsichtlich der Abweichungen vom netzweiten Gesamtbeförderungszeitvolumen ist, desto ungünstiger sind die Auswirkungen auf den netzweiten Pünktlichkeitsgrad.

Problematisch erscheint eine asymmetrische Synchronzeitregelung, bei der Nahverkehrszüge auf verspätete Fernverkehrszüge warten (nicht jedoch umgekehrt) und gleiche Zuggattungen aufeinander warten. Die Wirksamkeit hinsichtlich der Abweichungen vom netzweiten Gesamtbeförderungszeitvolumen liegt deutlich unter denen der bisher diskutierten Synchronzeitregelungen. Die Auswirkungen auf den netzweiten Pünktlichkeitsgrad sind dabei vergleichsweise ungünstig (insbesondere bei $\overline{\text{ID}} = 2$ und $\overline{\text{ID}} = 2.5$). Die Ursache kann darin begründet sein, daß die gefundenen optimalen oberen Schranken für die außerplanmäßige Synchronzeit die entsprechenden Werte bei den anderen beiden Synchronzeitregelungen dominieren, also gleich groß und in mindestens einem Fall größer sind. Aus Abbildung 7.14 ist ersichtlich, daß die Auswirkungen auf den Pünktlichkeitsgrad generell umso ungünstiger sind, je größer die maximale außerplanmäßige Synchronzeit ist. Den Abbildungen 7.5 bis 7.8 und 7.14 ist allerdings zu entnehmen, daß suboptimale Werte für maximale außerplanmäßige Synchronzeiten, die kleiner sind als der gefundene optimale Wert hinsichtlich der Auswirkungen auf das netzweite Gesamtbeförderungszeitvolumen nicht wesentlich schlechter wirksam sind, dies jedoch bei weit günstigerem Einfluß auf den netzweiten Pünktlichkeitsgrad. Eine Zusammenstellung der Ergebnisse bei Anwendung solcher suboptimalen maximalen außerplanmäßigen Syn-

chronzeiten zeigt Tabelle 7.7 und Tabelle 7.8. Eine Schranke ϵ_1 , die für den netzweiten Pünktlichkeitsgrad nicht unterschritten werden soll, kann also hier recht hoch angesetzt werden, ohne daß sich dadurch die Wirksamkeit der außerplanmäßigen Synchronzeit auf das netzweite Gesamtbeförderungszeitvolumen sehr stark verschlechtert. Insgesamt ist jedoch die Wirksamkeit hinsichtlich der Abweichungen vom netzweiten Gesamtbeförderungszeitvolumen bei dieser Form der asymmetrischen Synchronzeitregelung immer noch vergleichsweise gering.

\overline{ID}	$T_{Sy_{max}}$	$t_{Bef}^{gesamt} - T_{Bef}^{gesamt}$	$t_{Bef}^{gesamt} - T_{Bef}^{gesamt}$ bei $T_{Sy_{max}} = 0$	Abw %
1	2	506 882	605 007	-16.2
1.5	1	1 493 365	1 641 002	-9.0
2	1	2 575 543	2 675 537	-3.7
2.5	1	3 684 291	3 751 427	-1.8

Tabelle 7.7.: Abweichungen der Beförderungszeitanteile: asymmetrische Synchronzeitregelung – Nahverkehr wartet auf verspäteten Fernverkehr (nicht jedoch umgekehrt), gleiche Zugattungen warten aufeinander. Suboptimale maximale außerplanmäßige Synchronzeit.

\overline{ID}	$T_{Sy_{max}}$	$d_P[in\%]$	$d_P[in\%]$ bei $T_{Sy_{max}} = 0$	Abw %-Punkte
1	2	97.5	97.8	0.3
1.5	1	91.0	91.3	0.3
2	1	82.1	82.7	0.6
2.5	1	73.5	74.2	0.7

Tabelle 7.8.: Netzweiter Pünktlichkeitsgrad in Abhängigkeit von \overline{ID} und $T_{Sy_{max}}$: asymmetrische Synchronzeitregelung – Nahverkehr wartet auf verspäteten Fernverkehr (nicht jedoch umgekehrt), gleiche Zugattungen warten aufeinander. Suboptimale maximale außerplanmäßige Synchronzeit.

Für die untersuchten, jedoch hier nicht näher erläuterten Verspätungsniveaus von $\overline{ID} = 0.5$ und $\overline{ID} = 3, \dots, 5$ Minuten lassen sich folgende Beobachtungen zusammenfassen:

- Mit zunehmendem Verspätungsniveau verläuft die Kurve „BefVolAbw“ tendenziell flacher.
- Der Wert für $T_{Sy_{max}}^{opt}$ wird mit zunehmendem Verspätungsniveau tendenziell kleiner.

Nun wird der Zusammenhang zwischen den $T_{Sy_{max}}^{opt}$ und dem Verspätungsniveau näher betrachtet. Die Abbildungen 7.16 bis 7.18 zeigen die Abhängigkeit der ermittelten optimalen maximalen außerplanmäßigen Synchronzeit vom gegebenen Verspätungsniveau.

Es ist aus den Ergebnissen der Simulation denkbar, daß ein signifikanter Zusammenhang derart besteht, daß $T_{\text{Sy}_{\text{max}}}^{\text{opt}}$ umso kleiner ist, je höher das Verspätungsniveau $\overline{\text{ID}}$ im Liniennetz ist. Es müßte in diesem Falle eine hohe negative Korrelation zwischen den jeweils ermittelten Werten für $T_{\text{Sy}_{\text{max}}}^{\text{opt}}$ und dem Verspätungsniveau $\overline{\text{ID}}$ festgestellt werden können. Mittels der Bildung von Korrelationskoeffizienten nach Bravais-Pearson⁷ für die Merkmale X (Verspätungsniveau $\overline{\text{ID}}$ im Liniennetz) und Y ($T_{\text{Sy}_{\text{max}}}^{\text{opt}}$) wird geprüft, ob eine derartige Korrelation besteht. Es zeigt sich bei symmetrischer Synchronzeitregelung ein Korrelationskoeffizient von -0.4966. Bei asymmetrischer Synchronzeitregelung entsprechend Abbildung 7.17 ergibt sich ein Korrelationskoeffizient von -0.8428. Für diese Synchronzeitregelungen ist also Zugfahrten tendenziell eine umso geringere außerplanmäßige Synchronzeit einzuräumen, je höher das Verspätungsniveau im Liniennetz-Beispiel ist. Bei asymmetrischer Synchronzeitregelung entsprechend Abbildung 7.18 ergibt sich mit einem Korrelationskoeffizienten von -0.2909 ein nicht so klares Ergebnis. Dies kann darin begründet liegen, daß bei Fernverkehrszügen aufgrund der Rangfolge der Zuggattungen bessere Möglichkeiten bestehen, auch bei hohem Verspätungsniveau eine Abfahrtverspätung wegen außerplanmäßiger Synchronzeit während der Fahrt wieder aufzuholen.⁸ Insgesamt weicht das netzweite Ist-Gesamtbeförderungszeitvolumen auch dann nicht zu stark vom netzweiten Plan-Gesamtbeförderungszeitvolumen ab, wenn bei höherem Verspätungsniveau den Fernverkehrszügen eine vergleichsweise hohe außerplanmäßige Synchronzeit eingeräumt wird.

⁷siehe dazu auch (6.11) auf Seite 129 dieser Arbeit

⁸Siehe dazu die Ausführungen im Kontext der Problemstellung nach 5.107.

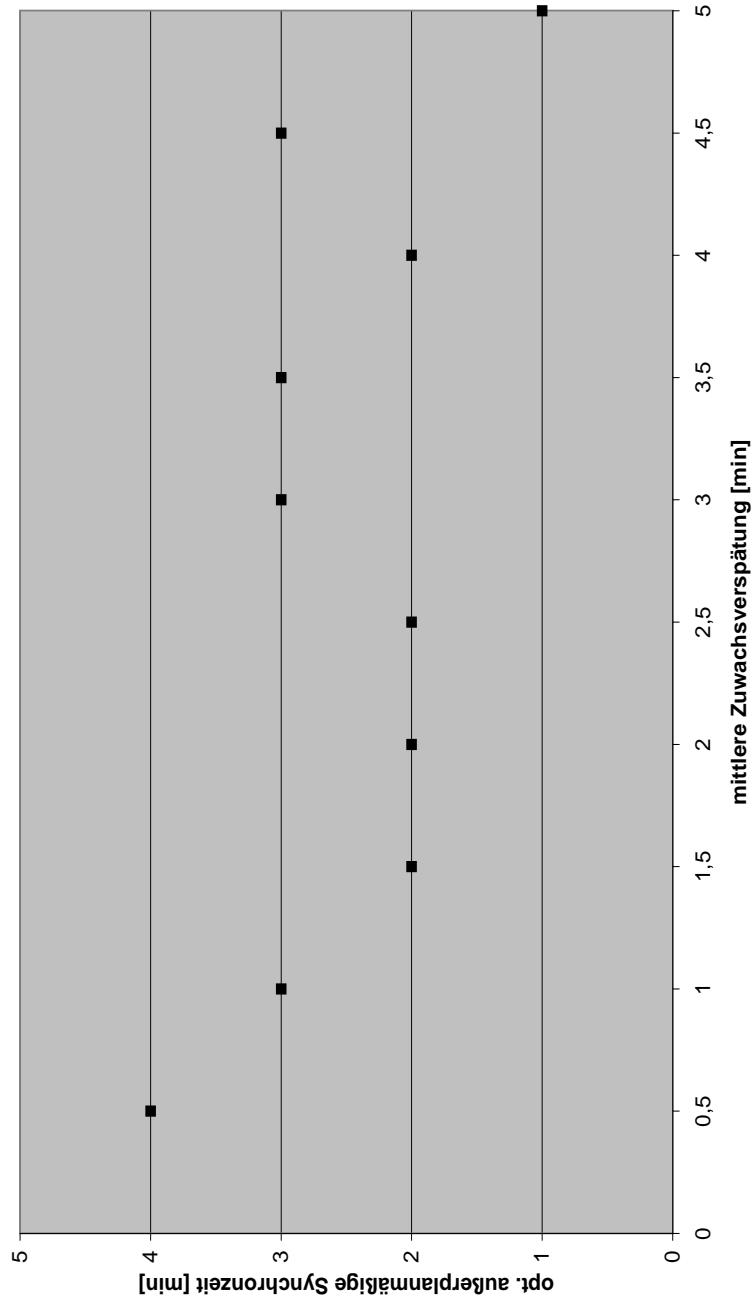


Abbildung 7.16.: Abhängigkeit der optimalen außerplanmäßigen Synchronzeit vom Verspätungsniveau: Symmetrische Synchronzeitregelung – alle Zuggattungen warten aufeinander

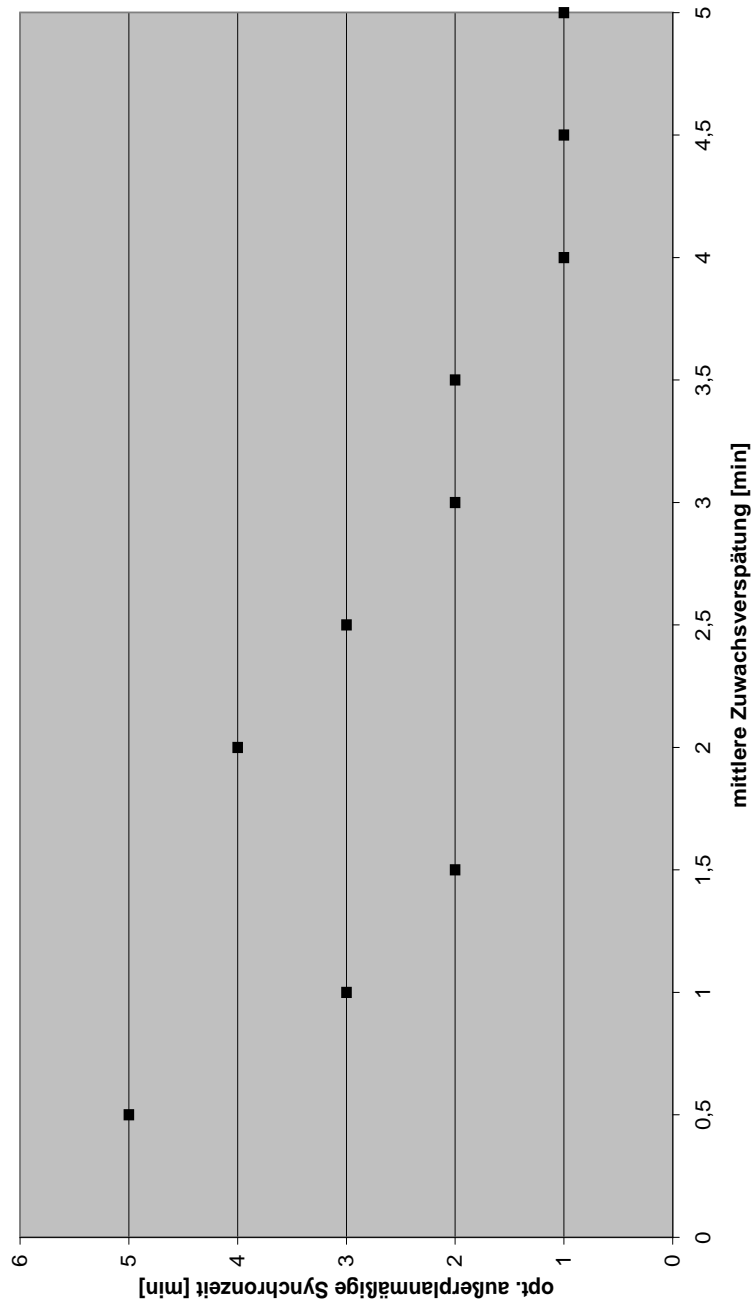


Abbildung 7.17.: Abhängigkeit der optimalen außerplanmäßigen Synchronzeit vom Verspätungsniveau: asymmetrische Synchronzeitregelung – Nahverkehr wartet auf verspäteten Fernverkehr (nicht jedoch umgekehrt), gleiche Zuggattungen warten aufeinander

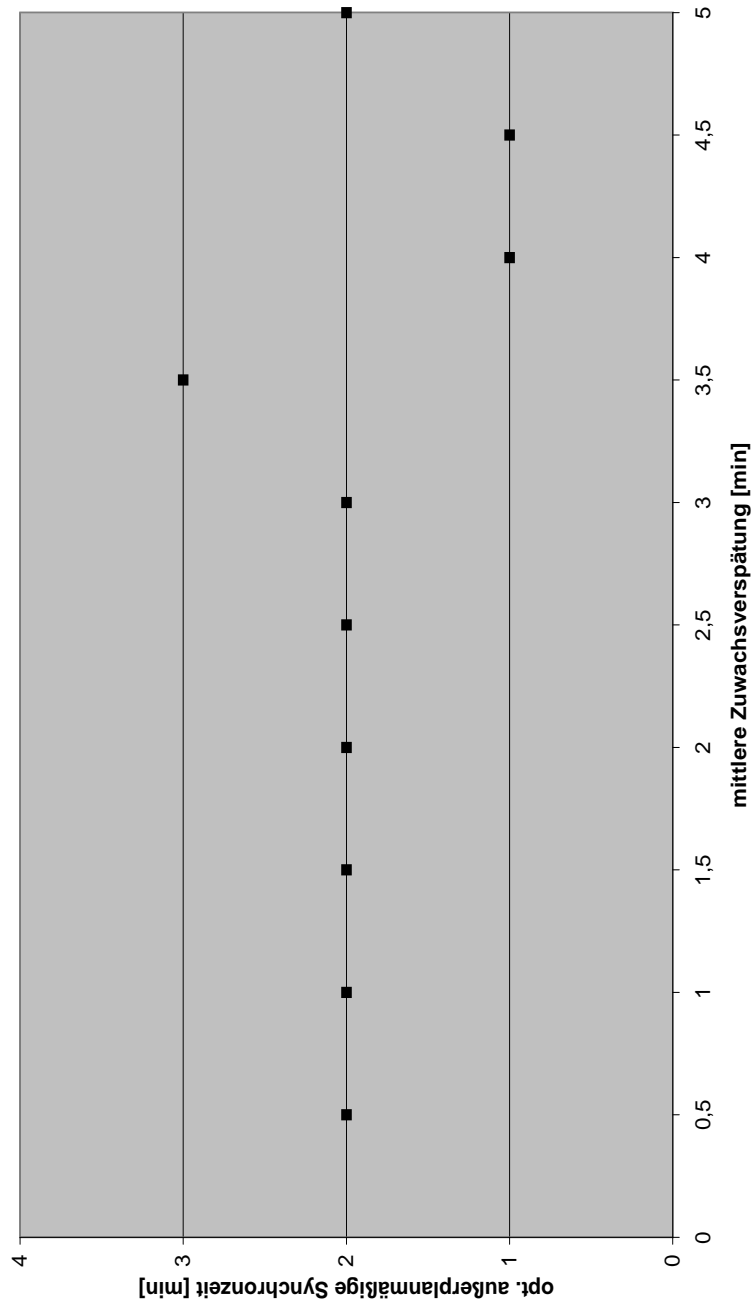


Abbildung 7.18.: Abhängigkeit der optimalen außerplanmäßigen Synchronzeit vom Verspätungsniveau: asymmetrische Synchronzeitregelung – Fernverkehr wartet auf verspäteten Nahverkehr (nicht jedoch umgekehrt), gleiche Zuggattungen warten aufeinander

8. Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde eine Möglichkeit vorgestellt, das Geschehen in einem Eisenbahn-Liniennetz, in dem alle Linien nach einem Taktfahrplan verkehren, realitätsnah zu simulieren (Kapitel 5 Modellierung und Darstellung des Systems „Eisenbahnnetz“, Kapitel 6 Simulation des Systems und Kapitel 7 Anwendung der Simulation).

Die Simulation auf Basis des vorgestellten Modells ermöglicht es, die Disposition von Zugfahrten (dispositive Ebene der hierarchischen Verkehrsplanung) und die Linienplanung (strategische Ebene der hierarchischen Verkehrsplanung) hinsichtlich einer Regelung für die Gewährung außerplanmäßiger Synchronzeiten zu erleichtern. In das Simulationsmodell fließen reale Gegebenheiten wie beispielsweise unterschiedliche Zugkategorien, je nach Tageszeit unterschiedliche Zugauslastungen sowie das Auftreten von Zuwachsverspätungen ein. Daher sind die Ergebnisse, die durch die Simulation auf der Basis eines realen Liniennetz-Beispiels ermittelt werden, durchaus wirklichkeitsnah. Die Ergebnisse der Simulation

- liefern Aussagen zur Höhe optimaler Obergrenzen für die Gewährung außerplanmäßiger Synchronzeiten bei einem gegebenen Verspätungsniveau in einem Liniennetz,
- liefern Aussagen zum Zusammenhang zwischen der Anwendung außerplanmäßiger Synchronzeiten und der Abweichung des Ist-Gesamtbeförderungszeitvolumens vom Plan-Gesamtbeförderungszeitvolumen bei einem gegebenen Verspätungsniveau in einem Liniennetz,
- weisen auf die Auswirkungen hin, die unterschiedliche Regelungen für die Gewährung außerplanmäßiger Synchronzeiten auf das netzweite Ist-Gesamtbeförderungszeitvolumen und den Pünktlichkeitsgrad haben.

Dennoch ist es bei den genannten Aspekten der hierarchischen Verkehrsplanung erforderlich, Erfahrung und Fachwissen der beteiligten Verkehrsplaner und des Personals, das mit der Durchführung des Eisenbahnbetriebes betraut ist, zu nutzen, denn die Simulation berücksichtigt zwar für die Problemstellung der vorliegenden Arbeit wesentliche Elemente des realen Betriebsgeschehens in einem Liniennetz des Eisenbahn-Personenverkehrs, jedoch liegt der Simulation ein vereinfachtes Abbild der Realität zugrunde, das die realen Verhältnisse nur näherungsweise erfasst. Kapitel 4 dieser Arbeit zeigt ausgewählte

Problemstellungen zu Einzelaspekten des Verkehrsplanungsprozesses im Eisenbahnverkehr. Bereits hier wird die Komplexität deutlich, die der Planung und der Durchführung des Verkehrsgeschehens eigen ist. Alle Vorgänge und Ereignisse darzustellen und in ein Simulationsmodell einfließen zu lassen, die in der Realität des Eisenbahnbetriebes stattfinden, erscheint nicht realisierbar. Dies zeigen schon die folgenden Beispiele: In dem Modell wurden außerplanmäßige Wartezeiten nicht berücksichtigt. Grundsätzlich kann dies aber auch in eine Simulation des Betriebsgeschehens eingebunden werden. Dazu muß dann festgestellt werden, ob es zum vorgesehenen Abfahrtszeitpunkt eines Zuges zu Streckenbelegungskonflikten mit anderen Zugfahrten kommt. Das bedeutet jedoch:

- Für jeden Bahnhof und den folgenden Streckenabschnitt müssen sämtliche Ausfahrmöglichkeiten abgebildet werden. Dies erfordert die Einbeziehung genauer Gleispläne der Bahnhöfe und der Strecken zwischen den Bahnhöfen.
- Es müssen weit mehr Zugfahrten im simulierten System berücksichtigt werden, weil zusätzlich zu den Reisezugfahrten auch Rangierfahrten und Zugfahrten des Güterverkehrs Streckenbelegungskonflikte verursachen können.

Dies hat zur Folge, daß für ein zu untersuchendes Netz die Streckeninfrastruktur und die Soll- sowie die Ist-Fahrpläne aller relevanten Zugfahrten einbezogen werden müssen. Die Datenmenge wird dadurch schnell so groß, daß es schwierig sein dürfte, Netze realistischen Ausmaßes zu untersuchen. Hinzu kommt noch, daß der Vergleich mehrerer Zugfahrtdaten untereinander zu sehr vielen Kombinationsmöglichkeiten führt, was die Problematik der zu verarbeitenden Datenmenge noch zusätzlich verschärft.

Der Belastungssimulation liegt ein bestimmtes Verkehrsnachfragemodell zugrunde. Eine genauere Parametrisierung der Betriebssimulation mit Verkehrsnachfragedaten könnte erfolgen, wenn statt der Daten aus dem Verkehrsnachfragemodell empirisch festgestellte Daten der Verkehrsnachfrage verwendet werden könnten, die zudem wöchentliche und saisonale Schwankungen der Verkehrsnachfrage einbeziehen. Entsprechende Daten standen jedoch bei der Fertigstellung dieser Arbeit nicht zur Verfügung. Wenn solche Daten bereitstehen, ist es vergleichsweise unproblematisch, diese in der Simulation zu berücksichtigen. Das Modell der Betriebssimulation läßt dies konzeptionell zu.

Verschiedene Gegebenheiten, die im realen Verkehrsgeschehen in einem Eisenbahn-Liniennetz auftreten, sind derzeit im Modell nicht oder nur indirekt berücksichtigt. Dazu zählen beispielsweise Strecken- und Bahnhofsbaustellen, unterschiedliche Witterungsverhältnisse, außerplanmäßige Umleitungen von Zugfahrten, so daß vorübergehend andere Bahnhöfe angefahren werden, und der Zugverkehr auf Linien ohne Taktfahrplan. Dennoch ist es mit dem hier vorgestellten Simulationsmodell gelungen, wesentliche Aspekte des Reiseverkehrs in einem Eisenbahn-Liniennetz abzubilden und damit Lösungsmöglichkeiten für die Problemstellung dieser Arbeit aufzuzeigen. Die in Kapitel 7 präsentierten Ergebnisse zeigen, daß die Auswahl einer sinnvollen Regelung für die Gewährung außerplanmäßiger Synchronzeiten geeignet ist, die Beförderungsqualität in einem derartigen

Netz positiv zu beeinflussen, ohne daß es dadurch zu wesentlichen Beeinträchtigungen des Pünktlichkeitsgrades kommen muß.

A. Anhang

A.1. Verzeichnis der Symbole

A.1.1. Streckennetz und Liniennetz

Symbol	Erläuterung
\mathcal{L}	Menge der Linien des Netzes
$\mathcal{L}_{\text{Fern}}$	Menge der Fernverkehrslinien des Netzes
\mathcal{L}_{Nah}	Menge der Nahverkehrslinien des Netzes
\mathcal{S}	Menge der Bahnhöfe des Netzes
$l_{\text{max}} = \mathcal{L} $	Anzahl der Linien des Netzes
$s_{\text{max}} = \mathcal{S} $	Anzahl der Bahnhöfe des Netzes
L_l	Linie Nr. l
S_i	Bahnhof Nr. i
$S_{l,i}$	Der i -te Bahnhof der Linie L_l beginnend am Anfangsbahnhof $S_{l,1}$ dieser Linie
G_S	Graph des Streckennetzes
G_L	Graph des Liniennetzes
G_R	Graph der Reiseverbindungen
Bf_l	Anzahl der Bahnhöfe, die Linie L_l miteinander verbindet
Z_l	Menge der Zugfahrten der Linie L_l
$Z_{\text{fmax},l}$	Anzahl der Zugfahrten, die in einem Betrachtungszeitraum (z.B. an einem Betriebstag) auf der Linie L_l verkehren
\mathcal{L}_i	Menge aller Linien, die Bahnhof S_i enthalten

A.1.2. Soll-Fahrplan

Symbol	Erläuterung
$T_{\Pi,l}$	Taktzeit der Linie L_l
$T_{0,l}$	Abfahrtszeit der ersten Zugfahrt der Linie L_l an ihrem Anfangsbahnhof
$T_{M\ddot{U}Z,s}$	Mindestübergangszeit an Bahnhof S_s
$T_{F_{rein},z,l,s}$	reine Fahrzeit einer Zugfahrt z der Linie L_l vom $(s-1)$ -ten Bahnhof zum s -ten Bahnhof dieser Linie
T_{Zuschl}	Regelzuschlag für den Ausgleich geringfügiger Fahrzeitüberschreitungen. Prozentsatz der reinen Fahrzeit.
E_{rs}	Entfernung zwischen dem r -ten und dem s -ten Bahnhof der Linie L_l , gemessen in der planmäßigen Beförderungszeit zwischen beiden Bahnhöfen
$T_{B,z,l,s}$	planmäßige Beförderungszeit des Zuges Nr. z der Linie L_l vom Anfangsbahnhof dieser Linie bis zum s -ten Bahnhof dieser Linie
$T_{F,z,l,s}$	Mindestbeförderungszeit des Zuges Nr. z der Linie L_l für die Fahrt auf der Strecke vom $(s-1)$ -ten zum s -ten Bahnhof dieser Linie (eventuelle Betriebshaltezeiten zwischen diesen beiden Bahnhöfen sind darin enthalten)
$T_{An,z,l,s}$	planmäßiger Ankunftszeitpunkt des Zuges Nr. z der Linie L_l am s -ten Bahnhof dieser Linie
$T_{Ab,z,l,s}$	planmäßiger Abfahrtzeitpunkt des Zuges Nr. z der Linie L_l am s -ten Bahnhof dieser Linie
$T_{Ab^*,z,l,s}$	frühestmöglicher Abfahrtzeitpunkt des Zuges Nr. z der Linie L_l am s -ten Bahnhof dieser Linie nach dem Zeitpunkt der planmäßigen Ankunftszeit und dem Ablauf der Mindesthaltezeit
$T_{Um,z,l \rightarrow m,s}$	planmäßige Umsteigezeit für das Umsteigen von Zug Nr. z der Linie L_l auf den nächsten planmäßigen Anschlußzug der Linie L_m am s -ten Bahnhof der Linie L_l
$T_{H,z,l,s}$	planmäßige Haltezeit des Zuges Nr. z der Linie L_l am s -ten Bahnhof dieser Linie. Diese enthält die Betriebs- und Verkehrshaltezeit, Sonder- und Regelzuschläge für die Haltezeit, die planmäßige Wartezeit infolge belastungsabhängiger Behinderung sowie die planmäßige Synchronzeit.
$T_{H_{min},z,l,s}$	Mindesthaltezeit des Zuges Nr. z auf Linie L_l am s -ten Bahnhof dieser Linie.

Symbol	Erläuterung
$T_{H_{\min},s}$	Mindesthaltezeit an Bahnhof S_s , die für alle dort haltenden Züge gleich sei
$T_{Sy,z,l,s}$	planmäßige Synchronzeit des anschlußaufnehmenden Zuges Nr. z der Linie L_l am s -ten Bahnhof dieser Linie
$T_{W,z,l,s}$	planmäßige Wartezeit des Zuges Nr. z der Linie L_l am s -ten Bahnhof dieser Linie
z^*	Zugnummer desjenigen Zuges, mit dem die Reisenden gemäß Reisefahrplan ihre Reise nach dem Umsteigen fortsetzen sollen

A.1.3. Ist-Fahrplan

Symbol	Erläuterung
$t_{B,z,l,s}$	realisierte Beförderungszeit des Zuges Nr. z der Linie L_l vom Anfangsbahnhof dieser Linie bis zum s -ten Bahnhof dieser Linie
$t_{B,z,l}$	die tatsächliche Beförderungszeit des Zuges z auf Linie L_l , die seit der Abfahrt dieses Zuges am Anfangsbahnhof dieser Linie bis zum gegenwärtigen Simulationszeitpunkt realisiert wurde
$t_{F,z,l,s}$	realisierte Beförderungszeit des Zuges Nr. z der Linie L_l für die Fahrt auf der Strecke vom $(s-1)$ -ten zum s -ten Bahnhof dieser Linie (eventuelle Betriebshaltezeiten zwischen diesen beiden Bahnhöfen sind darin enthalten)
$t_{F,z,l,s}^{\text{rest}}$	Die bis zum Erreichen des nächsten Haltebahnhofes einer Zugfahrt z (das sei der s -te Bahnhof der Linie L_l) tatsächlich noch verbleibende Beförderungszeit
$t_{An,z,l,s}$	realisierter Ankunftszeitpunkt des Zuges Nr. z der Linie L_l am s -ten Bahnhof dieser Linie
$t_{Ab,z,l,s}$	realisierter Abfahrtszeitpunkt des Zuges Nr. z der Linie L_l am s -ten Bahnhof dieser Linie
$t_{Ab^*,z,l,s}$	frühestmöglicher Abfahrtszeitpunkt des Zuges Nr. z der Linie L_l am s -ten Bahnhof dieser Linie nach dem Zeitpunkt der tatsächlichen Ankunftszeit und dem Ablauf der Mindesthaltezeit, frühestens ist dies die planmäßige Abfahrtszeit
$t_{Um,z,l \rightarrow m,s}$	realisierte Umsteigezeit für das Umsteigen von Zug Nr. z der Linie L_l auf den nächsten erreichbaren Anschlußzug der Linie L_m am s -ten Bahnhof der Linie L_l
$t_{Um,z,l \rightarrow m,s}^{\text{rest}}$	Zeit in Minuten, die umsteigenden Reisenden bis zur planmäßigen Abfahrt ihres Anschlußzuges der Linie L_m noch auf dem Umsteigebahnhof verbleibt
$t_{ID,z,l,s}$	Zuwachsverspätung (incremental delay), die bei Zug Nr. z auf der Linie L_l bei seiner Fahrt auf der Strecke vom $(s-1)$ -ten zum s -ten Bahnhof dieser Linie auftritt
$t_{AD,z,l,s}$	Ankunftsverspätung (arrival delay) des Zuges Nr. z auf Linie L_l bei seiner Ankunft am s -ten Bahnhof dieser Linie
$t_{DD,z,l,s}$	Abfahrtsverspätung (departure delay) des Zuges Nr. z auf Linie L_l bei seiner Abfahrt vom s -ten Bahnhof dieser Linie
$t_{Sy,z,l,s}$	außerplanmäßige Synchronzeit des anschlußaufnehmenden Zuges Nr. z der Linie L_l am s -ten Bahnhof dieser Linie

Symbol	Erläuterung
$T_{\text{Sy}_{\max}, l \rightarrow m}$	maximale außerplanmäßige Synchronzeit eines Zuges der Linie L_m um Anschlußreisende der Linie L_l aufzunehmen
$T_{\text{Sy}_{\max}}^{\text{opt}}$	Optimum für die maximale außerplanmäßige Synchronzeit
$t_{\text{H}, z, l, s}$	realisierte Haltezeit des Zuges Nr. z der Linie L_l am s -ten Bahnhof dieser Linie. Diese enthält die Mindesthaltezeit und die außerplanmäßige Synchronzeit. Nicht berücksichtigt werden außerplanmäßige Wartezeiten aufgrund belastungsabhängiger Behinderungen.
$t_{\text{H}, z, l, s}^{\text{rest}}$	diejenige Zeit, die einem Zug z der Linie L_l am s -ten Bahnhof dieser Linie noch bis zu seiner tatsächlichen Abfahrt verbleibt

A.1.4. Reisendenströme

Symbol	Erläuterung
B_{li}	Einwohnerzahl im Einzugsbereich des i -ten Bahnhofes einer Linie L_l
E_{ijk}	Widerstandsfaktor für die Verkehrsnachfrage zwischen den Orten i und j mit Verkehrsmittel k
V_{ijk}	gesamte Verkehrsnachfrage in beiden Richtungen zwischen Ort i und Ort j (mit $i \neq j$) mit Verkehrsmittel k
C	Konstanter Multiplikator für die Bestimmung der Verkehrsnachfrage zwischen zwei Orten mittels des Gravitationsgesetzes
μ_{vorm}	Zeitpunkt des ersten Maximums der Verkehrsnachfrage an einem Tag
μ_{nachm}	Zeitpunkt des zweiten Maximums der Verkehrsnachfrage an einem Tag
σ_{vorm}	Standardabweichung der Verkehrsnachfrage vom Zeitpunkt des ersten Maximums der Verkehrsnachfrage an einem Tag
σ_{nachm}	Standardabweichung der Verkehrsnachfrage vom Zeitpunkt des zweiten Maximums der Verkehrsnachfrage an einem Tag
DF_{lrs}	Anzahl der Reisenden, die an einem Betriebstag insgesamt auf Linie L_l vom r -ten Bahnhof bis zum s -ten Bahnhof dieser Linie fahren, ohne dabei den Zug (z.B. zum Umsteigen oder zur Reiseunterbrechung) zu verlassen. Enthält <i>nicht</i> die Anzahl derjenigen Reisenden, die nach einem Umsteigevorgang diesem Zug zugestiegen sind.
DF_{lzrs}	Anzahl der Reisenden, die auf Linie L_l mit Zug Nr. z vom r -ten Bahnhof bis zum s -ten Bahnhof dieser Linie fahren, ohne dabei den Zug (z.B. zum Umsteigen oder zur Reiseunterbrechung) zu verlassen. Enthält <i>nicht</i> die Anzahl derjenigen Reisenden, die nach einem Umsteigevorgang diesem Zug zugestiegen sind.
$R_{Uman,z,l \rightarrow m,s}$	Anzahl der Reisenden, die bei planmäßigem Betrieb im s -ten Bahnhof der Linie L_m aus Linie L_l in den Zug Nr. z der Linie L_m umsteigen (aufnehmende Perspektive der Umsteiger)
$r_{Uman,z,l \rightarrow m,s}$	Anzahl der Reisenden, die bei realisiertem Betrieb im s -ten Bahnhof der Linie L_m aus Linie L_l in den Zug Nr. z der Linie L_m umsteigen (aufnehmende Perspektive der Umsteiger)

A. Anhang

Symbol	Erläuterung
$R_{\text{Umab},z,l \rightarrow m,s}$	Anzahl der Reisenden, die bei planmäßigem Betrieb im s -ten Bahnhof der Linie L_l den Zug Nr. z dieser Linie verlassen, um auf den nächsten planmäßigen Anschlußzug der Linie L_m umzusteigen (abgebende Perspektive der Umsteiger)
$r_{\text{Umab},z,l \rightarrow m,s}$	Anzahl der Reisenden, die bei realisiertem Betrieb im s -ten Bahnhof der Linie L_l den Zug Nr. z aus Linie L_l in den Zug Nr. z dieser Linie verlassen, um auf den nächsten erreichbaren Anschlußzug der Linie L_m umzusteigen (abgebende Perspektive der Umsteiger)
$R_{\% \text{Um},z,l \rightarrow m,s}$	durchschnittlicher prozentualer Anteil der auf Linie L_l mit Zug Nr. z bei planmäßigem Betrieb am s -ten Bahnhof der Linie L_l eintreffenden Direktfahrer, die auf den nächsten planmäßigen Anschlußzug der Linie L_m umsteigen
$R_{\text{Aus},z,l,s}$	Anzahl der Reisenden, die bei planmäßigem Betrieb am s -ten Bahnhof der Linie L_l aus dem Zug Nr. z dieser Linie aussteigen, um an diesem Bahnhof (Zielbahnhof) eine Reise zu beenden
$r_{\text{Aus},z,l,s}$	Anzahl der Reisenden, die bei realisiertem Betrieb am s -ten Bahnhof der Linie L_l aus dem Zug Nr. z dieser Linie aussteigen, um an diesem Bahnhof (Zielbahnhof) eine Reise zu beenden
$R_{\text{Durch},z,l,s}$	Anzahl der Reisenden, die bei planmäßigem Betrieb am s -ten Bahnhof der Linie L_l im Zug Nr. z dieser Linie verbleiben, um ihre Reise fortzusetzen (Durchfahrer)
$r_{\text{Durch},z,l,s}$	Anzahl der Reisenden, die bei realisiertem Betrieb am s -ten Bahnhof der Linie L_l im Zug Nr. z dieser Linie verbleiben, um ihre Reise fortzusetzen (Durchfahrer)
$ZA_{z,l,s}$	Plan-Auslastung des Zuges Nr. z der Linie L_l bei der planmäßigen Fahrt vom $(s - 1)$ -ten bis zum s -ten Bahnhof dieser Linie
$za_{z,l,s}$	Ist-Auslastung des Zuges Nr. z der Linie L_l bei der planmäßigen Fahrt vom $(s - 1)$ -ten bis zum s -ten Bahnhof dieser Linie

A.1.5. Kennzahlen und Parameter der Simulation

Symbol	Erläuterung
$T_{\text{Bef}}^{\text{gesamt}}$	netzweites Gesamtbeförderungszeitvolumen bei planmäßigem Betrieb
$T_{\text{F}}^{\text{gesamt}}$	netzweites Gesamtfahrzeitvolumen bei planmäßigem Betrieb
$T_{\text{Um}}^{\text{gesamt}}$	netzweites Gesamtumsteigezeitvolumen bei planmäßigem Betrieb
$T_{\text{Durch}}^{\text{gesamt}}$	netzweites Gesamthaltezeitvolumen bei planmäßigem Betrieb
$t_{\text{Bef}}^{\text{gesamt}}$	netzweites Gesamtbeförderungszeitvolumen bei realisiertem Betrieb
$t_{\text{F}}^{\text{gesamt}}$	netzweites Gesamtfahrzeitvolumen bei realisiertem Betrieb
$t_{\text{Um}}^{\text{gesamt}}$	netzweites Gesamtumsteigezeitvolumen bei realisiertem Betrieb
$t_{\text{Durch}}^{\text{gesamt}}$	netzweites Gesamthaltezeitvolumen bei realisiertem Betrieb
$t_{\text{Sy}}^{\text{gesamt}}$	netzweites Gesamtvolumen der außerplanmäßigen Synchronzeiten
$t_{\text{AD}}^{\text{gesamt}}$	netzweites Gesamtvolumen der Ankunftsverspätungen
$t_{\text{DD}}^{\text{gesamt}}$	netzweites Gesamtvolumen der Abfahrtverspätungen
$t_{\text{AD},z,l,s}^{\text{pers}}$	Ankunftsverspätungsvolumen in Personenminuten als Produkt der Ankunftsverspätung des Zuges z der Linie L_l am s -ten Bahnhof dieser Linie und der entsprechenden Ist-Zugauslastung
$t_{\text{DD},z,l,s}^{\text{pers}}$	Abfahrtverspätungsvolumen in Personenminuten als Produkt der Abfahrtverspätung des Zuges Nr. z auf Linie L_l bei seiner Abfahrt vom s -ten Bahnhof dieser Linie und der Ist-Zugauslastung des Zuges Nr. z der Linie L_l bei der planmäßigen Fahrt vom s -ten bis zum $s + 1$ -ten Bahnhof dieser Linie
$T_{\text{F},z,l,s}^{\text{pers}}$	Plan-Fahrzeitvolumen in Personenminuten als Produkt der Mindestfahrzeit des Zuges Nr. z der Linie L_l für die Fahrt auf der Strecke vom $(s - 1)$ -ten zum s -ten Bahnhof dieser Linie und der entsprechenden Plan-Zugauslastung
$t_{\text{F},z,l,s}^{\text{pers}}$	Ist-Fahrzeitvolumen in Personenminuten als Produkt der realisierten Beförderungszeit des Zuges Nr. z der Linie L_l für die Fahrt auf der Strecke vom $(s - 1)$ -ten zum s -ten Bahnhof dieser Linie und der entsprechenden Ist-Zugauslastung
$T_{\text{H},z,l,s}^{\text{pers}}$	Plan-Haltezeitvolumen in Personenminuten als Produkt der planmäßigen Haltezeit des Zuges Nr. z der Linie L_l am s -ten Bahnhof dieser Linie und der Anzahl der Reisenden, die bei planmäßigem Betrieb am s -ten Bahnhof der Linie L_l im Zug Nr. z dieser Linie verbleiben wollen, um ihre Reise fortzusetzen (Plan-Durchfahrer)

Symbol	Erläuterung
$t_{H,z,l,s}^{\text{pers}}$	Ist-Haltezeitvolumen in Personenminuten als Produkt der tatsächlichen Haltezeit des Zuges Nr. z der Linie L_l am s -ten Bahnhof dieser Linie und der Anzahl der Reisenden, die tatsächlich am s -ten Bahnhof der Linie L_l im Zug Nr. z dieser Linie verbleiben, um ihre Reise fortzusetzen (Ist-Durchfahrer)
$T_{Um,z,c \rightarrow l,s}^{\text{pers}}$	Plan-Umsteigezeitvolumen in Personenminuten als Produkt der Plan-Umsteigezeit und der Anzahl der Reisenden, die bei planmäßigem Betrieb im s -ten Bahnhof der Linie L_l aus Linie L_c in den Zug Nr. z der Linie L_l umsteigen
$t_{Um,z,c \rightarrow l,s}^{\text{pers}}$	Ist-Umsteigezeitvolumen in Personenminuten als Produkt der Ist-Umsteigezeit und der Anzahl der Reisenden, die bei realisiertem Betrieb im s -ten Bahnhof der Linie L_l aus Linie L_c in den Zug Nr. z der Linie L_l umsteigen
$t_{Sy,z,l,s}^{\text{pers}}$	Synchronzeitvolumen in Personenminuten als Produkt der außerplanmäßigen Synchronzeit des anschlussaufnehmenden Zuges Nr. z der Linie L_l am s -ten Bahnhof dieser Linie und der Anzahl der Reisenden, die tatsächlich am s -ten Bahnhof der Linie L_l im Zug Nr. z dieser Linie verbleiben, um ihre Reise fortzusetzen (Ist-Durchfahrer)
$\overline{ID}_{\text{Nah}}$	mittlere Zuwachsverspätung aller Nahverkehrszüge mit positiver Zuwachsverspätung im Netz
$\overline{ID}_{\text{Fern}}$	mittlere Zuwachsverspätung aller Fernverkehrszüge mit positiver Zuwachsverspätung im Netz
\overline{ID}	mittlere Zuwachsverspätung aller Züge mit positiver Zuwachsverspätung im Netz (Verspätungsniveau)
D_P	Schwellwert zur Bestimmung des Pünktlichkeitsgrades
$d_{P,l,s}$	Pünktlichkeitsgrad aller Zugfahrten der Linie L_l , die in einem bestimmten Zeitraum am s -ten Bahnhof dieser Linie ankommen
$d_{P,s}$	Pünktlichkeitsgrad aller Zugfahrten aller Linien, die in einem bestimmten Zeitraum am Bahnhof S_s ankommen
d_P	Pünktlichkeitsgrad aller Zugfahrten aller Linien an allen Bahnhöfen im Netz in einem bestimmten Zeitraum
d_D	Verspätungsgrad aller Zugfahrten aller Linien an allen Bahnhöfen im Netz in einem bestimmten Zeitraum

A.1.6. Parametrisierung und Ablauf der Simulation

Symbol	Erläuterung
M_{Bahn}	durchschnittlicher Marktanteil der Eisenbahn an Personenverkehrsleistungen
Zf_{Sim}	Anteil der Zugfahrten des zu untersuchenden Realsystems, der in der Simulation abgebildet wird
$t_{\text{Sim}}^{\text{max}}$	Simulationszeitraum, angegeben in der Anzahl durchzuführender Simulationsschritte
t_{Sim}	Anzahl der bis zum gegenwärtigen Simulationszeitpunkt durchlaufenen Simulationsschritte
$t_{\text{Sim}}^{\text{Tag}}$	Anzahl der Simulationsschritte seit dem Beginn eines neuen Betriebstages (Mitternacht)
Z	Menge derjenigen Zugfahrten, die in einem Simulationsschritt $t_{\text{Sim}}^{\text{Tag}}$ im simulierten Eisenbahnnetz „unterwegs“ sind

A.2. Zuggattungen der Deutschen Bahn AG

A.2.1. Zuggattungen des Fernverkehrs der Deutschen Bahn AG

Bezeichnung	Verkehrsaufgabe, Eigenschaften
Intercity-Express (ICE)	Hochgeschwindigkeitsreisezug, der ausgewählte große Städte miteinander verbindet, Taktbetrieb der Linien.
Eurocity (EC)	Reisezüge europäischer Eisenbahnen mit international festgelegtem Standard. Sie verbinden große Städte auf internationalen Linien miteinander. Innerhalb Deutschlands sind EC-Linien Teil der IC-Linien. Taktbetrieb der Linien.
Intercity (IC)	Reisezüge, die alle großen Städte miteinander verbinden, Taktbetrieb der Linien.
Interregio (IR)	Reisezüge, die regionale Zentren und ländliche Gebiete miteinander und mit Bahnhöfen des ICE- und IC/EC-Liniennetzes verbinden, Taktbetrieb der Linien.
Schnellzug (D)	Fernreisezüge, die hinsichtlich der Komfortmerkmale und der Verkehrsaufgaben nicht den festgelegten Standards der übrigen Zuggattungen des Fernverkehrs entsprechen. Ihre Verkehrsaufgaben sind verschiedenartig und umfassen ein Spektrum vom nationalen und internationalen Nachtreiseverkehr bis zu Aufgaben der Zuggattung Regionalexpress.
Intercity Night (ICN)	Nachtreisezüge mit hotelähnlichem Komfort, die auf ausgewählten Strecken verkehren.
Euronight (EN)	Nachtreisezüge europäischer Eisenbahnen mit international festgelegtem Standard. Sie verbinden ausgewählte europäische Großstädte über Nacht.

A.2.2. Zuggattungen des Nahverkehrs der Deutschen Bahn AG

Bezeichnung	Verkehrsaufgabe, Eigenschaften
S-Bahn (S)	Nahverkehrsreisezüge für den verdichteten Verkehr mit kurzen Taktzeiten und kleinem räumlichen Haltestellenabstand innerhalb städtischer Ballungsräume.
Stadtxpress (SE)	Nahverkehrsreisezüge, die große Städte mit ihrem Umland verbinden. Züge der Gattung SE verkehren in den Pendler-einzugsbereichen großer Städte. Innerhalb des S-Bahn-Netzes einer Stadt halten Züge nur an ausgewählten Bahnhöfen, außerhalb des S-Bahn-Netzes halten die Züge an jedem Bahnhof.
Regionalbahn (RB)	Nahverkehrsreisezüge, die Verbindungen zwischen regionalen Orten, auch Dörfern, innerhalb ländlicher Gebiete gewährleisten und eine Zubringerfunktion zur Zuggattung Regionalexpress übernehmen. Die Züge halten in der Regel auf allen Bahnhöfen.
Regionalexpress (RE)	Nahverkehrsreisezüge, die große Städte mit ihrem erweiterten Umland verbinden. Die Linien umfassen in der Regel größere Entfernungen, und der Haltestellenabstand ist größer als beim Stadtxpress. Linienlänge, Haltestellenabstand und Reisegeschwindigkeit sind jedoch geringer als bei der Zuggattung Interregio.

Literaturverzeichnis

- [Abr93] ABRAMSON, DAVID: *Parallelisation of a Genetic Algorithm for the Computation of Efficient Train Schedules*. In *Proceedings of 1993 Parallel Computing and Transputers Conference*, Brisbane, 1993. IOS Press.
- [Adl90] ADLER, GERHARD (Herausgeber): *Lexikon der Eisenbahn*. Motorbuch Verlag, Stuttgart, 1990.
- [AEG93] *Allgemeines Eisenbahngesetz (AEG)*. BGBl. I S. 2378, 2396, ber. 2439, Dezember 1993.
- [Bär96] BÄR, MATTHIAS: *Konflikte im Eisenbahnbetrieb – Versuch einer Systematisierung*. In HERTEL, GÜNTER (Herausgeber): *2. Eisenbahnbetriebswissenschaftliches Kolloquium*, Band 2 der Reihe *Schriftenreihe des Instituts für Verkehrssystemtheorie und Bahnverkehr*, Seiten 138–149. Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“, Institut für Verkehrssystemtheorie und Bahnverkehr, Technische Universität Dresden, 1996.
- [BDD72] BATTELLE-INSTITUT E.V., DEUTSCHE REVISIONS- UND TREUHAND-AG und DORNIER-SYSTEM GMBH: *Die Beurteilung von Investitionen im Fernreiseverkehr der Deutschen Bundesbahn und im Luftverkehr der Bundesrepublik Deutschland bis 1980 auf der Grundlage der Kosten-Nutzen-Analyse*. Technischer Bericht 40, Bundesministerium für Verkehr, 1972.
- [Bey80] BEYERSDORFF, ROLF: *Die rechnerunterstützte Zugüberwachung*. Eisenbahntechnische Rundschau, 29(11):769–772, 1980.
- [BGZ78] BEYER, OTFRIED, HANS J. GIRLICH und HANS U. ZSCHIESCHE: *Stochastische Prozesse und Modelle*, Band 19/1 der Reihe *Mathematik für Ingenieure, Naturwissenschaftler, Ökonomen und sonstige anwendungsorientierte Berufe*. Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt a.M., 1978.
- [BH86] BRUCKER, P. und J. HURINK: *A Railway Scheduling Problem*. Zeitschrift für Operation Research, 30:A 223–A 227, 1986.

- [BKZ95] BUSSIECK, MICHAEL R., PETER KREUZER und UWE T. ZIMMERMANN: *Optimal Lines for Railway Systems*. Technischer Bericht, TU Braunschweig, Abteilung für Mathematische Optimierung, Nov. 1995.
- [BO94] BOUMA, ALBERT und CHRISTINE OLTROGGE: *Linienplanung und Simulation für öffentliche Verkehrswege in Praxis und Theorie*. Eisenbahntechnische Rundschau, 43(6):369, 1994.
- [Bön84] BÖNSCH, KARLHEINZ: *Verkehrsgeographie*, Band Personenverkehr. Eisenbahn-Fachverlag, Heidelberg, Mainz, 1984.
- [Bön94] BÖNSCH, KARLHEINZ: *Verkehrsgeographie*, Band Personenverkehr. Eisenbahn-Fachverlag, Heidelberg, Mainz, 3 Auflage, 1994.
- [Bra93] BRAKER, JOHANNES GARRELT: *Algorithms and Applications in Timed Discrete Event Systems*. Dissertation, Technische Universität Delft, 1993.
- [Bre85] BREIMEIER, RUDOLF: *Der Einfluß des Faktors 'Zeit' auf den Personenverkehr der Eisenbahn*. Eisenbahntechnische Rundschau, 34(10):747, 1985.
- [Bre91] BREIMEIER, RUDOLF: *Zeit ist Geld - auch im Personenverkehr der Eisenbahnen*. Die Bundesbahn, 67(9):883, 1991.
- [Bro92] BROWN ET AL., DONALD E.: *Rail Network Routing and Scheduling Using Simulated Annealing*. In *IEEE Intern. Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, Seiten 589–592, 1992.
- [Bru76] BRUCKER, PETER: *Die Komplexität von Scheduling Problemen*. In *Proceedings in Operations Research*, Band 5, Seiten 357–368, 1976.
- [Bus95] BUSSIECK ET AL., MICHAEL R.: *Linienoptimierung – Modellierung und praktischer Einsatz*. Technischer Bericht, TU Braunschweig, Abteilung für Mathematische Optimierung, 1995.
- [Car94] CAREY, MALACHY: *Reliability of interconnected scheduled services*. European Journal of Operations Research, 79:51–72, 1994.
- [CG94] CAI, X. und C.J. GOH: *A fast heuristic for the train scheduling problem*. Computers & Operations Research, 21(5):499–510, 1994.
- [Chr96] CHRISTIANY, LUDWIG: *Wartezeitregelungen und Vormeldungen im Personenverkehr*. Deine Bahn, 24(10):608–611, 1996.
- [CK95] CAREY, MALACHY und ANDRZEJ KWIECIŃSKI: *Properties of expected costs and performance measures in stochastic models of scheduled transport*. European Journal of Operations Research, 83:182–199, 1995.

- [DB95] DADUNA, JOACHIM R. und ISABEL BRANCO ET AL. (Herausgeber): *Computer-Aided Transit Scheduling*, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. Springer, 1995.
- [Deu44] DEUTSCHE REICHSBAHN, Leipzig: *Der Bildfahrplan*, 1944.
- [Deu87a] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V., Berlin: *DIN 69 900: Netzplantechnik*, August 1987.
- [Deu87b] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V., Berlin: *DIN 69 901: Projektmanagement*, August 1987.
- [Deu94a] DEUTSCHE BAHN AG: *Daten und Fakten 1994/95*, 1994.
- [Deu94b] DEUTSCHE BAHN AG: *Geschäftsbericht*, 1994.
- [Deu95a] DEUTSCHE BAHN AG: *Signalbuch (SB) DS 301*, Dezember 1995.
- [Deu95b] DEUTSCHE BAHN AG, GESCHÄFTSBEREICH FERNVERKEHR, Mainz: *Elektronisches Kursbuch 1995/96*, 1995.
- [Deu95c] DEUTSCHE BAHN AG, GESCHÄFTSBEREICH FERNVERKEHR: *Wartezeiten und Vormeldungen (WZVR); Fahrplanabschnitt 1995/96*. Zusatz zur Vorschrift 420.0005.91, Sep. 1995.
- [Deu96a] DEUTSCHE BAHN AG, GESCHÄFTSBEREICH FERNVERKEHR, Mainz: *Kursbuch 1996*, 1996.
- [Deu96b] DEUTSCHE BAHN AG, GESCHÄFTSBEREICH FERNVERKEHR, Mainz: *Übersichtskarte für den Personenverkehr*, 1996.
- [Deu96c] DEUTSCHE BAHN AG, GESCHÄFTSBEREICH FERNVERKEHR, Berlin: *Zugverzeichnis 1996, Ausgabe Sommer*, 1996.
- [Deu96d] DEUTSCHER BUNDESTAG: *Verspätungen im Personennahverkehr der Deutschen Bahn AG*. Drucksache 13/3921, Feb. 1996.
- [Deu97] DEUTSCHE BAHN AG, GESCHÄFTSBEREICH FERNVERKEHR, Mainz: *Kursbuch 1997/98*, 1997.
- [Die77] DIEDERICH, HELMUT: *Verkehrsbetriebslehre*. Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler, Wiesbaden, 1977.
- [Die79] DIENST, H.: *Ein Modell zur Linienplanung im spurgeführten Personenverkehr*. In *Proceedings in Operations Research*, Band 8, 1979.

- [Dir77] DIRMEIER, WALTER: *Die Durchführung des Taktfahrplans in Eisenbahnknotenpunkten*. Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, 1977.
- [Dom89] DOMSCHKE, W.: *Schedule Synchronisation for Public Transit Networks*. OR Spektrum, 11(1):17–24, 1989.
- [DR84] DANOS, MICHAEL und JOHANN RAFELSKI (Herausgeber): *Pocketbook of mathematical functions*. Verlag Harri Deutsch, Thun, 1984.
- [EBO67] *Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO)*. BGBl. II S. 1563, Mai 1967.
- [EGGS83] EISSMANN, ARNDT, GÜNTHER GEISSLER, KARL-HEINZ GIESE und MATTHIAS SCHUMANN: *Aufenthaltszeiten für die Konstruktion der Taktintervallmodelle des Taktfahrplans*. Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Verkehrswesen „Friedrich List“ Dresden, 30(1):153–160, 1983.
- [Eng73] ENGEL, ARTHUR: *Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik*, Band 1 der Reihe *Klett Studienbücher*. Ernst Klett, Stuttgart, 1973.
- [ETR96] *Betriebsführung: Schnelle Computerprogramme sagen Zugverspätungen den Kampf an*. Eisenbahntechnische Rundschau, 45(4):222, 1996.
- [FM95] FISCHER, KLAUS und H. JÜRGEN MÜLLER: *Cooperative Problem Solving in the Transportations Domain*. In *Operations Research Proceedings*, Seiten 179–184, Berlin, 1995. Springer.
- [FS92] FRANKEN, ROLF und LEENA SUHL: *Methoden der Planungsunterstützung in der Produktionswirtschaft - Dargestellt am Beispiel der Deutschen Lufthansa AG*. In *Operations Research Proceedings 1991*, Berlin u.a., 1992. Springer.
- [FS96] FEBBRARO, ANGELA DI und SIMONA SACONE: *Modelling and Performance Analysis of Urban Transportation Networks*. In BIANCO, LUCIO und PAOLO TOTH (Herausgeber): *Advanced Methods in Transportation Analysis*, Seiten 93–116. Springer-Verlag, 1996.
- [Gal92] GAL, THOMAS (Herausgeber): *Grundlagen des Operations Research, Band II: Graphen und Netzwerke, Netzplantechnik, Transportprobleme, ganzzahlige Optimierung*. Springer-Verlag, 1992.
- [Göb93] GÖBERTSHAHN, RUDOLF: *Der Integrale Taktfahrplan*. Die Deutsche Bahn, 69(5):357–370, 1993.
- [Gra92] GRAFBERGER, WALTER: *Der Öffentliche Personennahverkehr – Aufgabe, Organisation und verkehrsgewerberechtlicher Rahmen*. Dissertation, Juristische Fakultät der Friedrich-Alexander-Universität, Erlangen-Nürnberg, 1992.

- [Gre95] GREISTORFER, PETER: *Computational Experiments with Heuristics for a Capacitated Routing Problem*. In *Operations Research Proceedings 1994*, Berlin, 1995. Springer. 185-190.
- [Här94] HÄRTEL, FRANK: *Zufallszahlen für Simulationsmodelle*. Dissertation, Hochschule St. Gallen für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften, 1994.
- [Hei79] HEISTER, GERT: *Gesetzmäßigkeiten von Zugverspätungen*. Archiv für Eisenbahntechnik, 34:53–58, 1979.
- [HEK86] HARTUNG, JOACHIM, BÄRBEL ELPELT und KARL-HEINZ KLÖSENER: *Statistik*. Oldenbourg Verlag, München, Wien, 5. Auflage, 1986.
- [Her77] HERETH, KLAUS ULRICH: *Die Übergangszeit bei Zuganschlüssen, ein wichtiges Element bei der Konstruktion des Personenzugfahrplanes*. Die Bundesbahn, 53(6):407, 1977.
- [Her92a] HERTEL, GÜNTER: *Die maximale Verkehrsleistung und die minimale Fahrplanempfindlichkeit auf Eisenbahnstrecken*. Eisenbahntechnische Rundschau, 41(10):665, 1992.
- [Her92b] HERTEL, GÜNTER: *Eine neue Philosophie der Fahrzeitberechnung für Züge*. Internationales Verkehrswesen, 42:104, 1992.
- [Her95a] HERTEL, GÜNTER (Herausgeber): *1. Eisenbahnbetriebswissenschaftliches Kolloquium*, Band 1 der Reihe *Schriftenreihe des Instituts für Verkehrssystemtheorie und Bahnverkehr*. Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“, Institut für Verkehrssystemtheorie und Bahnverkehr, Technische Universität Dresden, 1995.
- [Her95b] HERTEL, GÜNTER: *Leistungsfähigkeit und Leistungsverhalten von Eisenbahnbetriebsanlagen – Modelle und Berechnungsmöglichkeiten*. In HERTEL, GÜNTER (Herausgeber): *1. Eisenbahnbetriebswissenschaftliches Kolloquium*, Band 1 der Reihe *Schriftenreihe des Instituts für Verkehrssystemtheorie und Bahnverkehr*, Seiten 62–104. Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“, Institut für Verkehrssystemtheorie und Bahnverkehr, Technische Universität Dresden, 1995.
- [Her96] HERTEL, GÜNTER (Herausgeber): *2. Eisenbahnbetriebswissenschaftliches Kolloquium*, Band 2 der Reihe *Schriftenreihe des Instituts für Verkehrssystemtheorie und Bahnverkehr*. Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“, Institut für Verkehrssystemtheorie und Bahnverkehr, Technische Universität Dresden, 1996.

- [HH87] HOLZ, SIEGFRIED und ROLF HÜTTMANN: *Optimierung von Anschlußzeiten*. Der Nahverkehr, 5(4):32–38, 1987.
- [HH96] HOLZBORN, INGEBORG und KLAUS D. HOLZBORN: *Kleine Typenkunde deutscher Triebfahrzeuge*. Transpress, Berlin, 1996.
- [HK96] HERTEL, GÜNTER und WOLFGANG KÖLBEL: *Wartezeiten als wesentliche Qualitätsparameter der Beförderungsleistungen*. In HERTEL, GÜNTER (Herausgeber): *2. Eisenbahnbetriebswissenschaftliches Kolloquium*, Band 2 der Reihe *Schriftenreihe des Instituts für Verkehrssystemtheorie und Bahnverkehr*, Seiten 52–64. Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“, Institut für Verkehrssystemtheorie und Bahnverkehr, Technische Universität Dresden, 1996.
- [HS92] HERTEL, GÜNTER und JENS STECKEL: *Fahrzeitberechnung unter stochastischem Aspekt*. Der Eisenbahningenieur, 43(5):304, 1992.
- [HS93] HAYN, HANS-GERD und GUNTRAM SENNER: *Zugfahrtrechnung - Stand und Möglichkeiten*. Die Deutsche Bahn, 69(11):781, 1993.
- [Ian94] IANIGRO, STEFANO: *Ein Modell zur Simulation eines innerstädtischen Verkehrsablaufes und zur Steuerung von Lichtsignalanlagen mittels Petri-Netzen unter Berücksichtigung der Grünen Welle*. Dissertation, Universität der Bundeswehr Hamburg, 1994.
- [IN84] ITAKURA, HIDEKIYO und YOSHIKAZU NISHIKAWA: *Fuzzy Network Technique for Technological Forecasting*. Fuzzy Sets and Systems, 14:99–113, 1984.
- [Jel75] JELASKA, MIROSLAV: *Computer elaboration of time-table for single railway line*. In *Proc. 7th IFIP Conference*, Seiten 657–675, 1975.
- [JG95a] JENTSCH, EBERHARD und OLAF GRÖPLER: *Innovation der methodischen Basis für Fahrzeitermittlungen und ihre Anwendung bei der Zugfahrtsimulation*. In HERTEL, GÜNTER (Herausgeber): *1. Eisenbahnbetriebswissenschaftliches Kolloquium*, Band 1 der Reihe *Schriftenreihe des Instituts für Verkehrssystemtheorie und Bahnverkehr*, Seiten 14–36. Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“, Institut für Verkehrssystemtheorie und Bahnverkehr, Technische Universität Dresden, 1995.
- [JG95b] JENTSCH, EBERHARD und OLAF GRÖPLER: *Stochastische Zugfahrtsimulation – Zusammenhänge und Anwendungsmöglichkeiten*. In HERTEL, GÜNTER (Herausgeber): *2. Eisenbahnbetriebswissenschaftliches Kolloquium*, Band 2 der Reihe *Schriftenreihe des Instituts für Verkehrssystemtheorie und Bahnverkehr*, Seiten 154–171. Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“, Institut für Verkehrssystemtheorie und Bahnverkehr, Technische Universität Dresden, 1995.

- [Jun70] JUNGINGER, WERNER: *Über die Lösung des dreidimensionalen Transportproblems*. Dissertation, Universität Stuttgart, 1970.
- [Jun74] JUNGINGER, WERNER: *Netzplantechnik*. Manuskript, 1974.
- [Kla92a] KLAHN, VOLKER: *Die betriebliche Simulation von Eisenbahnstrecken*. Eisenbahntechnische Rundschau, 1992.
- [Kla92b] KLAHN, VOLKER: *Graphentheoretische Grundlagen zur Abbildung großer Eisenbahnbereiche*. Eisenbahntechnische Rundschau, 41(10):659, 1992.
- [KLS75] KÜPPER, WILLI, KLAUS LÜDER und LOTHAR STREITFERDT: *Netzplantechnik*. Physica-Verlag, Würzburg - Wien, 1975.
- [Knu98] KNUTH, DONALD E.: *The art of computer programming*, Band 2. Addison Wesley Longman, 3. Auflage, 1998.
- [KNV96] KOLONKO, MICHAEL, KARL NACHTIGALL und STEFAN VOGET: *Optimierung von integralen Taktfahrplänen mit genetischen Algorithmen*. Hildesheimer Informatikberichte 8, Universität Hildesheim, März 1996.
- [Kop89] KOPKA, HELMUT: *L^AT_EX: eine Einführung*. Addison-Wesley, Bonn u.a., 2. Auflage, 1989.
- [Kri96] KRISTA, MATTHIAS: *Verfahren zur Fahrplanoptimierung dargestellt am Beispiel der Synchronzeiten*. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1996.
- [KS76] KÖNIG, DIETER und DIETRICH STOYAN: *Methoden der Bedienungstheorie*. Vieweg, Braunschweig, 1976.
- [KW87] KANNENGIESSER, FRED und BODO WICHE: *Einfluß der Fahrzeitzuschläge und Pufferzeiten auf die Pünktlichkeit*. Die Bundesbahn, 63(11):1001–1007, 1987.
- [LCD92] LARDINOIS, CHRISTIAN, TEODOR G. CRAINIC und JOHANNE DION: *An Interactive Graphic Approach for the Integrated Design of Intercity Transportation Timetables and Vehicle Operations*. Computers & OR, 19(2):139–149, 1992.
- [Lic91] LICHTENEGGER, MICHAEL: *Der integrierte Taktfahrplan*. Eisenbahntechnische Rundschau, 40(3), 1991.
- [Lie70] LIEBLING, THOMAS M.: *Graphentheorie in Planungs- und Tourenproblemen*, Band 21 der Reihe *Lecture Notes in Operations Research and Mathematical Systems*. Springer, Berlin, 1970.

- [LOBW84] LINDNER, HANS-RAINER, HORST OVERRATH, ROLF BÜRGER und GERHARD WEISS: *Der Fahrplan - allgemeines Basiswissen und Grundsätze*. DB-Fachbuch, Heidelberg, Mainz, 12 1984.
- [LWV79] LASCHET, WILHELM, HERMANN WITTE und FRITZ VOIGT: *Ansätze zu einer optimalen Strecken- und Netzplanung der Deutschen Bundesbahn – Dargestellt am Beispiel Nordrhein-Westfalen*. Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen 2851, Institut für Industrie- und Verkehrspolitik der Universität Bonn, Opladen, 1979.
- [Man79] MANDL, CHRISTOPH E.: *Evaluation and Optimization of Urban Public Transportation Networks*. Institutsarbeit 107, Institut für höhere Studien, Wien, Wien, März 1979.
- [MBG⁺85] MENZER, ERHARD, ROBERT BICHOEL, WERNER GEORGE, JOACHIM KLÜGEL, SIEGFRIED LORENZ, HANS-JOACHIM SPINDLER und RUDOLF TIETZE: *Transporttechnologie Eisenbahn*, Band 1. transpress Verlag für Verkehrswesen, Berlin, 1985.
- [Men91] MENG, YONGXIN: *Bemessung von Pufferzeiten in Anschlüssen von Reisezügen*, Band 46. Verkehrswissenschaftliches Institut der Rhein.-Westf. Technischen Hochschule Aachen, Aachen, 1991.
- [Mey86] MEYER, KARLHEINZ: *Personenbeförderungsrecht*. Beck'sche Gesetzestexte mit Erläuterungen. Beck, München, 1986.
- [Mos87] MOSLER, KARL C.: *Continuous Location of Transportation Networks*. Springer, Berlin, 1987.
- [Müh90] MÜHLHANS, EDMUND: *Berechnung der Verspätungsentwicklung bei Zugfahrten*. Eisenbahntechnische Rundschau, 39(7/8):465–468, 1990.
- [Nac95] NACHTIGALL, KARL: *Time depending shortest-path problems with applications to railway networks*. European Journal of Operational Research, 83:154–166, 1995.
- [Nen80] NENG, BRUNO: *Zur Erstellung von optimalen Triebfahrzeuglaufplänen*. Report 80-17, Mathematisches Institut, Universität zu Köln, Köln, 1980.
- [Neu74] NEUMANN, KLAUS: *Ein neues Verfahren zur Auswertung von Entscheidungsnetzplänen*. In GESSNER ET AL., P. (Herausgeber): *Proceedings in Operations Research 3 – Vorträge der Jahrestagung 1973 DGOR*, Seiten 153–166, Würzburg, Wien, 1974. Physica.
- [Neu75] NEUMANN, KLAUS: *Operations Research Verfahren, Band III: Graphentheorie, Netzplantechnik*. Carl Hanser Verlag, 1975.

- [NM93] NEUMANN, KLAUS und MARTIN MORLOCK: *Operations Research*. Carl Hanser Verlag, 1993.
- [NS79] NEUMANN, KLAUS und ULRICH STEINHARDT: *GERT Networks and the Time-Oriented Evaluation of Projects*. Springer-Verlag, Berlin u.a., 1979.
- [NV95a] NACHTIGALL, KARL und STEFAN VOGET: *Optimierung von periodischen Netzplänen mit genetischen Algorithmen*. Hildesheimer Informatikberichte 1, Universität Hildesheim, Januar 1995.
- [NV95b] NACHTIGALL, KARL und STEFAN VOGET: *Optimization of the integrated fixed interval timetable*. Hildesheimer Informatikberichte 20, Universität Hildesheim, Juli 1995.
- [NV96] NACHTIGALL, KARL und STEFAN VOGET: *A Genetic Algorithm Approach to Periodic Railway Synchronization*. Computers and Operations Research, 23, 1996.
- [Pac99] PACHL, JÖRN: *Systemtechnik des Schienenverkehrs*. Teubner, Stuttgart, Leipzig, 1999.
- [Pag91] PAGE, BERND: *Diskrete Simulation*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1991.
- [PB70] PRITSKER, A. ALAN B. und ROLAND R. BURGESS: *The GERT Simulation Programs: GERTS III, GERTS IIIQ, GERTS IIIC, GERTS IIIR*. Virginia Polytechnic Institute, 1970.
- [Pet74] PETERS, H.-J.: *Beitrag zum Netzumlauf von Flugzeugen und zur Wirtschaftlichkeit des Flugbetriebs*. Forschungsbericht 74-25, Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt, Stuttgart, 1974.
- [PH66] PRITSKER, A. ALAN B. und W. WILLIAM HAPP: *GERT: Graphical Evaluation and Review Technique, Part1: Fundamentals*. Journal of industrial engineering, 17(5):267–274, 1966.
- [PI69] PRITSKER, A. ALAN B. und PHILLIP C. ISHMAEL: *GERT Simulation Program II (GERTS II)*, June 1969.
- [Pir49] PIRATH, CARL: *Die Grundlagen der Verkehrswirtschaft*. Springer-Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1949.
- [PM81] PETERSEN, E.R. und R. MERCHANT: *Scheduling of Trains in a Linear Railway System*. INFOR, 19(3):246–258, Aug. 1981.
- [Pöp95] PÖPPE, CHRISTOPH: *Fahrplan-Algebra*. Spektrum der Wissenschaft, Seiten 20–24, Nov. 1995.

- [Pri71a] PRITSKER, A. ALAN B.: *New GERT Concepts and a GERT Network Simulation Program*. Technischer Bericht, School of Industrial Engineering, Purdue University, Lafayette, Indiana, May 1971.
- [Pri71b] PRITSKER, A. ALAN B.: *Precedence GERT*. Technischer Bericht, School of Industrial Engineering, Purdue University, Lafayette, Indiana, December 1971.
- [PW66] PRITSKER, A. ALAN B. und GARY E. WHITEHOUSE: *GERT: Graphical Evaluation and Review Technique, Part2: Probabilistic and Industrial Engineering Applications*. Journal of industrial engineering, 17(6):293–301, 1966.
- [PZ78] PIEHLER, JOACHIM und H.-U. ZSCHIESCHE: *Simulationsmethoden*, Band 20 der Reihe *Mathematik für Ingenieure, Naturwissenschaftler, Ökonomen und sonstige anwendungsorientierte Berufe*. Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt a.M., 1978.
- [Rab91] RABETGE, CHRISTIAN: *Fuzzy Sets in der Netzplantechnik*. Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden, 1991.
- [Rei95] REINHOLZ, ANDREAS: *Genetische Algorithmen: Transportoptimierung und Tourenplanung für ein zentrales Auslieferungsdepot*. Der GMD-Spiegel, 25:20–24, 1995.
- [RL97] ROSEMARIE LEHMANN, WOLF-DIETER WIELAND: *Reisezüge disponieren und Wartezeitregelungen*. BahnPraxis (Ausgabe Betriebsdienst), Seiten 77, 79, 1997.
- [Rüg91] RÜGER, SIEGFRIED: *Anwendung mathematischer Methoden zum Festlegen der Linienführung und zum Gestalten von Fahr- und Dienstplänen im städtischen öffentlichen Nahverkehr*. 1991.
- [Run96] RUNGE, WOLF-RÜDIGER: *Was kann die Bahn auf den Strecken wirklich leisten?* Eisenbahntechnische Rundschau, 45(3):127–135, 1996.
- [Sac70] SACHS, HORST: *Einführung in die Theorie der endlichen Graphen*, Band 43 der Reihe *Mathematisch-Naturwissenschaftliche Bibliothek*. Teubner Verlagsgesellschaft, 1970.
- [Sar82] SARIN, SUBHASH C.: *Scheduling Independent Projects Against a Single Resource*. Int. J. Prod. Res., 20(2):135–146, 1982.
- [Sch74] SCHWANHÄUSSER, WULF: *Die Bemessung der Pufferzeiten im Fahrplangefüge der Eisenbahn*. Fakultät für Bauwesen Rhein.-Westf. Techn. Hochschule Aachen, Aachen, 1974.

- [Sch93] SCHULZ, ANDREAS: *Der „Allgäu-Schwaben-Takt“*. Die Deutsche Bahn, Seiten 363–370, 1993.
- [Sch94] SCHWANHÄUSSER, W.: *Eisenbahnbetriebliches Gutachten zum Streckenabschnitt Hamburg-Harburg – Lüneburg*. Aachen, 1994.
- [Sch95a] SCHÖBEL, ANITA: *Fair Zone Design in Public Transportation Networks*. In *Operations Research Proceedings 1994*, Seiten 191–196, Berlin, 1995. Springer.
- [Sch95b] SCHÜTZE, PETER: *Qualität der Fahrgastbedienung im ÖPNV – Wie sie gemessen werden kann*. In *Operations Research Proceedings 1994*, Seiten 197–202, Berlin, 1995. Springer.
- [SK98] SCHADER, MARTIN und STEFAN KUHLINS: *Programmieren in C++*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 5. Auflage, 1998.
- [SL76] SCHMITZ, NORBERT und FRITZ LEHMANN: *Monte-Carlo-Methoden I – Erzeugen und Testen von Zufallszahlen*, Band 28 der Reihe *Mathematical Systems in Economics*. Verlag Anton Hain, Meisenheim am Glan, 1976.
- [Son78] SONNTAG, H.: *Linienplanung im öffentlichen Personennahverkehr*. In *Proceedings in Operations Research*, Band 7, Seiten 430–449, 1978.
- [SPS93] SPSS INC.: *SPSS for UNIX – Base System User’s Guide – Release 5.0*. Chicago, Il., 1993.
- [SR96] SCHADER, MARTIN und MICHAEL RUNDSHAGEN: *Objektorientierte Systemanalyse*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2. Auflage, 1996.
- [Sta98] STATISTISCHES BUNDESAMT: *Statistisches Jahrbuch für die Bundesrepublik Deutschland*. Technischer Bericht, Statistisches Bundesamt, 1998.
- [Str96] STRUBE, ECKHARD: *Die Durchlaufzeit im Beförderungsprozeß der Eisenbahn*. In HERTEL, GÜNTER (Herausgeber): *2. Eisenbahnbetriebswissenschaftliches Kolloquium*, Band 2 der Reihe *Schriftenreihe des Instituts für Verkehrssystemtheorie und Bahnverkehr*, Seiten 82–104. Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“, Institut für Verkehrssystemtheorie und Bahnverkehr, Technische Universität Dresden, 1996.
- [SU89] SERAFINI, PAOLO und WALTER UKOVICH: *A Mathematical Model for Scheduling Problems*. *SIAM Journal on Discrete Mathematics*, 2(4):550–581, 1989.
- [Suc97] SUCKER, MIRKO: *Erstellen einer Simulationssoftware zur Reisezeitoptimierung*. Diplomarbeit, Universität der Bundeswehr Hamburg, 1997.
- [teu97] *Zu teuer in den Guten Abend*. *test*, 32(8):79–81, 1997.

- [Tho78] THOMSON, J. MICHAEL: *Grundlagen der Verkehrspolitik*. Nummer 754 in *Uni-Taschenbücher*. Verlag Paul Haupt, Bern, Stuttgart, 1978.
- [Ueb70] UEBE, GÖTZ: *Optimale Fahrpläne*, Band 20 der Reihe *Lecture Notes in Operations Research and Mathematical Systems*. Springer, Berlin, 1970.
- [ver97] *Zu spät in die Zukunft*. test, 32(8):82–84, 1997.
- [Vog95] VOGET, STEFAN: *Aspekte genetischer Optimierungsalgorithmen: mathematische Modellierung und Einsatz in der Fahrplanerstellung*. Dissertation, Universität Hildesheim, 1995.
- [Voi73] VOIGT, FRITZ: *Verkehr*, Band 1. Duncker & Humblot, Berlin, 1973.
- [Völ71] VÖLZGEN, HUBERT: *Stochastische Netzwerkverfahren und deren Anwendungen*. Walter de Gruyter, 1971.
- [Voß93] VOSS, STEFAN: *Intelligent Search*. Technische Hochschule Darmstadt, 1993.
- [Wed69] WEDEKIND, HARTMUT: *Eine Methode zur Bestimmung des optimalen Einsatzplanes für Verkehrsmittel*. Ablauf- und Planungsforschung, 10(3):397–406, 1969.
- [Weg74] WEGEL, HELMUT: *Fahrplangestaltung für taktbetriebene Nahverkehrsnetze*. Dissertation, Fakultät für Bauwesen der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 1974.
- [Wei80] WEIGAND, WERNER: *Planungshilfe für Betriebsleitsysteme in zeitunabhängigen Verkehrsnetzen*. In *Operations Research Proceedings*, Seiten 366–371, Berlin, 1980. Springer.
- [Wei81] WEIGAND, WERNER: *Graphentheoretisches Verfahren zur Fahrplangestaltung in Transportnetzen unter Berücksichtigung von Pufferzeiten mittels interaktiver Rechentchnik*. Dissertation, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 1981.
- [Wei99] WEIGER, UWE: *Der Bahnstandsstandort – ein Optimierungsfeld*. Eisenbahntechnische Rundschau, 48(4):223–229, 1999.
- [Wie79] WIEGAND, KLAUS: *Gesetzmäßigkeiten des Taktfahrplans im Personenfernverkehr*. Eisenbahntechnische Rundschau, 28(4):229–232, 1979.
- [WL94] WACKER, STEPHAN und ALFRED LAUT: *Dienstplanoptimierung mit evolutionären Algorithmen*. In *Operations Research Proceedings*, Seiten 203–208, Berlin, 1994. Springer.

- [WTR95] WAGNER, PETER, WOLFGANG THEURICH und BIRGIT RÜHLMANN: *Kleine Typenkunde deutscher Reisezugwagen*. Transpress, Berlin, 1995.
- [Zeh76] ZEHME, INGOLF: *Die Abhängigkeit der Verspätungen auf einer Eisenbahnstrecke von der Streckenbelastung und weiteren Einflußgrößen*. Eisenbahntechnische Rundschau, 25(11):687–692, 1976.
- [Zim71] ZIMMERMANN, HANS-JÜRGEN: *Netzplantechnik*. Walter de Gruyter, 1971.

Index

— A —

Anschluß, 9

— B —

Bahnhof, 6

Anfangs-, 8

End-, 8

Halte-, 7

Start-, 7

Umsteige-, 9

Ziel-, 7

Baum, 50

Beförderungszeit

Grund-, 12

Mindest-, 12

planmäßige, 9, 13

realisierte, 15

Beförderungszeitvolumen

Gesamt-, planmäßiges, 26

Gesamt-, realisiertes, 26

Betriebsstelle, 28

Abzweigstelle, 28

Anschlußstelle, 28

Blockstelle, 28

Haltepunkt, 28

Haltestelle, 28

Bewertungsfunktion, 49

Bildfahrplan

Bildfahrplankopf, 28

Bildfahrplannetz, 28

Bogen, *siehe*

- Kante

— D —

Digraph, *siehe*

- Graph, gerichteter

— F —

Fahrlage, 21

Fahrplan, 7

Ist-, 18

Reise, 23

Soll-, 13

Taktfahrplan, 9

Fahrzeit

Mindest-, 12

realisierte, 16

reine, 9

— G —

Gleis, 6

Grad

Ausgangs-, 49

eines Knotens, 49

Eingangs-, 49

negativer, 49

positiver, 49

Graph

bewerteter, 49

gerichteter, 48

kreisfreier, 50

schlichter, 49

ungerichteter, 48

zusammenhängender, 50

— **H** —

Haltezeit

Betriebs-, 11
Mindest-, 12
realisierte, 18
Verkehrs-, 11

— **I** —

Inzidenz, 48

-abbildung, 48
negative, 48
positive, 48

— **K** —

Kante, 48

Bewertung, 49
gerichtete, 48
parallele, 48

Kantenfolge, 50

Kantenzug, 50

Kette, 50

Knoten

Bewertung, 49
isolierter, 49

Kreis, 50

— **L** —

Linie, 8

Fernverkehrs-, 8
Linienbündelung, 44
Liniennetz-Graph, 53
Liniennummer, 8
Nahverkehrs-, 8

Liniennetz, 8

— **M** —

Mindestübergangszeit, 9

Mindestzugfolgezeit, 31

— **N** —

Nachbar, 49

Nachfolger, 49

— **P** —

Pünktlichkeitsgrad, 17

Pfeil, *siehe*

- Kante, gerichtete

— **Q** —

Quelle, 49

— **R** —

Regelwartezeit, 18

Reise, 7

Reisezeit, 7

— **S** —

Schiene, 6

Schlinge, 48

Senke, 49

Strecke, 6

Block-, 28

Streckenabschnitt, 6

Streckennetz, 6

Streckennetz-Graph, 51
Streckentabelle, 140
Synchronzeit
 außerplanmäßige, 17
 planmäßige, 12

— **T** —

Taktverdichtung, 44
Taktzeit, 9
Trasse, 6
Triebfahrzeug, 6
 Lokomotive, 6
 Triebwagen, 6

— **U** —

Umsteigen, 9
Umsteigezeit
 planmäßige, 9

— **V** —

Verkehr, 5
 Fern-, 6
 Nah-, 5
Verkehrsplanung
 Angebotsdefinition, 19
 Dienstplanung, 21
 Fahrlagenplanung, 21
 Fahrzeugeinsatzplanung, 21
 Linienplanung, 19
 Netzstrukturplanung, 19
 Verkehrsnachfrage, 19
 zugweise Fahrplanung, 21
Verspätung, 16
 Abfahrt-, 17
 Ankunfts-, 17
 Anschluß-, 45

Ausbruchs-, 16
Einbruchs-, 16
Erst-, 16
Folge-, 16
Zuwachs-, 16
Verspätungsgrad, 17
Vorgänger, 49

— **W** —

Wagen, 6
 Güter-, 6
 Reisezug-, 6
Wald, 50
Wartestrategie
 absolute, 17
 relative, 17
Wartezeit, 18
 außerplanmäßige, 17
 planmäßige, **13**
Weg, 50

— **Z** —

Zentrum
 Mittel-, 5
 Ober-, 5
 Unter-, 5
Zug, **7**
 Anschlußzug, 9
 Reise-, 7
 Zuggattung, 8
 Zugnummer, 7
 Zugspitze, 16
Zugüberwachung
 rechnerunterstützte, 38
Zugfahrt, 7
 Laufweg, 7
 Zuglauf, 7
Zusammenhangskomponente, 50

Zuschlag

 Regel-, 11

 Sonder-, 11