

**Fakultät Wirtschaftswissenschaften  
der Universität Paderborn**



## **Dissertation**

# **Computergestützte Disposition im schienengebundenen Personentransport – ein kundenorientierter Ansatz**

zur Erlangung des akademischen Grades des

Dr. rer. pol.

eingereicht durch

Dipl. Wirt. Inform. Claus Biederbick

**Dekan:** Prof. Dr. Peter F. E. Sloane  
**Gutachter:** 1. Prof. Dr. Leena Suhl  
2. Prof. Dr. Ludwig Nastansky  
**verteidigt am** 09.02.2006



## **Kurzzusammenfassung**

In der vorliegenden Arbeit wird eine neue Art des Kundenbeziehungsmanagements für den schienengebundenen Personenverkehr vorgestellt: die kundenorientierte Disposition (KD). Statt der Pünktlichkeit eines Zugs wird primär die der Reisenden betrachtet: Erstens werden Strategien entwickelt, welche unvermeidbar auftretende Konflikte im Bahnnetz im Kundensinne auflösen. Zweitens werden Kunden selbst (z. B. über ihr Mobiltelefon) disponiert. Beide Teile lassen sich unabhängig realisieren, eine gemeinsame Umsetzung ist aber von Vorteil.

Nach einer Istanalyse der Disposition wird eine Systemarchitektur aus intelligenten Softwareagenten modelliert und prototypisch in ein Softwaresystem für die KD in großen Bahnnetzwerken überführt.

System und Strategien werden mit mehreren Mio. Passagieren und dem Fahrplan der Deutschen Bahn AG simuliert. Mittels eines mathematischen Programms werden diverse Strategien getestet. Bereits relativ einfache Strategien weisen bessere Ergebnisse auf als zwei Praxis-Strategien. Dabei kann selbst mit komplexen Strategien ein Verkehrstag der Bahn sehr schnell auf wenigen PCs simuliert werden.

Als 2. Komponente der KD wird schließlich die Interaktion mit Reisenden betrachtet. Es zeigt sich, dass z. B. eine SMS-basierte Information mit einfachen Mitteln zu realisieren ist.

Nach einer Zusammenfassung werden zuletzt Aspekte einer Realisierung der KD und mögliche Erweiterungen diskutiert. Insgesamt zeigt sich, dass die KD keine Vision sein muss.

## **Short abstract**

With this thesis a new method of customer relationship management for railway companies is introduced: customer-oriented dispatching (CD). Instead of focussing on timeliness of trains, for CD timeliness of passengers is the primary objective: First of all, new dispatching strategies capable of solving connection conflicts in a customer-oriented way are developed. The second approach is to support this by dispatching single costumers through the net. Both parts can be realized independently; however, a common implementation is more favourable.

Subsequently, all components and conditions of railway dispatching are examined. Given this, a system architecture based on intelligent software agents as well as a prototyped software system for CD is shown.

Both parts of CD are tested with millions of passengers travelling given a timetable of Deutsche Bahn AG. Some of the tested strategies yield better results as two strategies used in real-life. Even if more complex strategies are used, the simulation can be done efficiently on cheap hardware.

To cover the second main part of CD, a real-time interaction system giving guidance to passengers is outlined and implemented. It is shown that e. g. SMS-based information of passengers can be realized with simple means.

After a summary some aspects of possible realisation strategies this approach as well as some extensions are discussed. All in all it is shown that CD must not remain a bare vision.



## Zusammenfassung

Aufgrund ökonomischer und ökologischer Erwägungen ist eine der wichtigsten Aufgaben eines intelligenten Verkehrsmanagements die Stärkung des schienengebundenen öffentlichen Personenverkehrs gegenüber dem motorisierten Individualverkehr. Eine Möglichkeit dazu ist die Erhöhung der Servicequalität durch verbessertes Informationsmanagement. Während die Kommunikation mit dem Kunden vor der Reise weitestgehend optimiert ist, ist sie während der Reise verbesserungswürdig: im jetzigen Bahnsystem ist es für Kunden fast unmöglich, zur richtigen Zeit an beliebigen Orten an die für sie direkt relevanten Informationen zu kommen, obwohl diese durchaus vorliegen.

Mit der vorliegenden Dissertationsschrift wird eine neue Methode des Kundenbeziehungsmanagements für den schienengebundenen Personenverkehr vorgestellt: die kundenorientierte Disposition. Es handelt sich dabei um Methoden, die, statt die Pünktlichkeit eines Zugs in den Mittelpunkt zu stellen, die Pünktlichkeit der Reisenden als primäres Ziel betrachten. Die kundenorientierte Disposition setzt dabei auf zwei Ebenen ein. Erstens werden darunter Strategien verstanden, welche unvermeidbar auftretende Konflikte, zumeist Anschlusskonflikte, im Bahnnetz im Sinne des Kunden aufzulösen versuchen. Einher geht zweitens die Disposition der Kunden selbst unter Zuhilfenahme vorhandener mobiler Kommunikationsendgeräte. Beide Bestandteile können im Prinzip unabhängig voneinander realisiert werden, allerdings ist eine gemeinsame Implementierung weitaus vorteilhafter.

Zum Beweis der Sinnhaftigkeit dieses Konzepts werden zunächst alle Bestandteile und Voraussetzungen der Disposition bei einer Bahngesellschaft untersucht, um Anforderungen an ein Informations- und Kommunikationssystem in Form eines Entscheidungsunterstützungssystems für die kundenorientierte Disposition herzuleiten. Dabei werden, neben der Analyse einiger Ansätze der Kundenorientierung und der Entscheidungsunterstützung aus der Literatur, insbesondere die Gegebenheiten bei der Deutschen Bahn AG betrachtet.

Ausgehend von den Erkenntnissen dieser Analysephase wird im Anschluss eine aus intelligenten Softwareagenten modellierte Systemarchitektur vorgestellt sowie ein darauf basierendes Softwaresystem für die kundenorientierte Disposition in großen Bahnnetzwerken konzipiert und prototypisch umgesetzt. Letzteres dient sowohl zum Test als auch zur praktischen Demonstration der Umsetzbarkeit des Konzepts. Ergänzend wird ein flexibel einsetz- und skalierbares Simulationssystem für den fahrplangebundenen Schienenverkehr entwickelt, welches für das Dispositionssystem ein Surrogat für das Realsystem der Deutschen Bahn AG darstellt.

In diesem System interagieren mehrere Softwareagenten, bspw. Disponenten, die durch Anwendung von Dispositionsstrategien Züge und Passagiere derart durch das Netz lenken, dass die Verspätung der Passagiere unter Beachtung verschiedener Zielkriterien minimiert wird, Passagierrouter, die Reisende im Falle verpasster Anschlüsse mit einer neuen Route auf dem dynamischen Netzwerk versorgen, Züge, die selbständig Sicherheitsabstände einhalten,

und Reisende, die sich im Netzwerk in dem Sinne proaktiv verhalten, als dass sie versuchen, ihre Prinzipale, d. h. menschliche Reisende, pünktlich an das gewünschte Ziel zu bringen.

Die Funktionsfähigkeit beider Hauptbestandteile der kundenorientierten Disposition wird anschließend unter Beweis gestellt, indem das System mittels der Simulationstestumgebung und einer realistischen Anzahl Passagiere (mehrere Millionen) auf dem Originalfahrplan der Deutschen Bahn AG getestet wird.

Um dem ersten Anliegen der kundenorientierten Disposition Rechnung zu tragen, werden zuerst (bahnseitige) Dispositionsstrategien, die speziell die Pünktlichkeit von Passagieren berücksichtigen, entwickelt und im System integriert. Dabei handelt es sich um einige einfache Dispositionsheuristiken, ein Verfahren zur Simulation verschiedener Strategien im laufenden Betrieb sowie ein mathematisches Modell zur (Online-) Optimierung von Dispositionsentscheidungen in einem Realitätsausschnitt im Bahnnetz. Als Bewertungsmaßstab für die Güte einer Dispositionsentscheidung wird dabei jeweils die gewichtete, ungeplante Passagierwartezeit gewählt. Das mathematische Modell wird anschließend zum Offline-Algorithmus modifiziert, sodass damit – mit gewissen Einschränkungen – alle anderen denkbaren Strategien einem Gütetest unterzogen werden können.

Auf diese Weise wird die Leistungsfähigkeit der entwickelten Architektur bewiesen: Selbst bei der Verwendung komplexerer Dispositionsstrategien wie der mathematischen Optimierung kann die Simulation eines Verkehrstages der Bahn in wenigen Stunden – oder zumindest in Echtzeit – auf wenigen PCs erfolgen. Überdies zeigt sich, dass einige der getesteten Strategien trotz ihrer Einfachheit unter den gegebenen Annahmen bessere Ergebnisse zeitigen als zwei in der Praxis eingesetzte Strategien.

Zur Abdeckung der zweiten Komponente der kundenorientierten Disposition werden schließlich die Information der und die Interaktion mit Reisenden betrachtet. Es zeigt sich, dass bspw. eine SMS- oder internetbasierte Information mit vergleichsweise einfachen Mitteln zu realisieren ist. Die Interaktion an sich kann nur erfolgen, falls dazu geeignete mobile Endgeräte vorhanden sind und zudem genügend Zeit während einer Reise zur Verfügung steht.

Nach einer detaillierten Zusammenfassung werden abschließend einige Aspekte einer Realisierung der kundenorientierten Disposition sowie notwendige Erweiterungen und Forschungsarbeiten besprochen. Insgesamt zeigt sich, dass sowohl die Konzeption als auch das entwickelte System allen gesetzten Zielen und Anforderungen dieser Arbeit gerecht werden und die kundenorientierte Disposition – zumindest in Teilen – prinzipiell keine bloße Vision sein muss.

**Schlagwörter:** Disposition im Schienenverkehr, Deutsche Bahn AG, Online-Optimierung, Diskrete, ereignisorientierte Simulation, Intelligente Softwareagenten, Entscheidungsunterstützungssysteme, Multiagentensysteme und deren Simulation, Mathematische Programmierung, Mobilkommunikation

## Abstract

Due to economical and ecological reasons one of the most important goals of an intelligent traffic management is the primacy of railway traffic compared with individual traffic.

One possible way to reach this is to increase service quality by improving the supply of information for passengers during their journeys, i.e., to *improve the quality of on-trip information*. While there are many comfortable ways to communicate with a railway company before boarding, it is difficult to gather personalised information when and where it is needed mostly, e. g. in case of delays or missed connections, even if the necessary data is available.

With this thesis a new method of customer relationship management for railway companies is introduced: customer-oriented dispatching. While traditional approaches focus on timeliness of trains, for customer-oriented dispatching the timeliness of passengers is the primary objective. This directly leads to two main ideas: The first one is to develop new dispatching strategies capable of solving connection conflicts in a customer-oriented way, e. g. by minimizing total passenger waiting times. The second one is to support this with methods to dispatch single costumers by proactively giving them the right information when they need it. Both components could be realized independently; however, a common implementation is by far more favourable.

For the proof of concept of customer-oriented dispatching this work is outlined as follows: First of all, all components and conditions of railway dispatching are examined in detail in order to deduce requirements of a decision support system for customer-oriented railway dispatching. Additionally to the analysis of some approaches of customer orientation and decision support from the literature a detailed view on dispatching organisation and processes at German Railway (“Deutsche Bahn AG”) is given.

Given these insights, a system architecture based on intelligent software agents as well as a prototyped software system for customer-oriented dispatching based on this architecture will be shown. The latter serves both for the proof and a feasibility study of the concept.

Additionally to this, a flexible and scalable distributed simulation system for railways for timetable-based rail traffic will be developed as a test bed for the dispatching components and a surrogate for the real-life System of Deutsche Bahn.

The system as a whole contains several interacting software agents, e. g. *Dispatchers* using special dispatching strategies to minimize delay times of passengers, *passenger routers* capable of calculating new routes in the dynamic network for passengers with missed connections in real-time, *trains* proactively ensuring timeliness of their passengers and security of operations, and passenger agents communicating with their real-life equivalents and supporting them reaching their destination.

Subsequently, both parts of customer-oriented dispatching are tested with millions of passengers travelling given an original timetable of Deutsche Bahn AG.

At first, several customer-oriented dispatching strategies are implemented, e. g. some simple rule based heuristics, a method of simulating different strategies in advance, and even a

mixed integer program for online optimisation is presented. The quality of a dispatching decision is measured in terms of unplanned, weighted, and cumulated waiting times of every single passenger. Afterwards, the mathematical model is changed slightly to show how it could work as an offline algorithm to test the empirical quality of other dispatching strategies.

In this way, the efficiency of the developed architecture is proven: Even if more complex dispatching strategies (like mathematical optimisation) are used, the simulation of one day of timetable operations can be done in a few hours or, at least, in real time on a few Personal Computers. Besides this, it is shown, that (*ceteris paribus*) some of the tested strategies yield better results as two strategies used in real-life.

Finally, to cover the second main part, a real-time communication and interaction system giving guidance to passengers during their trips is outlined and implemented. It is shown that e. g. SMS- or Internet-based *information* of passengers can be realized with comparatively simple means. The *interaction* can of course only take place, if suitable mobile communication devices are present, and if a sufficient span of time is available during a journey.

After a detailed summary some aspects of possible realisation strategies of customer-oriented dispatching as well as necessary extensions and future research are discussed. All in all it is shown that both the conceptual model and the developed system meet the requirements and aims defined in this work. Thus, customer-oriented dispatching must not remain – at least partially – a bare vision.

**Key words:** Dispatching in Rail Traffic, Deutsche Bahn AG/German Railway, Online-Optimization, Discrete Event Simulation, Intelligent Software Agents, Decision Support Systems, Multi Agent Systems and their Simulation, Mathematical Programming, Mobile Communication

## Vorwort

*Alles wissenschaftliche Arbeiten ist nichts anderes als immer neuen Stoff in allgemeine Gesetze zu bringen.*

Alexander von Humboldt

Der Lehrstuhl Decision Support & Operations Research Lab der Universität Paderborn kooperiert bereits seit einigen Jahren in diversen Projekten mit vielfältigen Zielsetzungen mit der Deutschen Bahn, deren Systemhaus DB Systems und anderen Dienstleistungsunternehmen im Bereich Personen- und Gütertransport, sodass es letztlich für mich nicht mehr als schlüssig war, im „Bereich Bahn“ zu promovieren. Die Disposition bot sich an, schließlich wurde und wird dieser für die eigentliche Produktqualität wichtigste produktionsbegleitende Prozess, in der Literatur recht stiefmütterlich behandelt. Zudem startete bald ein Projekt, in dem es um die SMS-gestützte On-Trip-Information von Passagieren ging und dessen Ergebnisse später Eingang fanden in das in dieser Arbeit beschriebene Gesamtkonzept.

Erste Ansätze dieser Arbeit gingen in Richtung der betriebswirtschaftlichen Aufarbeitung des Prozesses: Was ist eigentlich „gute Disposition“? – Die Antwort ist ambivalent, da der Nutzen einer Dispositionsentscheidung schwer zu messen ist. Eine reine Kostenbetrachtung führt ebenso wenig zum Ziel wie die Messung der Pünktlichkeit von Zügen in Verbindung mit einer vagen Anweisung, die Reichweite solcher Entscheidungen sei weitestgehend einzuschränken. Ersteres Vorgehen scheitert an enormen, schwer monetär zu bewertenden Imageverlusten, wenn Passagiere – Kunden – zu spät kommen, oder gar Anschlüsse verpassen. Letzteres liefert ebenfalls in der Praxis nur äußerst unzureichende Entscheidungsunterstützung für den Disponenten – ist aber dessen allgemein anerkannte und verwendete Ermessensgrundlage.

In zweierlei Hinsicht ist diese Thesis ein gewagtes Unterfangen: Es gibt zum einen neben der Besetzung des Amtes des Fußball-Bundestrainers in Deutschland kaum ein anderes Thema, welches die Gemüter so vieler Menschen so nachhaltig erregt, wie die Situation der Bahn. Fast jeder hat sich schon einmal über sie geärgert, jeder hat eine Idee, wie man das System nachhaltig verbessern oder gar revolutionieren könnte, und es vergeht kein Tag, an dem nicht irgendeine Meldung in den Nachrichten das Vertrauen in die Bahn allgemein oder ihre Pünktlichkeit, ihre Reformfähigkeit oder die Führungsqualität ihrer Manager im Speziellen erschütterte. Mit anderen Worten: Jeder hat eine Meinung, und jeder fühlt sich frei sie zu äußern; eine Unmenge von Experten entwickelt Tag für Tag neue Thesen zum Thema.

Zum anderen verknüpft die Arbeit zwei an sich umfangreiche Kernaufgaben der Bahn miteinander: Kundenorientierung und Disposition. Allein die exakte Beschreibung aller damit verbundenen Prozesse und Informationen würde den normalen Rahmen einer Dissertation zweifellos sprengen: Ein System, das sich seit nunmehr 170 Jahren entwickelt hat und ständig weiter entwickelt wird, kann nicht auf wenigen hundert Seiten beschrieben, geschweige denn neu erfunden werden. Es ist ebenfalls unwahrscheinlich, dass der jetzige Dispositionsprozess

organisatorisch dramatisch verändert werden könnte; es ist, gemessen an der Veränderungsgeschwindigkeit von Großkonzernen, sogar nicht einmal wahrscheinlich, dass die in dieser Arbeit beschriebenen Erweiterungen der Passagierinformation in absehbarer Zeit umzusetzen wären.

Trotzdem, so die These dieser Arbeit, wäre es durch den Einsatz moderner Technik, durchdachter Systeme und intelligenter Algorithmen möglich, entscheidende Verbesserungen der Disposition im Hinblick auf ihre Ausrichtung an den Bedürfnissen der Kunden zu erzielen. Diese These zu belegen soll Inhalt der folgenden Ausarbeitung sein.

Zu Beginn der Forschungsarbeiten, die Grundlage einiger Entwicklungen dieser Arbeit sind, und die bis in die Mitte der neunziger Jahre zurückreichen, waren alle hier beschriebenen Konzepte, Lösungsideen und Vorschläge mehr Vision als nahe liegende Erweiterungen eines bestehenden Systems. Mittlerweile existiert jedoch eine Reihe interessanter Ansätze und Initiativen der Bahn, die untermauern, dass sich der Transportdienstleister in wenigen Jahren von einem staatlich gelenkten Koloss zu einem in großen Teilen serviceorientierten Zukunftsunternehmen – mit Schwächen zwar, aber auf einem guten Weg – befindet.

Besonderen Dank schulde ich Prof. Dr. Leena Suhl, die mir diese Arbeit ermöglicht hat, Johannes Goecke für die großartige Zusammenarbeit in all den Jahren, Yuriy Shkonda für seine Unermüdlichkeit im Detail, den vielen Korrekturlesern, allen voran Alexander Roth, Dr. Markus P. Thiel und natürlich Constanze Schulte, ohne deren Beistand und Langmut mit mir die Arbeit nicht hätte fertig werden können.

Paderborn, im Oktober 2005

Claus Biederbick

# Inhalt

<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>XV</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>XVII</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>XIX</b>
<b>I Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<i>I.1 Motivation: Zur Notwendigkeit der Bahn als Bestandteil intelligenten Verkehrsmanagements</i> .....	3
I.1.1 Die Bedeutung leistungsfähiger Verkehrsinfrastruktur .....	3
I.1.2 Ansätze intelligenten Verkehrsmanagements.....	5
<i>I.2 Kundenorientierung im schienengebundenen Personentransport</i> .....	6
<i>I.3 Potenziale im Dispositionsprozess der Deutschen Bahn</i> .....	12
<i>I.4 Die Idee der kundenorientierten Disposition</i> .....	14
I.4.1 Kundenorientierte Dispositionsstrategien .....	15
I.4.2 Disposition der Passagiere .....	16
I.4.3 Vorteile kundenorientierter Disposition .....	17
<i>I.5 Ziele und Aufbau der Arbeit</i> .....	18
I.5.1 Zielsetzung und -abgrenzung .....	18
I.5.2 Aufbau der Arbeit .....	20
<i>I.6 Wissenschaftlicher Beitrag</i> .....	22
<b>II Bestandsaufnahme: Die Disposition im Kontext eines Bahnsystems</b> .....	<b>25</b>
II.1 Die Deutsche Bahn AG .....	25
II.2 Bestandteile eines Bahnsystems .....	28
II.2.1 Permanente Entitäten eines Bahnsystems: Topologie/Netzwerk.....	29
II.2.2 Temporäre Bestandteile: Züge und Passagiere.....	30
II.2.3 Der Fahrplan als verbindendes Element.....	33
II.3 Produktionsplanung und -steuerung im schienengebundenen Personenverkehr.....	35
II.3.1 Besonderheiten des Bahnprodukts .....	37
II.3.2 Der allgemeine Planungsprozess.....	38
II.3.3 Strategische Planungsebene .....	40
II.3.4 Taktische Planungsebene .....	43
II.3.5 Operative Planungsebene .....	47
II.4 Disposition im Schienenverkehr in Theorie und Praxis.....	49
II.4.1 Begriffliche Grundlagen.....	50
II.4.2 Disposition als Online- bzw. Echtzeitoptimierungsproblem.....	58
II.4.3 Methoden und Systeme zur computerbasierten Entscheidungsunterstützung für die Disposition	63
II.4.4 Disposition in der Praxis: Organisation und Ablauf bei der Deutschen Bahn AG .....	77
II.5 Fazit – Anforderungen an die kundenorientierte Disposition.....	96
II.5.1 Schwachstellen und Potenziale im derzeitigen Dispositionsprozess.....	96
II.5.2 Allgemeine Anforderungen an die kundenorientierte Disposition .....	98
II.5.3 Systemabgrenzung .....	101

<b>III</b>	<b>Konzeptuelles Rahmenwerk für die computergestützte kundenorientierte Disposition .....</b>	<b>103</b>
III.1	<i>Softwarearchitektur auf Basis intelligenter Agenten.....</i>	<i>103</i>
III.1.1	Grundlagen intelligenter Softwareagenten .....	104
III.1.2	Agentenbasierte Architektur eines Systems für die kundenorientierte Disposition.....	114
III.1.3	Logische Gesamtsystemarchitektur .....	116
III.1.4	Disposition innerhalb einer Region .....	117
III.1.5	Zusammenwirken der Dispositionsbestandteile .....	119
III.1.6	Der Dispositionsagent als Kernkomponente .....	120
III.1.7	Ein Agent zum Online Re-Scheduling von Passagieren: Der Passagierrouter .....	129
III.1.8	Weitere Agenten im System .....	130
III.2	<i>Simulation als Testumfeld für die kundenorientierte Disposition .....</i>	<i>132</i>
III.2.1	Grundlagen diskreter, ereignisorientierter Simulation.....	133
III.2.2	Das Simulationstestbed „TrainSim“ .....	144
<b>IV</b>	<b>Bahnseitige Strategien für die kundenorientierte Disposition .....</b>	<b>165</b>
IV.1	<i>Grundlagen .....</i>	<i>166</i>
IV.1.1	Lösungsverfahren für die Dispositionsproblematik.....	166
IV.1.2	Definition und Klassifikation von Dispositionsstrategien .....	169
IV.2	<i>Bewertungsmaßstäbe „guter“, kundenorientierter Disposition.....</i>	<i>172</i>
IV.3	<i>Modellbildung: Das Bahnsystem aus Sicht der kundenorientierten Disposition .....</i>	<i>175</i>
IV.4	<i>Einfache Heuristiken zur Entscheidungsfindung .....</i>	<i>177</i>
IV.4.1	Strategiekonstruktion.....	177
IV.4.2	Implementierung .....	185
IV.4.3	Ergebnisse der Experimentation .....	187
IV.5	<i>Simulation ‚im Kleinen‘ zur What-If-Analyse .....</i>	<i>197</i>
IV.5.1	Modellierung .....	198
IV.5.2	Ergebnisse der Experimentation.....	199
IV.6	<i>Entscheidungsunterstützung durch mathematische Optimierung .....</i>	<i>201</i>
IV.6.1	Das Bahnsystem als mathematisches Programm.....	201
IV.6.2	Implementierung des Optimierungsagenten .....	215
IV.6.3	Ergebnisse der Experimentation.....	218
IV.7	<i>Offline-Analyse mittels mathematischer Optimierung .....</i>	<i>226</i>
IV.7.1	Anpassung des mathematischen Modells .....	227
IV.7.2	Ergebnisse der Experimentation.....	227
<b>V</b>	<b>Kundenseitige Informations- und Kommunikationsprozesse der kundenorientierten Disposition .</b>	<b>241</b>
V.1	<i>Theoretische Grundlagen.....</i>	<i>242</i>
V.1.1	Grundkonzepte des Mobile Computing.....	242
V.1.2	Netzwerk-Technologien für mobile Endgeräte .....	243
V.1.3	Dienste für mobile Endgeräte.....	248
V.1.4	Klassen mobiler Endgeräte.....	251
V.1.5	Verbreitung mobiler Endgeräte .....	254

V.2	<i>KIIS – Ein Kommunikationssystem für Reisende</i> .....	254
V.2.1	Ziele der Reisendenunterstützung .....	255
V.2.2	Die System-Architektur des KIIS.....	255
V.2.3	Funktionsumfang.....	255
V.2.4	Implementierung .....	257
V.3	<i>Prototypische Implementierung im realen IT-Umfeld der Bahn: E-Info</i> .....	262
<b>VI</b>	<b>Schlussbetrachtungen: Chancen und Risiken kundenorientierter Disposition.....</b>	<b>265</b>
VI.1	<i>Zusammenfassung</i> .....	265
VI.2	<i>Aspekte der Realisierung im Bahnsystem</i> .....	268
VI.2.1	Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen .....	269
VI.2.2	Einführungsstrategien.....	269
VI.3	<i>Forschungsbedarf</i> .....	272
VI.4	<i>Fazit</i> .....	273
	<b>Literatur</b> .....	<b>275</b>
	<b>Glossar</b> .....	<b>289</b>
	<b>Anhang: Ergänzende theoretische Betrachtungen</b> .....	<b>305</b>
A.1	<i>Berechnung der Reisedauer für verschiedene Verkehrsmittel</i> .....	305
A.2	<i>Vorgehensweise bei der „Verkehrsprognose 2015“</i> .....	306
A.3	<i>Nähere Erläuterungen zum ETCS</i> .....	307



# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Stufen kundenorientierter Disposition .....	15
Abbildung 2: Aufbau der vorliegenden Arbeit.....	21
Abbildung 3: Aufbau Deutsche Bahn AG ab 2005 (s. [DB 2005a]) .....	27
Abbildung 4: Verschiedene virtuelle Netze der Deutschen Bahn AG .....	32
Abbildung 5: Beispiel für einen Fahrplan der Deutschen Bahn AG – im Bild mit aktuellen Zuglaufinformationen (s. [DB 2005e]) .....	34
Abbildung 6: Der allgemeine Planungsprozess als Wasserfallmodell in Hierarchieform.....	39
Abbildung 7: Ablaufdiagramm der Planung bei Fernbahnen (in Anlehnung an [Bussieck/Zimmermann 1997] und [Assad 1980]).....	40
Abbildung 8: Der Regelkreis der Disposition im Schienenverkehr .....	51
Abbildung 9: Aufbau des ISTP-Systems (aus [Heth 1999], S. 7).....	70
Abbildung 10: Zugtabelle des ISTP-Clients (aus [Heth 1999], S. 8).....	70
Abbildung 11: Ausschnitt aus der Netzansicht (aus [Heth 1999], S. 9).....	71
Abbildung 12: Die Zeit-Wege-Linie der Strecke Kassel -Frankfurt (aus [Heth 1999], S. 10).....	72
Abbildung 13: Konfliktlösung basierend auf Expertenwissen (vgl. [Fay 2000a]) .....	73
Abbildung 14: Architektur eines Entscheidungsunterstützungswerkzeugs für Disponenten (nach [Suhl/Mellouli 1999]).....	75
Abbildung 15: Sperrzeitentreppe zweier Züge, Quelle: [Gröger 2002], S. 17 .....	83
Abbildung 16: Arbeitsterminal eines Zugdisponenten bei der Regio AG Nord .....	95
Abbildung 17: Arbeitsweise von Interface Agenten nach ([Maes 1994], S. 33).....	111
Abbildung 18: Client-Server und Mobile Agenten nach [White 1996] .....	114
Abbildung 19: Globale, logische Dispositionsarchitektur.....	117
Abbildung 20: Systemarchitektur innerhalb einer Region .....	118
Abbildung 21: Kommunikationsbeziehungen zwischen Dispositionsbestandteilen .....	120
Abbildung 22: Schematischer Aufbau eines Expertensystems am Beispiel des Disponenten .....	123
Abbildung 23: Anzeige von Zugverspätungen für einen ICE sowie ein Umsteigerprotokoll mit Anschlusskonflikten.....	125
Abbildung 24: Ablauf eines diskreten, ereignisorientierten Simulationsmodells (vgl. [Law/Kelton 2000]) .....	138
Abbildung 25: „Steps of a sound simulation study“ (vgl. [Law/Kelton 2000], S. 84).....	143
Abbildung 26: Beispielgraph des Passagierrouters .....	151
Abbildung 27: Latest-First-Matches in einem Anschlussnetzwerk.....	152
Abbildung 28: Ereignis „Ausfahrt Bahnhof“ .....	156
Abbildung 29: Ankunftsereignis an einer Kante .....	157
Abbildung 30: Ereignisdiagramme „Einfahrt Kante“ und „Ausfahrt Kante“ .....	158
Abbildung 31: Ankunft an einem Bahnhof .....	159
Abbildung 32: Diagramm „Einfahrt Bahnhof“ .....	159

Abbildung 33: Einteilung verschiedener Dispositionsstrategien nach dem Informationsbedarf.....	171
Abbildung 34: Kostenfunktionen verschiedener Kategorien von Reisenden im Vergleich .....	174
Abbildung 35: Beispiel für generierte positive Zugverspätungen im Verlauf einer Simulation .....	189
Abbildung 36: Übersicht Anknunftspünktlichkeit .....	192
Abbildung 37: Übersicht Passagierverspätungen.....	194
Abbildung 38: Gewichtungsfunktion für Passagierwartezeiten .....	195
Abbildung 39: Übersicht gewichtete Passagierwartezeiten .....	197
Abbildung 40: Durchschnittliche Simulationsdauern für einfache Dispositionsstrategien .....	200
Abbildung 41: Auswirkung eines veränderten Zeithorizontes des Simulationsmodells .....	200
Abbildung 42: Verschiedene Warteprofile und ihre lineare Approximation .....	209
Abbildung 43: Allgemeiner Aufbau eines Optimierungssystems .....	216
Abbildung 44: Aufbau des Optimierungssystems (Systemspezifikation).....	216
Abbildung 45: Benutzungsoberfläche der Maske „Projekteinstellungen“ .....	217
Abbildung 46: Kostenfunktionen.....	229
Abbildung 47: Verhalten der Strategie 13 für verschiedene Parameter $q$ im Zeitraum 1.....	231
Abbildung 48: Verhalten der Strategie 13 für verschiedene Parameter $q$ im Zeitraum 3.....	232
Abbildung 49: Verhalten der Strategie 16 bei wechselndem $q$ (Zeitraum 3).....	235
Abbildung 50: Vergleich zwischen Online- und Offline-Disposition (Zeitraum 1).....	236
Abbildung 51: Vergleich zwischen Online- und Offline-Disposition (Zeitraum 2).....	237
Abbildung 52: Vergleich zwischen Online- und Offline-Disposition (Zeitraum 3).....	238
Abbildung 53: Die WAP-Infrastruktur .....	250
Abbildung 54: WAP-fähiges Mobiltelefon (Siemens S65).....	252
Abbildung 55: Pocket-PC und Palm .....	253
Abbildung 56: Systemarchitektur eines Informationssystems für Reisende .....	256
Abbildung 57: Startseiten KIIS auf PDA uns zwei verschiedenen WAP-Browsern (Openwave [oben] und Nokia) .....	260
Abbildung 58: Die Buchungsseiten des KIIS in verschiedenen Clients .....	260
Abbildung 59: Darstellung des ETCS Level 1 (Quelle: [Wikipedia 2005d]) .....	308
Abbildung 60: Darstellung des ETCS Level 2 (Quelle: [Wikipedia 2005d]) .....	308
Abbildung 61: Darstellung des ETCS Level 3 (Quelle: [Wikipedia 2005d]) .....	309

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verkehrsaufkommen der Deutschen Bahn AG (nach [DB 2005h]).....	4
Tabelle 2: Kundenbindungsaktivitäten der Deutschen Bahn AG.....	11
Tabelle 3: Daten und Fakten des Netzwerks der Deutschen Bahn AG mit den Veränderungen zum Vorjahr (vgl. [DB 2005h]).....	28
Tabelle 4: Anwendungsstufen des European Train Control System (nach [Wegener 2005]).....	87
Tabelle 5: Klassifizierung von On-Trip-Passagierinformationen .....	90
Tabelle 6: Regelwartezeiten der Deutschen Bahn AG, in Anlehnung an [Jacobs 2003], S. 29 .....	93
Tabelle 7: Kategorisierung nach Zuggattungen .....	179
Tabelle 8: Simulationsdauer in Minuten und Anzahl der Abfahrtskonflikte .....	190
Tabelle 9: Erfolg und Pünktlichkeit der Zielankünfte .....	191
Tabelle 10: Passagierwarteminuten je verspätetem Passagier mit erfolgreicher Zielankunft, je verspätetem Passagier insgesamt und je Passagier insgesamt.....	193
Tabelle 11: Durchschnittliche maximale Gesamtverspätung der Passagiere .....	194
Tabelle 12: Gewichtete Passagierwartezeit je verspätetem Passagier (inkl. Passagiere ohne Zielankunft) und je Passagier insgesamt.....	196
Tabelle 13: Einfluss der Modellgröße auf die Optimierungsdauer .....	219
Tabelle 14: Einfluss der Passagiere auf die Optimierungsdauer .....	219
Tabelle 15: Einfluss Passagiere/Umsteiger auf die Optimierungsdauer .....	220
Tabelle 16: Einfluss von Wartezeitregelungen und Verspätungsaufholen.....	221
Tabelle 17: Einfluss der Gewichtungsfaktoren .....	221
Tabelle 18: Einfluss der Mindestaufholzeit .....	222
Tabelle 19: Proportionalität Passagiere/Umsteiger .....	223
Tabelle 20: Einfluss von Störungen auf die Optimierungsdauer, I .....	224
Tabelle 21: Einfluss von Störungen auf die Optimierungsdauer; II.....	224
Tabelle 22: Einfluss von Störungen auf die Optimierungsdauer; III.....	225
Tabelle 23: Einfluss von Modellgröße und Störungen auf die Optimierungsdauer .....	226
Tabelle 24: Modellgrößen.....	228
Tabelle 25: Parameter der Simulation .....	230
Tabelle 26: Parameter der Offline-Analyse .....	231
Tabelle 27: Ergebnisse für Strategie 13 bei wechselndem $q$ in Zeitraum 1 .....	233
Tabelle 28: Ergebnisse für Strategie 13 bei wechselndem $q$ in Zeitraum 1 .....	233
Tabelle 29: Ergebnisse für Strategie 16 bei wechselndem $q$ in Zeitraum 3 .....	234
Tabelle 30: Ergebnisse (Zeitraum 1).....	236
Tabelle 31: Ergebnisse (Zeitraum 2).....	237
Tabelle 32: Ergebnisse (Zeitraum 3).....	239
Tabelle 33: Klassifikation mobiler Endgeräte (nach [Roth 2002], S. 339) .....	251

Tabelle 34: Pseudocode für Benachrichtigungsalgorithmus .....	261
Tabelle 35: Parameter zur Berechnung der Reisedauer (nach: [Siegmann 2001], S. 90).....	305
Tabelle 36: Prognose der Verkehrsnachfrage im Jahre 2015 (s. [BMVBW 2001], S. 120).....	306
Tabelle 37: Verkehrsnachfrage nach Reisezwecken (s. [BMVBW 2001], S. 169).....	307

# Abkürzungsverzeichnis

**Anmerkung:** Erklärungen zu den einzelnen Abkürzungen sind nötigenfalls im Glossar dieser Arbeit zu finden

3GPP	3 <sup>rd</sup> Generation Partnership Program
AI	Artificial Intelligence
API	Application Programming Interface
ASDIS	Automatisches Dispositionsverfahren
ASIM	Arbeitsgemeinschaft Simulation
BDI (-Architektur)	Belief, Desire, Intention-Architektur
BFS	Breadth First Search
BMVBW	Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen
BUND	Bund für Umwelt und Naturschutz
BZ	Betriebszentral
cHTML	Compact HTML
CIS	Cisalpino
DAG	Directed Acyclic Graph
DB AG	Deutsche Bahn AG
DESMO-J	Discrete-Event Simulation and MOdelling in JAVA
DLL	Dynamic Link Library
DS & OR	Decision Support & Operations Research
DSS	Decision Support System
DTD	Document Type Definition
D-Zug	Durchgangszug
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
EIS	Executive Information System
EIU	Eisenbahninfrastrukturunternehmen
ERMTS	European Rail Traffic Management System
ESS	Executive Support System
ESTW	Elektronisches Stellwerk
ETCS	European Train Control System
ETSI	European Telecommunication Standards Institute
EU	Europäische Union
EUS	Entscheidungsunterstützungssystem
EVI	Eisenbahnverkehrsunternehmen
FIFO	First In First Out
GG	Grundgesetz
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communication
GSM-R	Global System for Mobile Communication-Rail

GUI	Graphical User Interface
HSCSD	High Speed Circuit Switched Data
HTML	Hypertext Markup Language
IC/EC	InterCity/EuroCity
ICE	IntercityExpress
ICN	InterCity-Neigezug
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IMT-2000	IMT-2000 (International Mobile Telecommunications at 2000 MHz)
IP	Integer Programming
IR	InterRegio
IrDA	Infrared Data Association (Organisation und gleichnamiger Standard)
IRE	InterRegio Express
ISDN	Integrated Services Digital Network
ISO	International Organization for Standardization
ISTP	Informationssystem Transportleitung Personenverkehr
IT	Informationstechnologie
IWW	Institut für Wirtschaftspublizistik
KDE	Kool Desktop Environment
KI	Künstliche Intelligenz
KIIS	Kommunikations- und Interaktionssystem für Reisende
LKW	Laskraftwagen
LP	Lineares Program oder auch Logischer Prozess
MAS	Multiagentensystem
MBTA	Massachusetts Bay Transportation Authority
MIP	Mixed Integer Programming
MIS	Management Support System
MIV	Motorisierter Individualverkehr
MMS	Multimedia Messaging Service
MMSC	Multimedia Messaging Service Center
MOPS	Mathematical Optimization System
MPS	Mathematical Programming Society
MS	Management Science
MSS	Management Support System
MTRS	Multi-Mode Train Radio System
MÜZ	Mindestübergangszeit
NBP	Neue Bahntechnik Paderborn
NP	Nichtdeterministisch Polynomiell
OD-Matrix	Origin/Destination-Matrix
OLE	Object Linking and Embedding
OLTSP	Online Travelling Salesman Problem
OMA	Open Mobile Alliance

ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
ÖPV	Öffentlicher Personenverkehr
OR	Operations Research
PARC	Palo alto Research Center
PC	Personalcomputer
PDA	Personal Digital Assistant
PHP	PHP Hypertext Preprocessor
PIEPSEER	Personalisierte Informationen exklusiv für Pendler bei Störungen des öffentlichen Verkehrs
PKW	Personenkraftwagen
PPS	Produktionsplanung und Steuerung
PR	Passagierrouter
PÜZ	Persönliche Übergangszeit
PWM	Passagierwarteminuten
RB	Regionalbahn
RE	Regional-Express
RFID	Radio Frequency Identification
RIS	Reisendeninformationssystem der Deutschen Bahn AG
RMI	Remote Method Invocation
RWZ	Regelwartezeit
SAA	Systems Application Architecture von IBM
SB	Schnellbus
SE	StadtExpress
SIM (-Karte)	Subscriber Identity Module
SMS	Short Message Service
SOS1	Special Ordered Set vom Typ 1
SOS2	Special Ordered Set vom Typ 2
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
TRI	Transrapid International
TSP	Travelling Salesman Problem
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VHE	Virtual Home Environment
WAP	Wireless Application Protocol
WLAN	Wireless Local Area Network
WML	Wireless Markup Language
WPAN	Wireless Personal Area Network
WWW	World Wide Web
XML	Extensible Markup Language
ZDF	Zweites Deutsches Fernsehen



# I Einleitung

*A railroad is 95 percent men and 5 percent iron.*

Adam Smith

Am 14. Januar 2004 fand im kurz zuvor fertig gestellten Hotel Ritz Carlton am Potsdamer Platz in Berlin die Feier zum zehnten Jahrestag der Bahnreform statt. Am 1. Januar 1994 war das „Eisenbahnneuordnungsgesetz“ in Kraft getreten. Die ehemaligen Staatsbetriebe der Deutschen Bundesbahn sowie der Deutschen Reichsbahn wurden zusammengeführt und in das privatwirtschaftliche Unternehmen „Deutsche Bahn AG“ (im Folgenden auch DB AG oder „die Bahn“ genannt) – vollständig in Bundesbesitz – umgewandelt. „Mehr Verkehr auf die Schiene“ war oberstes Ziel dieser Reform, verbunden mit einer deutlichen Effizienzsteigerung des Betriebs. Als Fernziel wurde die Kapitalmarktfähigkeit der Deutschen Bahn AG postuliert.

Obwohl noch immer (Mitte 2005) nicht börsennotiert, hat die Bahn seit ihrer Privatisierung im Wettbewerb der Verkehrsträger im Streben nach Rentabilität und Effizienz trotz hoher „Altlasten“, bspw. einer für ein Privatunternehmen ungünstigen Personalstruktur und eines sich teilweise in schlechtem Zustand befindlichen Streckennetzes, viel erreicht:

Vom Staatskonzern wandelte sich das Unternehmen in nur einer Dekade zum *Verkehrsdienstleister*, für welchen Kundenzufriedenheit, Flexibilität und Leistungseffizienz keine Fremdworte mehr sind. Die Wichtigkeit des Service am und für den zahlenden Kunden wurde erkannt und zum großen Teil auch umgesetzt.

Die vorliegende Arbeit hat eine weitere Steigerung dieser Servicequalität zum Ziel. Ansatzpunkt dafür ist eines der wichtigsten Qualitätsmerkmale der Dienstleistung eines Anbieters öffentlichen Transports, nämlich die *Pünktlichkeit der Leistungserbringung*.

Daran ist die Bahn, gemessen an ihren Projekten, sehr interessiert. In 2004 wurde bspw. unter dem Stichwort „Pünktlichkeitsoffensive“ versucht, die Quote der *pünktlichen Züge* zu erhöhen (vgl. [ZDF 2004]). Dies sind nach Bahndefinition Züge, die fünf Minuten oder weniger verspätet sind.

In der Praxis ist diese Zielsetzung mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden: Aus verschiedenen, vom Betreiber oft nicht beeinflussbaren Gründen, kommt es bei der Durchführung eines gegebenen Fahrplans im Schienenverkehr zu Störungen, die sich ihrerseits größtenteils in Verspätungen von Zügen äußern. Einige Passagiere erreichen somit das gewünschte Ziel nicht zur geplanten Zeit, was im Einzelfall kritisch sein mag, i. Allg. jedoch kein gewaltiges Problem darstellt; kleinere Verspätungen werden akzeptiert und in aller Regel von den Passagieren selbst durch Pufferzeiten in der Reiseplanung ausgeglichen.

Ernster für Passagiere wird es erst dann, wenn Verspätungen ihrerseits in sog. *Konflikte* münden. Dabei handelt es sich, allgemein formuliert, um die Koinzidenz sich widersprechender Zielsetzungen einzelner Systementitäten, z. B. die gleichzeitige Anforderung desselben Gleises durch zwei verschiedene Züge. Solche Konflikte werden normalerweise durch den

Eingriff menschlicher *Disponenten* gelöst, die im Einzelfall entscheiden, welche Zielstellung die bedeutendere ist.

Eine für die Passagiere sehr wichtige und große Klasse von Konflikten sind die *Anschlusskonflikte*, bei denen Passagiere eines verspäteten Zugs einen an sich abfahrereiten Anschlusszug erreichen wollen. Anschlusskonflikte resultieren aus vielfältigen Zubringer-Abbringer-Relationen<sup>1</sup>, die im Fahrplan verankert sind.

Aufgrund ihres komplexen Taktfahrplans (ca. 29.000 Personenzüge/Tag zwischen ca. 5.480 Stationen (vgl. [DB 2005a]) ergeben sich täglich zigtausend Entscheidungsprobleme: Die Kardinalfrage dabei ist, ob ein Anschlusszug losfahren soll, sodass die umsteigewilligen Passagiere ihn verpassen, aber die sich im Zug befindlichen nicht oder nur wenig verspätet werden, oder ob umgekehrt die Passagiere im zubringenden Zug ihren Anschluss erreichen, aber dafür möglicherweise weitere Konflikte durch die hohe Verspätung des wartenden Zugs in dessen Folgeverlauf induziert werden.

Das Auflösen solcher Konflikte ist gemeinhin eine schwierige Aufgabe: Vielfältige Unsicherheiten und Ungewissheiten in der Prognose von Zugläufen in Verbindung mit einer bisweilen unklaren Informationslage und Konsequenzen, die in ganzer Tiefe unüberschaubar sind müssen im Sinne der betroffenen Passagiere überwunden werden.

Bisher wird dieses Problem mithilfe eines einfachen Regelsystems gelöst, falls Wartezeiten nicht zu lang werden; andernfalls greift ein (menschlicher) Disponent ein. Dieser berücksichtigt bei seiner Entscheidungsfindung viele Kriterien, die unter dem Leitgedanken, möglichst wenige Züge zu verspäten und damit die Folgen einer Störung einzugrenzen, subsumiert werden können.

Die Interessen der Passagiere können derzeit hauptsächlich nur berücksichtigt werden, indem Zugbegleiter *Anschlussicherung* beantragen. Diese liegt jedoch im Ermessen des Disponenten – und wird keineswegs immer erteilt. Verpasste Anschlüsse sind die tägliche Folge.

In der o. a. Pünktlichkeitsoffensive führte die Bahn AG z. B. seit April 2004 im Saarland und in Rheinland-Pfalz ein Modellprojekt zur Erhöhung der Zugpünktlichkeit durch, in dem Regionalzüge nicht mehr auf verspätete Fernzüge warten. Auf diese Weise konnte zwar die Pünktlichkeit der Züge um 93 % gesteigert werden, über die Anzahl der verpassten Anschlüsse liegen jedoch keine Erkenntnisse vor. Somit kann nicht sinnvoll beurteilt werden, ob dieses Vorgehen wirklich im Interesse der zahlenden Kunden liegt. Es lässt sich höchstens mutmaßen, dass einem relativ hohen Anteil *relativ* pünktlicher Passagiere ein kleiner Anteil *sehr unpünktlicher* Passagiere gegenübersteht. Es liegt also die Vermutung nahe, dass die generelle Regel „Niemals warten“<sup>2</sup> nicht unbedingt optimale Ergebnisse für die Reisenden liefert, da zwar induzierte Anschlusskonflikte vermieden, dafür jedoch einige Passagiere immer den

---

<sup>1</sup> Zu Begriffsdefinitionen vgl. Kapitel II.

<sup>2</sup> Im Einzelfall wird in der Praxis sicherlich gewartet werden.

direkten Anschluss verpassen werden<sup>3</sup>. Offensichtlich lassen sich sehr einfach Szenarios konstruieren, in denen diese Strategie fehlschlägt.

Ein wesentlicher Grund dafür ist nach Ansicht des Autors ein logischer Fehler in der Zielsetzung, in erster Linie die Pünktlichkeit von Zügen zu gewährleisten. Daraus folgt, so die Argumentation, auch die Pünktlichkeit der Passagiere. In dieser Arbeit soll oberste Priorität der Disposition, also der Kontrolle und Steuerung des Ablaufs der Produktion, die Gewährleistung der Pünktlichkeit *der Passagiere* sein. Damit soll natürlich nicht bestritten werden, dass Zug- und Passagierpünktlichkeit stark miteinander korreliert sind. Es wird lediglich darauf hingewiesen, dass im Sinn einer immer bedeutender werdenden Kundenorientierung eher der zahlende Kunde im Mittelpunkt der Überlegung stehen sollte als ein (unbestritten wichtiges) Produktionsmittel.

Die vorliegende Arbeit hat demnach zum Ziel, eine andere Herangehensweise an diese – nicht nur für das operative Geschäft – extrem wichtige Aufgabenstellung der Bahn zu konzipieren und anhand prototypischer Implementierungen zu demonstrieren. Im Kontext dieser Arbeit soll dieses Konzept „kundenorientierte Disposition“ genannt und nachfolgend umfassend erläutert werden.

## **I.1 Motivation: Zur Notwendigkeit der Bahn als Bestandteil intelligenten Verkehrsmanagements**

Die Stärkung des Verkehrssystems Bahn war und ist aus mehrerlei Gründen Gegenstand zahlreicher Forschungsarbeiten. Nachfolgend sollen, gleichsam als Motivation für die vorliegende Arbeit, einige dieser Gründe erörtert werden.

### **I.1.1 Die Bedeutung leistungsfähiger Verkehrsinfrastruktur**

Die Relevanz des betrachteten Problemfelds liegt auf der Hand: Die moderne westliche Gesellschaft ist ohne ein dichtes Transportsystem für Güter und Personen nicht denkbar. Volkswirtschaftliches Wachstum ist seit jeher in hohem Maße an gute infrastrukturelle Voraussetzungen gekoppelt. „Globalisierung“ wäre eine nicht zu verwirklichende Idee, wenn es nicht die Möglichkeit gäbe, binnen kürzester Zeit jeden beliebigen Ort der Welt zu erreichen oder logistisch zu erfassen. Für das Individuum sind Mobilität und Flexibilität zu essentiellen Voraussetzungen für den beruflichen Erfolg geworden. Dieser Erfolg schafft seinerseits Raum für touristische Aktivitäten in allen Teilen der Welt. Mit anderen Worten: Mobilität fördert gesellschaftliches Fortkommen, dieses wiederum fördert Mobilität. Es besteht also ein hoher und vermutlich noch wachsender Bedarf an Transportmöglichkeiten für Güter und Personen. So steigt z. B. in Deutschland die Zahl der Flugreisenden ständig an; nur in der Zeit nach den Terror-Anschlägen vom 11. September 2001 war ein gegenläufiger Trend zu verzeichnen, der

---

<sup>3</sup> Es wird im weiteren Verlauf der Arbeit und mit den vorgestellten Werkzeugen gezeigt werden, dass diese Aussage valide ist: „Niemals Warten“ ist keineswegs die beste denkbare Strategie, gemessen an der Pünktlichkeit der beteiligten Passagiere.

in der Zwischenzeit bei weitem überkompensiert wurde<sup>4</sup> (vgl. [Stat. Bundesamt 2005]). Auch sind seit 1991 die gesamtdeutschen Fahrleistungen aller Kraftfahrzeuge nach Berechnungen der Bundesanstalt für Straßenwesen von 574 Mrd. Fahrzeugkilometer um 7,2 % auf 616 Mrd. Fahrzeugkilometer angestiegen (vgl. [Stat. Bundesamt 2002]<sup>5</sup>). Auch die Deutsche Bahn AG verbuchte seit 1994 Steigerungen im Personenverkehrsaufkommen<sup>6</sup> (vgl. Tabelle 1). Sie beförderte in den Spitzenjahren je ca. 1,7 Mrd. Passagiere, davon ca. 90 % im Regionalverkehr, wobei allerdings dieser Wert in den Jahren 2002 und 2003 konstant blieb. Auch im Jahr 2004 konnte kein substanzielles Wachstum verzeichnet werden. Diese Wachstumsentwicklung untermauert die oben genannte These – in den letzten Jahren wuchs die deutsche Volkswirtschaft kaum. Alles in allem kann also ein langfristiges Wachstum des Mobilitätsbedarfs unterstellt werden.

Tabelle 1: Verkehrsaufkommen der Deutschen Bahn AG (nach [DB 2005h])

	2004	2003	2002	2001	2000	1999	1998	1997	1996	1995	1994
<b>Personenverkehr</b>											
verkehr (in Mio. Passagieren)	1694,8	1681,7	1657,2	1701,7	1712,5	1680,1	1668,4	1641	1596,4	1539,4	1430,6
- davon Fernverkehr	115,3	117,3	128,4	136,3	144,8	146,5	148,9	152,2	151,2	149,3	139,3
- davon Regionalverkehr	1579,5	1564,4	1528,8	1565,4	1567,7	1533,6	1519,5	1488,8	1445,2	1390,1	1291,3
<b>Güterverkehr</b>											
Aufkommen Güterverkehr (in Mio. t)	283,6	282,3	278,3	291,3	301,3	279,3	288,7	294,9	287,9	300,4	306,9

Gleichzeitig haben viele Transportnetze mittlerweile ihre Kapazitätsgrenzen erreicht: So entsteht im Straßenverkehr jedes Jahr z. B. durch Stauungen auf der Straße ein volkswirtschaftlicher Schaden in Milliardenhöhe (s. u.) Auch das Bahnnetz ist durch Streckenabbau (z. T. aufgrund maroder Trassen), viele Baustellen, hohe Taktungen und weitere Auslastungsoptimierung des Netzes<sup>7</sup> ebenfalls stark beansprucht.

<sup>4</sup> Insbesondere der noch immer anhaltende „Billigflieger-Boom“, der durch extrem günstige Flugtarife für spezielle Flugverbindungen quer durch Europa hervorgerufen wurde, trägt dazu bei (vgl. [Krüger 2002]).

<sup>5</sup> In den letzten Jahren ist erstmals ein gegenläufiger Trend zu beobachten (vgl. [Stat. Bundesamt 2005]), was i. Allg. der anhaltenden Wachstumsschwäche und vergleichsweise hohen Treibstoffpreisen angelastet wird.

<sup>6</sup> Der Güterverkehr dagegen stagniert dagegen seit geraumer Zeit, weswegen im weiteren Verlauf dieser Arbeit auch keine Ansätze zur Steigerung des Güteraufkommens im Bahnverkehr betrachtet werden. Annahme des Autors dabei ist, dass die Bahn prinzipiell schlechter geeignet ist, Güter schnell und flexibel von A nach B zu transportieren als Lastkraftwagen es sind. Dagegen steht die Betrachtung, dass es äußerst ineffizient ist, eine einzelne Person in einem PKW von A nach B zu transportieren, selbst wenn der PKW äußerst verbrauchsarm ist. Zudem müssen Güter an Knotenpunkten umgeladen werden – Passagiere können umsteigen!

<sup>7</sup> Dabei ist zu unterscheiden zwischen *Netzlast* und *Zugauslastung*: Leere Züge belasten ein Netz genauso stark wie volle.

Der Staat, der die Infrastruktur letztlich zu verantworten hat<sup>8</sup>, hat immer weniger Geld zur Verfügung, so dass die bestehenden Netze kaum erhalten, geschweige denn ausgebaut werden können (vgl. [Schmitt 2005]). Ein Indiz dafür ist die Einführung von Mautgebühren für den Gütertransport auf deutschen Autobahnen, und auch die Privatisierungsbestrebungen im Öffentlichen Personen- (Nah-) -verkehr (ÖP(N)V) sind darin begründet.

Wenn also zum einen Mobilität und deren Steigerung gesellschaftliche Notwendigkeit ist, gleichzeitig alle Netze sehr stark ausgelastet sind und zudem der Staat keine Erweiterungen der Infrastruktur leisten kann, bleibt nur die effizientere Nutzung vorhandener Ressourcen als Ausweg: der Verkehr muss sinnvoller gesteuert werden; es muss ein besseres Verkehrsmanagement stattfinden.

### **I.1.2 Ansätze intelligenten Verkehrsmanagements**

Die Idee, den Verkehr effizienter zu steuern, ist nicht neu: In zahlreichen Projekten, in Deutschland und auf europäischer Ebene, wurde nach neuen Möglichkeiten und Wegen des Verkehrsmanagements gesucht. Bspw. wurden in den Projekten *Wayflow*, *INVENT*, *Mobiball* oder auch mit der *MobilCard®* des Bundes für Umwelt- und Naturschutz (BUND) Versuche in diese Richtung unternommen.

- *Wayflow* diente dabei zur Unterstützung intermodalen Verkehrsmanagements im Rhein-Main-Gebiet (vgl. [Wayflow 2004]). Greifbarer Output ist z. B. der sog. *Mobichip*.
- *INVENT* wollte zur Erhöhung der Verkehrssicherheit und Optimierung der Verkehrsflüsse beitragen (vgl. [INVENT 2005]).
- *Mobiball* hatte zum Ziel, die Mobilität in Ballungsräumen zu steigern.
- Die *MobilCard®* ist Baustein für ein „intelligentes, vernetztes und umweltgerechtes Mobilitätssystem der Zukunft“ (vgl. [BUND 2005]).

Allen genannten Projekten ist die Grundidee gemein, den öffentlichen Verkehr zuungunsten des Individualverkehrs zu stärken. Die Verwendung von Bussen und insbesondere auch Bahnen sollte gesteigert werden, genau, wie es das erklärte Ziel der Bahnreform 1994 war. Zumeist wird dabei über die Notwendigkeit eines leistungsstarken Bahnsystems sowohl aus makroökonomischer als auch aus ökologischer Sicht argumentiert. Aus *ökonomischer* Sicht ist bspw. die Möglichkeit zur Verringerung der externen Kosten zu nennen: Diese „resultieren zum Beispiel aus Unfällen, Straßen-, Gebäude- und Umweltschäden sowie aus Zeitverlusten im Straßenstau“ (vgl. [DB 2005b]) und betragen nach einer Studie von INFRAS und des IWW in Karlsruhe für das Jahr 2000 in der EU, der Schweiz und Norwegen zusammen jährlich 530 Milliarden Euro (vgl. [INFRAS 2000]). Das entspricht ca. 8 % der akkumulierten Bruttoinlandsprodukte der beteiligten Länder. Der Studie folgend sind die externen Kosten

---

<sup>8</sup> Auch die Privatisierung der Bahn ändert nichts daran, dass der Fahrweg öffentlich finanziert wird, weil dafür nach aktueller Gesetzeslage der Staat zuständig ist (vgl. Abschnitt II.1).

des Autofahrens pro Personenkilometer fast fünf Mal so hoch wie die des Bahnfahrens (vgl. dazu auch [DB 2000]).<sup>9</sup>

Aus *ökologischer* Sicht ist die Argumentationslage ebenso eindeutig, weil die Bahn im Hinblick auf „Umweltverbrauch“ im Vergleich zum Individualverkehr weitaus effizienter ist. Lärm und sonstige Emissionen, der Primärenergie- und der Landschaftsverbrauch sinken deutlich.

Mit anderen Worten: Für die Gesellschaft sollte die Benutzung der Bahn Vorrang – zumindest gegenüber der Benutzung von PKW – haben.

Dieser These folgend muss es ein vorrangiges Ziel des Verkehrsmanagements sein, die Attraktivität des Bahnfahrens für den einzelnen (potenziellen) Passagier zu steigern, um viele der durch Überlastung verschiedener Verkehrsnetze induzierten Probleme zu lindern. – Dies ist die Hauptmotivation der vorliegenden Arbeit.

Zur Erlangung dieses Ziels existieren prinzipiell verschiedene Ansatzpunkte:

- *Systemexogen durch den Staat*: Der Gesetzgeber kann versuchen, die Wirtschaftlichkeit des Bahnfahrens für den Bürger durch Subventionierung der Bahn oder – was wahrscheinlicher ist – durch zusätzliche Besteuerung der konkurrierenden Verkehrssysteme Auto und Flugzeug zu erhöhen. Eine weitere Möglichkeit wären z. B. Kampagnen zur Umwelterziehung, um das gesellschaftliche Ansehen der Bahn im Vergleich zum Automobil zu stärken.
- *Systemendogen durch den Bahnbetreiber*: Es stehen diverse Wege zur Kundengewinnung und -bindung zur Verfügung, angefangen bei günstigen Verbindungspreisen bzw. hohen Rabatten und Bonusmeilensystemen bis hin zur Erhöhung der Dienstleistungsqualität.

Eine genauere Beleuchtung staatlicher Maßnahmen soll im Rahmen dieser Arbeit nicht erfolgen, da sie prinzipiell abhängig von der Ideologie der jeweiligen Regierung und den Vorstellungen diverser Interessengruppen sind. Zudem sind sowohl die Durchsetzung als auch die Untersuchung der Wirksamkeit solcher Maßnahmen äußerst diffizil.

Einfacher durchzusetzen, und aus Sicht des Autors wirkungsvoller, sind Maßnahmen seitens des Systembetreibers bzw. Dienstleistungsanbieters, die darum im nächsten Abschnitt kurz betrachtet werden.

## **I.2 Kundenorientierung im schienengebundenen Personentransport**

Die Orientierung an Zielen und Wünschen der Kunden bzw. Passagiere ist für Transportdienstleister – wie für fast jedes andere Unternehmen auch – eine der wichtigsten strategischen Herausforderungen. Das triviale Oberziel potenzieller Kunden der Bahn besteht in der

---

<sup>9</sup> Verlagerung von Gütern auf die Schiene ist dabei aus Sicht des Autors nur sehr eingeschränkt sinnvoll. Das Bahnsystem kann prinzipbedingt nicht die Flexibilität und Effizienz heutiger Transportlogistikdienstleister auf der Straße erbringen.

Beförderung von einem Startort zu einem Ziel. Damit steht die Bahn in Konkurrenz sowohl zum motorisierten Individualverkehr (MIV), also Auto, Motorrad etc., als auch zu anderen Massentransportmitteln wie dem Flugzeug oder Fernverkehrsbussen.

Obwohl also gesellschaftlich erwünscht und makroökonomisch sinnvoll, wird die individuelle Auswahlentscheidung auf mikroökonomischer Ebene oftmals von irrationalen Erwägungen gelenkt, sei es, weil die Netzabdeckung und die Taktraten auf dem Land nicht den Erfordernissen der Bürger entsprechen (können), sodass ein Reisender kaum zu den gewünschten Zeiten sein Ziel erreichen wird, oder weil vielleicht in Deutschland traditionell nicht gern auf das Automobil als Zeichen persönlicher Freiheit verzichtet wird.

Offensichtlich existiert also eine Reihe die Auswahlentscheidung eines Reisenden beeinflussende Faktoren, welche die Angebotsstrategie der Bahn unter Berücksichtigung technischer Möglich- und Notwendigkeiten bestimmen sollte. Es muss dementsprechend analysiert werden, welche Produktmerkmale die Kundenzufriedenheit positiv beeinflussen und wie genau diese Eigenschaften unter Beachtung betriebswirtschaftlicher Restriktionen bestmöglich auszugestalten sind. Dabei sind selbstverständlich nicht alle Merkmale für jeden potenziellen Kunden gleich wichtig, was wiederum eine Kundensegmentierung und, darauf aufbauend, die Gestaltung spezieller Angebote für einzelne Kundengruppen impliziert<sup>10</sup>. Die nachfolgend beschriebenen allgemeinen Qualitätsmerkmale sind also für alle Reisenden bedeutsam, wenn gleich zum Teil mit unterschiedlichem Gewicht.

- *Reisedauer*: Selbstverständlich ist nicht nur die reine Reisezeit im System Bahn gemeint, sondern die Zeitspanne „von Haus zu Haus“. Die Reisedauer hängt damit u. a. von der Dichte der Netzzugangsknoten, der Einbindung anderer Verkehrsmittel, von der Geschwindigkeit der Züge, der Liniengestaltung und der Taktrate der Züge etc. ab. Betrachtet man den sog. *Modalsplit*, die Aufteilung des gesamten Verkehrsaufkommens auf die verschiedenen Beförderungsarten, so wird deutlich, dass der Großteil der potenziellen Kunden den MIV bevorzugt<sup>11</sup>. Dabei wird oft implizit von einer kürzeren Reisedauer ausgegangen, was aber in der Realität leicht zu widerlegen ist: Siegmann kommt in [Siegmann 2001], S. 88ff., bei einer Konkurrenzanalyse der Verkehrsträger PKW, Fernbus, Bahn und Flugzeug zu folgendem Ergebnis. Unter den dort getroffenen Voraussetzungen kann berechnet werden, dass der PKW bei Entfernungen bis zu 150 km, das Flugzeug ab 600 km und dazwischen die Bahn das jeweils günstigste Transportmittel sind, wenn die Reisedauer alleiniges Entscheidungskriterium ist<sup>12</sup>.
- *Preis*: Die Bahn muss selbstverständlich für jede Kundengruppe attraktive Angebote bereithalten. Nach Meinung des Autors ist ein Angebot preislich umso „attraktiver“, je niedriger die Teilkosten, d. h. die für die einzelne Fahrt anfallenden Kosten,

---

<sup>10</sup> Die Deutsche Bahn AG kommt diesem Anspruch in der Praxis durch verschiedene Serviceangebote und Komfortkategorien nach.

<sup>11</sup> Der aktuelle und der prognostizierte Modalsplit ist Tabelle 36 zu entnehmen.

<sup>12</sup> Die Formeln für die Berechnung sind im Anhang A.1 wiedergegeben.

einer Reise sind. Diese sind für viele Kunden entscheidend<sup>13</sup>, was die Attraktivität solcher Angebote wie Bahn- und Netzkarte bzw. der Protest der Kunden nach der Abschaffung der BahnCard 50 im Jahre 2002 und deren spätere Wiedereinführung deutlich macht.<sup>14</sup> Die Beförderung mit der Bahn ist sogar zumeist preiswerter, wenn zum Vergleich Personenkraftwagen auf Vollkostenbasis herangezogen werden<sup>15</sup>.

- *Ticketwerb*: Nicht nur die Kosten der Fahrkarte, sondern auch die Möglichkeit, an eine zu gelangen, stellt für den Kunden einen nicht zu unterschätzenden Aspekt des Produktes dar. Lange Wartezeiten an überfüllten Bahnhofsschaltern und vor Ticketautomaten können durchaus eine Hürde darstellen, insbesondere, da sie die Reisedauer teils erheblich verlängern. Anstrengungen zur weiteren technischen Vereinfachung des Ticketverkaufs und, darüber hinaus, zur Verwendung möglichst vieler Vertriebskanäle sollten demnach eine hohe Priorität genießen. Angenehmer als die Schalterabfertigung ist bspw. schon heute der Ticketwerb von zu Hause aus über das Internet sowie in Reisebüros; ebenfalls wird die Vermarktung von Reisen in Discountläden (vgl. [n-tv 2005]) weiter zunehmen.
- *Sicherheit*: Selbstredend ist alles zu tun, um einen sicheren Transfer zu gewährleisten. Die Wahrscheinlichkeit, unversehrt am Zielort anzukommen, ist bei der Bahn noch höher als im motorisierten Individualverkehr.
- *Zuverlässigkeit und Pünktlichkeit*: Gerade Passagiere, deren Reisezweck beruflicher oder geschäftlicher Natur ist, legen großen Wert auf diese beiden Produkteigenschaften. Häufige Verspätungen und verpasste Anschlüsse können dabei einen Wechsel zu konkurrierenden Verkehrsträgern zur Folge haben. In engem Zusammenhang damit steht auch der nächste Punkt.
- *Informationsversorgung der Kunden*: Insbesondere bei Verspätungen wird diese zu einem wichtigen Thema. Der Kunde sollte möglichst jederzeit über seinen weiteren Reiseablauf informiert sein. Bei Verspätungen sollte er möglichst früh über gehaltene oder verpasste Anschlüsse und alternative Weiterreisemöglichkeiten informiert

---

<sup>13</sup> Als Beleg dieser These mag der viel gehörte Ausspruch „Dafür kann ich nicht mit dem Auto hinkommen!“ beim Vergleich Ticketpreis vs. Treibstoffkosten dienen.

<sup>14</sup> Siegmann plädiert gar für die Einführung einer BahnCard 75 (vgl. [Siegmann 2003], Kap. 3, S. 10). Gerade im Konkurrenzkampf mit dem motorisierten Individualverkehr, bei dem ebenfalls die Teilkosten für eine Fahrt im Vergleich zu den Vollkosten (Anschaffung, Versicherung, Steuern) recht gering sind, schaffen derlei Angebote eine vergleichbare *Kostenstruktur* bzw. geringere Teilkosten. Dies wiederum erhöht die Vergleichbarkeit zwischen den Reisesystemalternativen und erleichtert dem Kunden die Entscheidung pro Bahn im Vergleich zur Vollkostenrechnung der Bahn wesentlich.

<sup>15</sup> Vgl. den sog. Mobilcheck bei der Reiseauskunft der Bahn ([DB 2005g]). Derartige Vollkostenrechnungen sind nach Meinung des Autors jedoch oft irreführend: Zum einen bereiten Automobile einen nicht oder nur schwer zu bewertenden monetären Nutzen, bspw. eine höhere Flexibilität am Zielort oder einfach das Gefühl der Unabhängigkeit, zum anderen besitzen die meisten Bahnnutzer sicherlich bereits einen PKW bzw. haben Zugriff auf einen. Für diesen sind die Fixkosten also quasi schon bezahlt.

werden. Wie bereits angedeutet, ist die Verbesserung der Informationsversorgung während der Reise ein Hauptanliegen der vorliegenden Arbeit.

- *Reisekomfort*: Die Bequemlichkeit der und der Servicegrad während der Reise seien schließlich als letzte Kriterien genannt: Diese wiederum werden bspw. beeinflusst durch die Ausstattung der Waggons, den Service im Zug, die Freundlichkeit des Zugpersonals oder auch die Art der Wartemöglichkeiten an Bahnhöfen. Gegeüber dem motorisierten Individualverkehr hat die Bahn im Bereich Reisekomfort den Vorteil, dass der Reisende die Reisezeit besser in seinem Sinne nutzen kann, da er sich nicht auf die Fahrzeugsteuerung konzentrieren muss. In diesen Zusammenhang fällt bspw. auch der *Gepäckservice*. Die Reise ist in den meisten Fällen mit weniger Stress für den Reisenden verbunden als das (aktive) Fahren eines PKW.

Darüber hinaus mag auch ein einzelner Reisender natürlich aus oben genannten makroökonomischen und -ökologischen Erwägungen handeln, um bspw. sein „Umweltgewissen“ zu beruhigen.

Zur Verbesserung Ihres Angebots hat die Deutsche Bahn AG seit ihrer Privatisierung diverse Kundengewinnungs- und -bindungsinstrumente entwickelt oder aus der Luftfahrtbranche übernommen.

Dabei werden im Bereich des Marketing-Mix – unabhängig von der betrachteten Dienstleistung bzw. dem verkauften Produkt – verschiedene Strategien zur Erhöhung der Kundenbindung eingesetzt. Allgemein können produktspezifische, preispolitische, kommunikationspolitische und vertriebsspezifische Methoden unterschieden werden. Daneben können natürlich Dienstleistungen verbessert oder auch neue geschaffen werden.

- *Produktspezifische* Methoden umfassen z. B. Modulsysteme, Produktstandards oder auch gemeinsame Produktentwicklung mit dem Kunden.
- Instrumente des *Preismanagement* sind mengenabhängiges Pricing, Zeit- und loyalitätsabhängiges Pricing, Mehrprodukt-/Mehrpersonenpricing, Verträge und Garantien, Kundenkreditkarten etc.
- *Kommunikationspolitische* Maßnahmen umfassen Servicenummern, Telefonmarketing (proaktive Kontakte), Direct Mail, Kundenzeitschriften, Events, Kundenforen, Online-Chats, und vieles mehr.
- *Vertriebsspezifische* Methoden umfassen Direktlieferung/Heimverkauf, im B2B-Bereich: Just-In-Time-Lieferung, Online-Vertrieb, usw.
- Die *Verbesserung vorhandener Dienstleistungen* umfasst Sekundärdienstleistungen, Service-related Products, Garantien und Value-Added-Services.

Alle Methoden haben zum Ziel, dem Kunden Anreize zum Wiederkauf – bzw. zur Wiederbenutzung – zu geben (vgl. [Bruhn/Homburg 2000], S. 21). Dabei hat sich in der Vergangenheit gezeigt, dass die Kosten zur Gewinnung neuer Kunden wesentlich höher sind als die

Kosten zur Bindung vorhandener Kunden (vgl. [Scharnbacher/Kiefer 1998], S. 15). Gerade unter dem Gesichtspunkt von gesättigten Märkten mit wenigen Wachstumschancen fällt die Gewinnung von Neukunden schwer und ist deshalb nicht mehr die zentrale Aufgabe des Marketings (vgl. [Giering 2000], S. 8). Vielmehr werden verstärkt Maßnahmen getroffen, um die Kundenloyalität zu erhöhen. Wichtigster Faktor ist dabei die Zufriedenheit des Kunden. Die weit reichenden Maßnahmen der Deutschen Bahn AG, die seit geraumer Zeit durch vielfältige Angebote im Service- und Kostenbereich die Kundenloyalität<sup>16</sup> zu erhöhen versucht, werden im Folgenden exemplarisch vorgestellt.

Im Mittelpunkt stehen dabei die Ausweitung der angebotenen Dienstleistungen sowie Kooperationen mit anderen Anbietern. So bietet die Bahn bspw. Zimmer in eigenen „InterCityHotels“ an, vermittelt Mietwagen und vernetzt die unterschiedlichen Verkehrsmittel mittels „Park&Rail“ bzw. „AirRail-Service“. Verstärkt wird versucht, dem Kunden hochwertige Produkte auf individueller Basis anzubieten. Als Beispiel kann der – inzwischen wegen Unwirtschaftlichkeit allerdings wieder eingestellte (vgl. [Welt 2004]) – „Metropolitan“ betrachtet werden. Der Zug pendelte zwischen Köln, Düsseldorf, Essen und Hamburg und war in verschiedene Bereiche aufgeteilt, u. a. Büroabteile, Ruheabteile und ein Abteil zur Unterhaltung.

Neuere Angebote im Servicebereich sind die Vielfahrerprogramme „bahn.comfort“ für Privatkunden und „bahn.corporate“ für Geschäftskunden. Wie bei den Meilensystemen der Luftverkehrsgesellschaften werden pro Fahrt Punkte gutgeschrieben, die zu besseren Konditionen oder Serviceleistungen berechtigen. Damit wird unter Nutzung des Sammeltriebs der Kunden eine Verlagerung der Prioritäten bei der Entscheidung, welches Verkehrsmittel für eine konkrete Reise sinnvoll ist, erhofft: Je mehr Bonuspunkte, desto sinnvoller ist es, weiter die Bahn zu verwenden.

Ende des Jahres 2002 wurde das Preissystem erneuert. Es belohnt seitdem vor allem Frühbucher und Gruppenreisende. Rabatte können miteinander kombiniert werden; Nachlässe bis zu 70 % sind möglich. Die neuen Tarife führten jedoch zu massivem Unmut bei vielen Fahrgästen, da Spontanreisende deutlich mehr als zuvor zahlten und die Transparenz und Verständlichkeit der verschiedenartigen Angebote unbefriedigend war (vgl. [n-tv 2002]). Hinzu kamen sehr hohe Stornogebühren für den Fall, dass eine früh gebuchte Reise nicht angetreten werden konnte. Unter anderem dies führte dazu, dass laut einer Umfrage der Financial Times Deutschland im März 2003 drei Viertel der Deutschen der Bahn ein schlechtes Image bescheinigten (zitiert nach [Spiegel 2003]). Deswegen wurde nach einigem Zögern die alte „BahnCard“ wieder eingeführt, die auch Spontanreisenden einen Rabatt von 50 % ermöglicht.

In Tabelle 2 werden exemplarisch einige Kundenbindungsmaßnahmen der Deutschen Bahn AG beschrieben und erläutert (vgl. [DB 2002]), wobei die o. a. Aufteilung in Instrumente der Bindungssteigerung Verwendung findet. Aufgrund des Typs der angebotenen Dienstleistungen<sup>17</sup> sind dies vor allem preis- und kommunikationspolitische Maßnahmen.

<sup>16</sup> Kundenloyalität bezeichne in diesem Kontext die freiwillige Entscheidung zur Wiederbenutzung der Bahn.

<sup>17</sup> Transportdienstleistungen dieser Art unterscheiden sich von den meisten Gütern aus dem Produktionsbereich bspw. dadurch, nicht lagerfähig zu sein. Näheres dazu findet sich in Abschnitt II.3.

Tabelle 2: Kundenbindungsaktivitäten der Deutschen Bahn AG

	Art des Angebotes
Kundenbindungsinstrument	<p><b>Preismanagement</b></p> <p>„<i>BahnCard</i>“: Durch Anschaffung der „<i>BahnCard 25</i>“ wird auf alle Strecken im Inland ein Rabatt von 25 % des normalen Fahrpreises gegeben. Sie ist personengebunden. Die „<i>BahnCard 50</i>“ ist teurer, sorgt aber für 50 % Rabatt.</p> <p><i>Frühbucherrabatte</i>: Eine Buchung einen Tag vor Fahrtantritt berechtigt zu 10 % Ermäßigung, ab drei Tagen sind es 25 % und ab sieben Tagen 40 %.</p> <p><i>Gruppenrabatte</i>: Pro gebuchter Fahrkarte zum vollen Preis können bis zu vier Mitfahrer mit halbem Preis reisen.</p> <p><i>Meilensystem</i>: Die Programme „<i>bahn.comfort</i>“ für Privat- und „<i>bahn.corporate</i>“ für Geschäftskunden berechtigen zu günstigeren Konditionen und Serviceleistungen.</p> <p>Das <i>Großkundenabonnement</i> ist ein spezielles Angebot für Geschäftsreisende; es wird ein rabattiertes, nach und nach abzufahrendes Wertkontingent ausgestellt. Für Unternehmen ab 100.000 € jährlichem Umsatz bei der Bahn kann zusätzlich ein „<i>Großkudenticket</i>“ oder „<i>Key Account Ticket</i>“ ausgestellt werden. Beide gewähren 20 % Rabatt oder auch Fahrten im benachbarten Ausland berechtigen.</p> <p><i>Stammkundenabonnement</i>: Die „<i>NetzCard</i>“ ermöglicht das unbegrenzte Fahren auf allen Schienenstrecken der Deutschen Bahn inklusive Straßenbahnen für ein Jahr, während beim „<i>Stammkunden-Abonnement</i>“ 12 Monatskarten für bestimmte Verbindungen zum Preis von 10 Monatskarten verkauft werden. Eine „<i>Monatsnetzkarte</i>“ hat die gleichen Eigenschaften wie die „<i>NetzCard</i>“, gilt jedoch nur einen Monat.</p> <p>Alle genannten Rabatte (außer <i>BahnCard 50</i>) können addiert werden. Eine 7 Tage früher gebuchte Reise mit „<i>BahnCard 25</i>“ würde einen Rabatt von 65 % ergeben.</p>
	<p><b>Kommunikationsmanagement</b></p> <p>Der <i>Reiseservice</i> umfasst die telefonische Auskunft zu Fahrplänen, Reiseverbindungen, Fahrpreisen und weiteren Serviceleistungen sowie die Buchung von Bahnreisen inkl. Sitzplätzen.</p> <p><i>Persönliche Beratung</i> wird in den „<i>DB ReiseZentren</i>“ in den Bahnhöfen geleistet, auch die Buchung von Fahrkarten ist möglich. Durch Zusammenarbeit mit Reisebüros ist es möglich, dort auch Reisen zu buchen.</p> <p>Die <i>elektronische Fahrplanauskunft</i> ist im Internet unter [Reiseauskunft 2005] erreichbar, neben Zugfahrplänen bietet die Seite auch Pläne für Straßenbahnen und Busse. Zusätzlich können Fahrten gebucht und Tickets selbst ausgedruckt werden. Es werden auch CD-ROMs und Disketten mit den aktuellen Fahrplänen zu angeboten.</p>
	<p><b>Vertriebsmanagement</b></p> <p>Es bestehen <i>verschiedene Möglichkeiten zur Lösung einer Fahrkarte</i>; sie können im Zug, am Automaten, im ReiseZentrum oder per Internet erworben werden.</p>
	<p><b>Dienstleistungsverbesserung</b></p> <p>Die <i>Sitzplatzreservierung</i> ist ab drei Monate vor der Reise bis kurz vor Fahrtantritt auf die oben beschriebenen Arten möglich.</p> <p><i>Gepäckservice</i>: An Bahnhöfen steht Personal für die Beförderung des Gepäcks bereit. Außerdem existiert ein Kurierdienst, der das Reisegepäck abholt und an eine Zieladresse ausliefert.</p> <p><i>Hotels</i>: Es besteht die Möglichkeit, in den „<i>DB ReiseZentren</i>“ ein Zimmer in einem der InterCity-Hotels zu buchen, die an den wichtigsten Bahnhöfen liegen. Während der Aufenthaltsdauer kann der Gast alle öffentlichen Verkehrsmittel im Stadtgebiet mit dem Zimmerausweis nutzen.</p> <p>Zusätzlich existieren Initiativen zur Erhöhung von Attraktivität, Sicherheit und Sauberkeit von Bahnhöfen.</p>

### I.3 Potenziale im Dispositionsprozess der Deutschen Bahn

Selbst im Vergleich zu den traditionell sehr serviceorientierten Fluggesellschaften unternimmt die Deutsche Bahn AG also bereits große Anstrengungen zur Erhöhung der Kundenbindung. Besonders im Bereich des Kommunikationsmanagements existieren umfassende Angebote: *Vor* (und damit auch *nach*) jeder Reise stehen sehr gut aufbereitete Informationen für Reisende zur Verfügung: Im Internet können sogar aktuelle Verspätungslagen<sup>18</sup> betrachtet werden. Ein Reisender muss somit z. B. nicht pünktlich am Bahnhof sein, wenn es der Zug auch nicht ist.<sup>19</sup> Sobald man aber unterwegs ist, also *während* einer Reise, wird es ungleich schwieriger, Informationen zu bekommen: Ankunfts- und Abfahrtstafeln in den Bahnhöfen, Bahnpersonal an den Schaltern und in den Zügen sowie ein mobiler Zugriff auf das Internet sind dann die einzigen Quellen. Dies ist unproblematisch, solange ein Reisender nicht umsteigen muss. Sobald er aber in einem verspäteten Zug sitzt und einen Anschluss erreichen will, kann ihm prinzipbedingt nur in seltenen Fällen eine valide Auskunft gegeben werden, ob er seine Reise wie geplant fortsetzen kann.

Ein effektives Re-Scheduling, d. h. ein Umlenken eines Reisenden im Falle eines verpassten Anschlusses, ist noch weitaus schwieriger, obwohl der Reisende, wenn er nur geeignete Informationen bekommen würde, durchaus in vielen Fällen sein Ziel noch planmäßig erreichen könnte<sup>20</sup>. Diese Aufgabe ist jedoch ohne Computerunterstützung für das Bahnpersonal nicht zu leisten. Es kann demnach konstatiert werden:

*Die Betreuung der Passagiere während einer Reise – also genau bei der Konsumption des Produkts und demnach zum entscheidenden Zeitpunkt der Wahrnehmung der Servicequalität der Bahn – ist unzureichend.*

Dies liegt vor allem darin begründet, dass der Passagier auf seiner Reise bisher weitestgehend anonym und unerreichbar bleibt, was – wiederum prinzipbedingt – zwei Ursachen hat:

1. Kundendaten werden bei der Disposition, d. h., in den Überlegungen des Disponenten nicht ausreichend bzw. nicht systematisch berücksichtigt. Telefonisch beantragte Anschlusssicherungen geben zwar immer ein Indiz, die Folgen einer Anschlusssicherung für wartende Züge sind aber dann immer noch kaum absehbar für den Disponenten.
2. Der Informations- und Kommunikationsprozess zum bzw. mit dem Kunden ist mangelhaft: Informationen können nur an bestimmten Stellen während der Reise, bspw. durch Zugbegleiter oder an Bahnhofstafeln, aktiv durch den Kunden bezogen

---

<sup>18</sup> „Aktuell“ bezieht sich dabei auf die von den automatischen Erfassungssystemen, die noch nicht flächendeckend existieren, gelieferten Zuglaufinformationen, die auch Grundlage der Ankunfts- und Abfahrtstafeln in den Bahnhöfen sind.

<sup>19</sup> Momentan besteht dabei der Nachteil, dass ein für diesen Zug gebuchtes Ticket nicht ohne Weiteres erstattet wird, wenn ein Passagier diesen, z. B. wegen einer Falschinformation, verpasst.

<sup>20</sup> Dafür lassen sich einfach Beispiele konstruieren, wenn z. B. zwischen Start und Ziel einer Reise unterschiedliche Routen existieren, deren Schnittmenge angefahrener Zwischenhalte nicht leer ist.

werden.<sup>21</sup> Sie müssen zudem vom Reisenden aktiv angefordert werden (*Pull-* statt *Push-*Prinzip). Weitaus wichtiger ist, dass Informationen unterwegs so gut wie nie individualisiert, also nicht den speziellen Wünschen und Bedürfnissen des Kunden angepasst, geliefert werden können. Auch eine Auskunft durch den Zugbegleiter bringt bestenfalls eine Aussage über einen Reiseausschnitt für einen einzelnen Passagier.

Sollen diese Missstände behoben werden, muss in die komplexen Vorgänge während des ablaufenden Zugverkehrs eingegriffen werden, welche von der Disposition gesteuert werden. Es ergeben sich direkt die beiden Komponenten dessen, was in dieser Arbeit als *kundenorientierte Disposition* verstanden wird:

- „Kundenorientierte Algorithmen zur Disposition“  
Bereits bei der Findung von Dispositionsentscheidungen können computerbasiert zuvor oder während einer Fahrt geäußerte Wünsche von Passagieren durch systematische Berechnung und Bewertung der Konsequenzen einer Dispositionsentscheidung für die beteiligten Systemelemente berücksichtigt werden. Dabei ist vollkommen unerheblich, auf welche Weise oder welchem Kommunikationsweg diese Wünsche geäußert wurden.  
Auf diese Weise kann unter anderem der Sinngehalt der oben beschriebenen Maxime, die Zugpünktlichkeit der Passagierpünktlichkeit vorzuziehen, einer kritischen Prüfung zugeführt werden.
- „Disposition der Passagiere“  
Die Information des Reisenden bzw. die Interaktion mit dem Passagier unter Zuhilfenahme der modernen, mobilen Informations- und Kommunikationstechnologie *des Kunden* kann unter der Voraussetzung eines kooperierenden Passagiers benutzt werden, um diesen durch das virtuelle und dynamische, durch den Fahrplan aufgespannte, Netzwerk zu steuern. Kooperierend meint, dass ein Passagier zwar eigene Ziele verfolgt, aber nicht prinzipiell defekt agieren wird, wenn er es vermeiden kann.

Beide Konzepte können im Prinzip voneinander getrennt betrachtet und implementiert werden, sind jedoch auf mehrere Arten eng miteinander verknüpft: Die exakte Erfassung der Verkehrslage zum aktuellen Zeitpunkt ist wichtige Voraussetzung beider Komponenten<sup>22</sup>, beide teilen sich sowohl auf konzeptioneller als auch auf der Implementierungsebene wichtige Unterkomponenten, und beide entfalten ihre volle Wirkung erst dann, wenn sie im Bahnsys-

---

<sup>21</sup> Die Möglichkeit der Nutzung des WAP-Portals der Bahn, welches ebenfalls aktuelle Zuglaufdaten aufbereitet, ist dabei nur eine eingeschränkte Hilfe: Erstens ist das Surfen mittels Handy immer noch relativ umständlich – insbesondere unter Zeitdruck – und teuer, zweitens muss der Kunde sich selbst die für ihn wichtigen Daten suchen, was immer mit Zeitverlust verbunden sein muss.

<sup>22</sup> Aus diesem Grund werden in Kapitel II auch technologische Initiativen zur Zuglaufverfolgung und Zugsteuerung skizziert.

tem zusammen und genau aufeinander abgestimmt arbeiten. Die Ideen beider Komponenten werden im nächsten Abschnitt genauer beschrieben.

#### I.4 Die Idee der kundenorientierten Disposition

Der Grundgedanke der Gewährleistung der Pünktlichkeit *der Passagiere* scheint auf den ersten Blick wenig revolutionär, zumal es in der Luftfahrtindustrie schon seit langem ähnlich praktiziert wird<sup>23</sup>, eröffnet jedoch für die Bahndisposition vollkommen neue Handlungsmöglichkeiten: Wenn es gelingt, die von einem verpassten Anschluss betroffenen Passagiere über alternative Routen doch noch pünktlich an ihr Ziel zu bringen, dann kann ein Anschlusszug losfahren, ohne verspätet zu werden und damit in seinem weiteren Zuglauf Verspätungen zu induzieren. Ebendies gilt natürlich, wenn in einem Zubringer eventuell gar keine Passagiere für einen wartenden Abbringer<sup>24</sup> sitzen. Nach dem gegenwärtigen Stand in der Bahndisposition wird dies dem Disponenten aber erst dann bekannt, wenn der „Zugchef“ – Leiter der Zugbegleiter im Fernverkehr – aus einem fahrenden Zug heraus Anschlusssicherung bzw. *keine* Anschlusssicherung beantragt. Würde er jedoch schon die Passagiere des verspäteten Zugs oder zumindest deren Reiserouten kennen, könnte er a priori Maßnahmen ergreifen, die ein pünktliches Ankommen aller Reisenden gewährleisten. Zusätzlich könnte er Passagiere frühzeitig über die Dispositionsentscheidungen und deren Konsequenzen für diese informieren. Beides zusammen drückt sich in der folgenden Definition aus.

**Definition:** Unter *kundenorientierter Disposition* werden dispositive Maßnahmen zusammengefasst, die Züge und Passagiere mit dem Ziel der Erhöhung der Passagierpünktlichkeit durch das dynamische Netzwerk der Bahn steuern.

Maßnahmen zur Steuerung von Zügen unter Berücksichtigung der Passagierpünktlichkeit werden zwar präziser, umso mehr Informationen sie über Passagiere berücksichtigen, kommen aber zunächst ohne geänderte Informations- und Kommunikationsstrategien von und mit Passagieren aus.

Will man hingegen Passagierdisposition betreiben, so müssen diese wenigstens extrem schnell über ihre persönliche Reisesituation informiert werden können. Zur Verfolgung von Passagierrouuten bietet sich im zweiten Schritt an, Rückmeldungen von Passagieren über ihren Reiseverlauf und später ihre Reise zu sammeln. Dies schafft einerseits ein Gefühl des „Betreutwerdens“ bei Passagieren und andererseits längerfristig eine präzise Datenbasis für Planung und Marketing des Bahnbetriebs.

---

<sup>23</sup> Die Luftfahrtindustrie ist also z. T. Ideengeber für die vorliegende Arbeit. Die dort verwendeten Dispositionsmethoden sind jedoch wenig standardisiert und werden meist manuell durchgeführt. Dies ist möglich, weil Luftverkehrsgesellschaften im Vergleich bspw. zur Deutschen Bahn AG im Transportaufkommen eher klein sind.

<sup>24</sup> Zur Definition der wichtigsten Begrifflichkeiten dieser Arbeit vgl. Abschnitt II.2

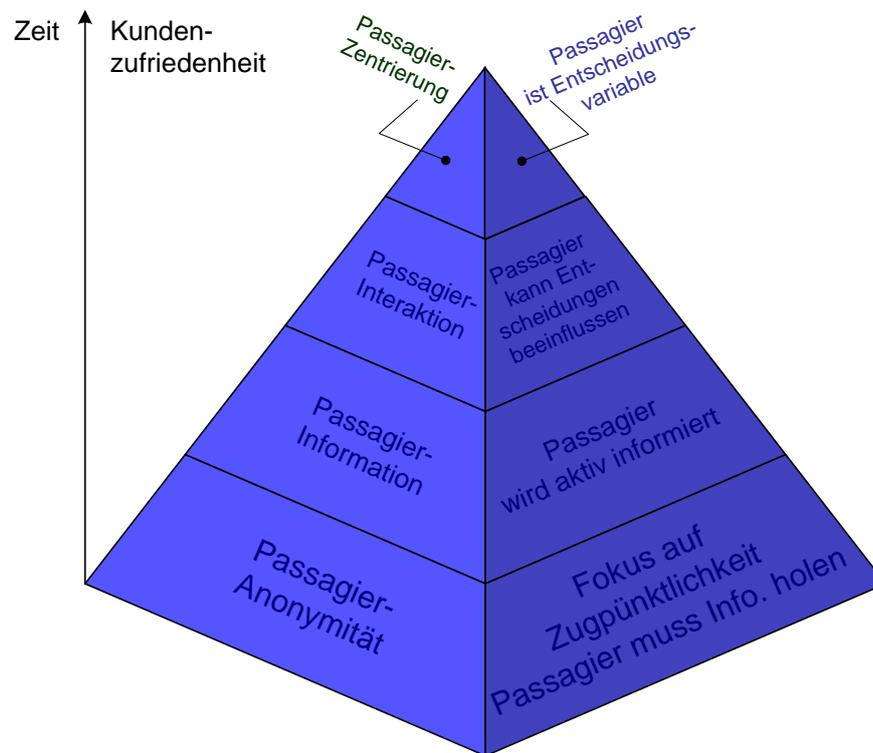


Abbildung 1: Stufen kundenorientierter Disposition

Abbildung 1 gibt einen Überblick über verschiedene (Ausbau-) Stufen der kundenorientierten Disposition. Während sich momentan der Passagier als unbekanntes Wesen durch das Bahnnetz bewegt, kann er mit zunehmendem „Bekanntheitsgrad“ spezifischer, d. h. seinen Bedürfnissen angepasster, informiert werden. Gleichzeitig ermöglicht dieses Kennenlernen Dispositionsalgorithmen, welche den Passagier apriorisch berücksichtigen und demzufolge im Sinne des Kunden bessere Entscheidungen treffen.

### I.4.1 Kundenorientierte Dispositionsstrategien

Kundenorientierung bei der Disposition setzt die organisatorische Möglichkeit zur Berücksichtigung von Kundenwünschen durch den Disponenten voraus.

Aufgrund der Vielzahl von zu betrachtenden Objekten – pro Tag benutzen ca. 4,5 - 5 Mio. Passagiere Züge der Deutschen Bahn – scheint es sinnvoll, dem Disponenten dazu ein computerbasiertes, die relevanten Informationen filterndes und aufbereitendes *Entscheidungsunterstützungssystem* (EUS) zur Seite zu stellen, um ihm die eigentliche Antwort auf die Frage, ob ein bereiter Zug abfahren soll, zu erleichtern.

Informationen können dabei verschiedener Art sein und auf verschiedenen Wegen zum Disponenten gelangen. Z. B. können Anschlusssicherungsanträge, statistische Berechnungen,

aktuelle Verspätungslagen in anderen Netzbereichen, Sonderereignisse usw. automatisiert in die Entscheidung einbezogen werden. Anschließend können die Konsequenzen verschiedener Entscheidungsalternativen algorithmisch bestimmt und mittels diverser denkbarer Zielkriterien bewertet werden.

**Definition:** Ein Algorithmus, der nach einem definierten Bewertungsmaßstab eine Dispositionsentscheidung berechnet, wird im Kontext dieser Arbeit als *Dispositionstrategie* bezeichnet.

In der vorliegenden Arbeit werden zur Bestimmung des Abfahrzeitpunkts einige einfache Strategien sowie ein paar komplexere Methoden vorgeschlagen und getestet, ohne dabei den Anspruch zu stellen, eine sehr gute oder gar optimale Strategie zu finden. Immerhin wird gezeigt, dass die oben vorgestellte Strategie „Nie Warten“ eben nicht unbedingt die beste Alternative darstellt, gemessen an der Pünktlichkeit der beteiligten Passagiere. Dabei werden bewusst Methoden mit niedrigem Informationsbedarf bevorzugt und simulativ miteinander verglichen.

Strategisch gesehen versetzt eine derartige Weiterentwicklung wie die Einführung kundenorientierter Dispositionsstrategien und der Reisendensteuerung in den Dispositionsprozess die Bahn unter anderem in die Lage, ggf. fällig werdende Entschädigungen im Falle großer erlittener Verspätungen und verpasster Anschlüsse im Vorhinein zu berechnen: Jede Entscheidung könnte prinzipiell sogar *monetär* bewertet werden, was die Bedeutung guter Dispositionsstrategien dramatisch erhöht.

Es ist tautologisch, dass die Qualität der Entscheidung mit der Qualität der Entscheidungsgrundlage und damit mit der Genauigkeit zur Verfügung stehender Daten steigt. Daher sollten langfristig auch Informationen über individuelle Reisewünsche von Passagieren gesammelt bspw. am Fahrkartenschalter oder bei der Internetbuchung, im angesprochenen EUS Berücksichtigung finden. Später kann dieses dann die Grundlage für ein weiteres Hauptergebnis dieser Arbeit liefern, das faktische Re-Engineering des Kommunikationsprozesses mit dem Kunden während der Fahrt.

## 1.4.2 Disposition der Passagiere

Zur Information des bzw. Interaktion mit dem Passagier, um ihn durchs dynamische Bahnnetz zu steuern, stehen heutzutage diverse mobile Kommunikationsendgeräte zur Verfügung, von mittlerweile sehr weit verbreiteten Mobiltelefonen über „persönliche, digitale Assistenten“ (PDA, vgl. Kapitel V)) bis hin zu Mobilcomputern mit Internetanschluss. Für diese Arbeit wird unterstellt, dass sich Endgeräte mit Interaktionsmöglichkeit – bspw. Mobiltelefon mit Internetbrowser – weiter verbreiten werden, ohne dass im Weiteren die Berücksichtigung von Reisenden, die lediglich erreicht werden können (z. B. per SMS<sup>25</sup>) vernachlässigt würde.

---

<sup>25</sup> Nähere Information zum Thema SMS finden sich in Kapitel V.

Die Idealvorstellung des Disponenten, den Reisenden auf seiner Route technisch zu verfolgen, indem dieser z. B. seine mittels GPS bestimmte Position ständig (oder auf Anfrage) an den Disponenten übermittelt, wird hier, bis auf die Klärung der technischen Machbarkeit, allerdings nicht weiter verfolgt: Es ist absolut ausreichend zu wissen, in welchem Zug sich der Reisende zu einem bestimmten Zeitpunkt aufhält.

Die informationstechnisch aufwändige Erfassung einzelner Kunden ist allerdings kein Selbstzweck dieser Arbeit oder der kundenorientierten Disposition, sie ist vielmehr auch für einen Bahnanbieter von enormer strategischer Bedeutung: Nur so kann er gesicherte Erkenntnisse über die Kunden und ihre Gewohnheiten erlangen, um z. B. die Produktplanung zu erleichtern oder systematischer als bisher den Fahrplan zu optimieren. Die bisherige Produktionsplanung ist im Detail aufgrund der geringen Verfügbarkeit solchen Datenmaterials sehr schwierig (vgl. Kapitel II).

Eine der wichtigsten Anwendungen ist das z. B. in der Luftfahrt seit langem verbreitete *Revenue-Management*, welches früher unter der Bezeichnung *Yield-Management* bekannt war<sup>26</sup>, einer besonderen Form der Kapazitätssteuerung durch Preisdifferenzierung. Nach [Gabler 2001] kann Revenue- (Yield-) -Management als „die dynamische Steuerung der Preise und Kapazitäten, um eine vorgegebene Gesamtkapazität gewinnoptimal zu nutzen“ definiert werden. Grundgedanke ist, durch eine sehr flexible und dynamische Anpassung der Preise kurzfristig auf steigende bzw. fallende Nachfrage zu reagieren. Dies erfordert insbesondere den Einsatz computergestützter Vertriebssysteme, die einerseits einen sehr genauen Überblick über das Nachfrageverhalten ermöglichen und zum anderen automatisiert Angebote ermitteln, sodass auch eine große Vielfalt von Tarifen überschaubar bleibt (zu Yield-Management vgl. auch [Daudel/Vialle 1994]). Die Versuche der Deutschen Bahn, dieses System in der Preisstruktur über Frühbucherrabatte und speziellen Rabatten bei der Nutzung dedizierter Züge – nicht Verbindungen – zu integrieren, bezeugt das hohe Interesse der Bahn an solchen Methoden<sup>27</sup>. Ein nicht zu vernachlässigender Unterschied ist allerdings das im Durchschnitt niedrigere Preisniveau bei Bahngesellschaften, welches für eine Optimierung zwangsweise weniger Spielraum lässt.

### **I.4.3 Vorteile kundenorientierter Disposition**

Zusammenfassend können mit expliziter Einbeziehung der Kunden in den Dispositionsprozess neben einer verbesserten Informationslage für die Kunden und daraus resultierender erhöhter Pünktlichkeit der Passagiere somit gleich mehrere positive Seiteneffekte erzielt werden:

---

<sup>26</sup> Der frühere Begriff „Yield“ war eher in der Luftfahrt gebräuchlich, ist aber mittlerweile auch dort durch den auch Laien verständlichen Term „Revenue“ ersetzt worden.

<sup>27</sup> Dabei wurde nach Meinung des Autors jedoch übersehen, den Kunden die Vorteile dieses Vorgehens – in der Hauptsache günstigere Tarife, aber auch die Möglichkeit zur Optimierung des eigenen Angebots – ausreichend deutlich zu machen. Maßnahmen der kundenorientierten Disposition können in diesem Kontext gleichsam als Lockangebot – Daten gegen Pünktlichkeit – betrachtet werden.

- Eine automatisierte Ausgabe individualisierter Fahrgastinformation entlastet das Personal, einhergehend mit sinkenden Kosten je Auskunft.
- Kurzfristig wird die Kundenbindung erhöht, weil Passagiere individuell durch das Bahnsystem begleitet werden können.
- Eine Optimierung des Planungsvorgangs aufgrund verbesserten Datenmaterials führt langfristig zu einer besseren Angebotsstruktur: Bedarfe können zielgenauer bedient, Überkapazitäten können abgebaut werden. Zudem wird die Flexibilität der Disposition erhöht.
- Im Sinne des Revenue-Management können individuelle Rabatte und Bepreisungen für einzelne Kunden oder Kundengruppen definiert werden.
- Zudem wären andere Arten der Abrechnung von Reisen denkbar: Das Ausdrucken von Fahrkarten und deren Verkauf könnte für Passagiere, die auf einem mobilen Endgerät z. B. einen gültigen Code für eine Reise vorweisen können, komplett entfallen. Dies würde Vielfahrern und Spontanutzern der Bahn viel Zeit in Warteschlangen vor Schaltern oder Bearbeitungsgebühren im Zug ersparen. Auch eine Bezahlung per Mobiltelefon ist als Alternative denkbar.
- Die Kundenzufriedenheit würde durch einen besseren Betreuungsgrad erhöht werden, was u. U. längerfristig zu einer verbesserten Kundengewinnung führen könnte.
- Die Passagierinformation könnte als Marketinginstrument für die Individualwerbung genutzt werden. Dies wäre u. U. eine mögliche Finanzierungsquelle für den Informationsservice.

## **I.5 Ziele und Aufbau der Arbeit**

Es erscheint also sinnvoll, das Konzept der kundenorientierten Disposition eingehender zu untersuchen und gleichsam mit „Leben zu füllen“. Die Integration der Kundenorientierung in ein derart komplexes Umsystem wie die Disposition der Bahn ist jedoch nicht trivial und erfordert in praxi die Lösung zahlreicher Teilprobleme. Weil diese im Rahmen einer Dissertationsschrift nicht alle bearbeitet werden können, sollen Zielsetzung und Strukturierung der vorliegenden Arbeit nachfolgend expliziert werden. Ebenfalls ist abzugrenzen, welche Themenbereiche *nicht* behandelt werden.

### **I.5.1 Zielsetzung und -abgrenzung**

Die kundenorientierte Disposition als Konzept allein ist vor dem Hintergrund des Fachgebiets der Wirtschaftsinformatik wenig nützlich, wenn nicht auch die Umsetzbarkeit in der Realität unter Beweis gestellt oder zumindest plausibel gemacht wird. Dies kann sinnvoll nur durch Entwurf und prototypische Realisierung eines Softwaresystems zur Entscheidungsunterstützung geschehen, welches die vorgeschlagenen Neuerungen implementiert. Folgerichtig untergliedert sich die Zielsetzung dieser Arbeit auf oberster Ebene in drei Zielkomplexe:

1. Zunächst soll ein der Thematik angemessener Einblick in Aufbau und Abläufe inner-

halb des Bahnsystems sowie in die Produktionsplanung und, insbesondere, die Produktionssteuerung, also die Disposition, im schienengebundenen öffentlichen Personenverkehr gegeben werden. Dieses soll sowohl auf theoretischer als auch auf praktischer Ebene erfolgen. Zudem sollen existente Ansätze der Kundenorientierung auf ihre Verwertbarkeit analysiert werden. Anhand der in der Praxis durchgeführten Dispositionsvorgänge sollen Schwachstellen des aktuellen Prozesses sowie Potenziale informationstechnischer Optimierungen abgeleitet werden, aus denen die Anforderungen an ein System zur kundenorientierten Disposition resultieren.

2. Dieses System setzt natürlicherweise die Konzeption einer geeigneten Systemarchitektur für die kundenorientierte Disposition, die den informationstechnischen Anforderungen der Problemstellung genügt und zur Behebung identifizierter Schwachstellen beitragen kann, voraus. Damit ist bei weitem nicht nur ein Softwaresystem gemeint. Es sind vielmehr auch aufbau- und ablauforganisatorische Rahmenbedingungen des Realsystems zu berücksichtigen. Unter anderem steht dabei die Entwicklung sinnvoller Dispositionsstrategien im Mittelpunkt der Betrachtung.

Unterziele sind hier

- Spezifikation einer tauglichen, d. h. allen Anforderungen gerecht werdenden, System-, Informations- und Kommunikationsinfrastruktur in Form eines echtzeitfähigen Systems zur kundenorientierten Disposition
  - Herleitung geeigneter Kriterien zur Bewertung der Kundenfreundlichkeit einer Dispositionsentscheidung
  - Spezifikation, Implementierung und Test geeigneter Algorithmen zur kundenorientierten Disposition
  - Maßgaben für die Validierung des Systems per Spezifikation und Implementierung einer geeigneten Simulationstestumgebung
3. Der Nachweis der Funktionsfähigkeit des konzipierten Systems ist das dritte große Ziel der vorliegenden Arbeit. Es müssen demnach an geeigneten Demonstratoren bzw. prototypischen Implementierungen diverser Systembausteine Experimente durchgeführt werden.

Teilziele sind hier

- Nachweis der Belastbarkeit der entwickelten Systemarchitektur
- Nachweis der Eignung der abgeleiteten Dispositionsstrategien zur Verkürzung der Wartezeiten von Passagieren im Vergleich zur derzeitigen Vorgehensweise

Dabei liegt das Interesse weniger auf einer gründlichen statistischen Analyse der Ergebnisse – aufgrund der anzunehmenden Unsicherheiten in vielen Inputdaten<sup>28</sup>

---

<sup>28</sup> Bspw. liegen keine exakten Daten über die *genauen* Passagierbewegungen im Realsystem vor; diese sind jedoch unabdingbar zum Test von Strategien, welche einzelne Passagierrouen berücksichtigen sollen.

ist es schlicht nicht sinnvoll, quantitative Aussagen auf diese Art zu untermauern – als vielmehr im Plausibilisieren qualitativer Aussagen.

Die bei der Problemlösung zu behandelnden Teilgebiete sind vielschichtig, sodass die vollständige Darstellung aller dieser Teilgebiete weder erfolgen soll noch erfolgen kann; dies bleibe tiefer gehenden Arbeiten innerhalb der einzelnen Disziplinen vorbehalten. Nichtsdestoweniger soll natürlich alles dem Problemverständnis Zutragliche *angemessen* gründlich und korrekt dargestellt werden.

Maßgeblich für alle Betrachtungen dieser Arbeit ist die Deutsche Bahn AG, gleichsam als *kanonisches Beispiel*, weil sie aufgrund der schieren Größe und Komplexität einen hervorragenden Testfall für die in dieser Arbeit entwickelten Systeme darstellt: Bspw. wird jegliche Experimentation in den Kapiteln IV und V unter Zuhilfenahme realer Daten der DB AG durchgeführt. Gleichwohl sind fast alle der aufgeführten Ergebnisse und entwickelten Systeme mit vergleichsweise wenig Änderungsaufwand auch auf andere Bahnsysteme übertragbar, auch wenn dies nicht explizit vermerkt ist.

## 1.5.2 Aufbau der Arbeit

Den Zielsetzungen entsprechend ergibt sich die nachfolgend beschriebene Strukturierung der vorliegenden Arbeit<sup>29</sup>:

Das sich anschließende *Kapitel II* widmet sich in erster Linie theoretischen und praktischen Überlegungen zu Themen, die für die „kundenorientierte Disposition bei der Bahn“ relevant sein können. Es werden die für das weitere Vorgehen notwendigen Grundlagen gelegt, indem zunächst das „System Bahn“ in seiner Komplexität beschrieben wird. Anschließend werden die Disposition und ihre Rolle im Produktionsplanungs- und -steuerungsprozess im schienen gebundenen ÖPV sowohl aus theoretischer Sicht als auch anhand der konkreten Abläufe der Deutschen Bahn AG erörtert. Dabei werden u. a. einige Ansätze aus der Literatur zitiert, welche manche der hier verwendeten Ideen, wenngleich in abgewandelter Form, beinhalten. Aus praktischer Sicht werden bspw. die Abläufe in einer Betriebszentrale einer Regionalbahngesellschaft geschildert. Das Kapitel schließt mit der Darstellung von Anforderungen an ein System zur kundenorientierten Disposition.

*Kapitel III* konzipiert unter Berücksichtigung der Anforderungen aus Kapitel 2 die Systemarchitektur für ein kundenorientiertes Dispositionssystem. Dazu wird ein an der Technologie intelligenter Softwareagenten orientierter Ansatz verwendet. Es werden diejenigen Module, die einen besonderen Stellenwert im System genießen, betont: Der Kernbestandteil des Systems ist der Dispositionsagent, der in der Lage ist, nach diversen Strategien und unter Zuhilfenahme einiger im System agierender Hilfsagenten – ebenfalls dort beschrieben – bestmögliche Dispositionsentscheidungen zu treffen. Ein wichtiger Hilfsagent ist z. B. der Passagierrouter zum Re-Scheduling von Passagieren im laufenden Betrieb.

---

<sup>29</sup> Der beschriebene Aufbau verfolgt den Ansatz, benötigtes Fachwissen, z. B. über intelligente Softwareagenten oder die mathematische Optimierung, nicht vorauszusetzen, sondern an den Stellen, an denen dieses Wissen benötigt wird, exkursiv darzulegen, um die Arbeit damit einem breiteren Leserkreis zu erschließen.

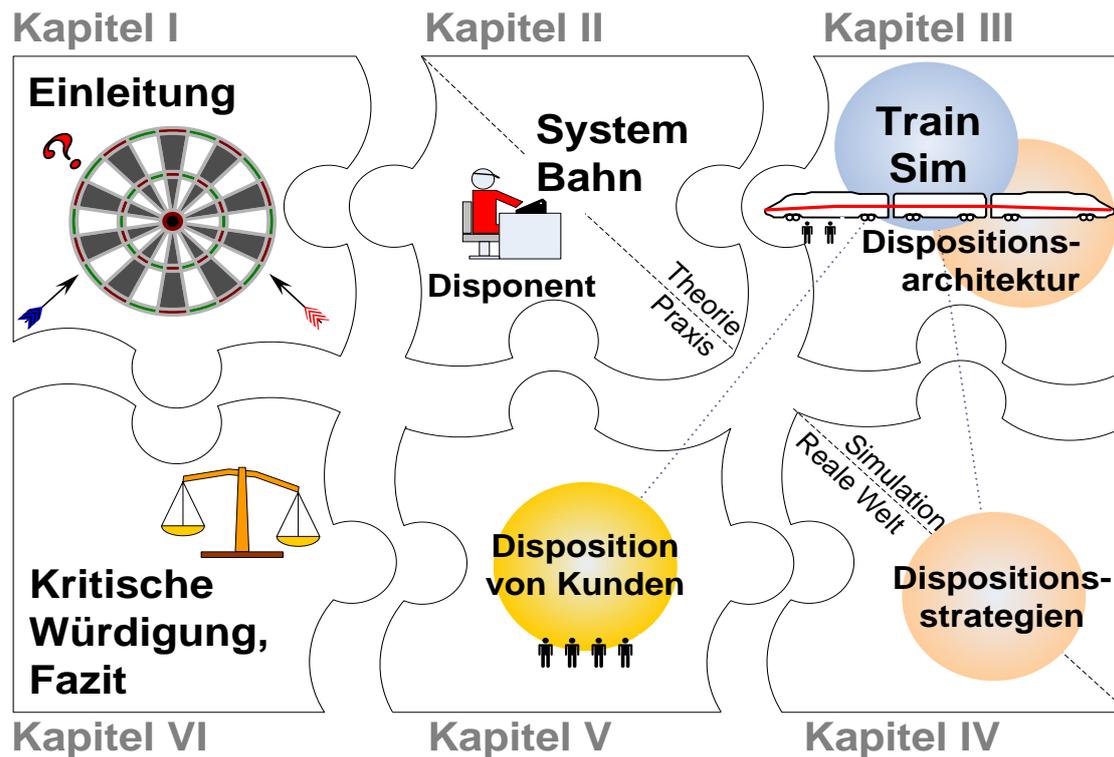


Abbildung 2: Aufbau der vorliegenden Arbeit

Ein weiteres Ergebnis der Arbeit ist das zum Test für die kundenorientierte Disposition entwickelte Simulationssystem *TrainSim*, welches im Anschluss detailliert erläutert wird. Dabei wird auch ein Einblick in die Grundlagen der diskreten, ereignisorientierten Simulation vermittelt, um einige Vorgehensweisen im praktischen Teil dieser Arbeit – einer Simulationsstudie – verständlich zu machen.

*Kapitel IV* behandelt den bahenseitigen Teil der kundenorientierten Disposition. Zunächst werden kurz einige prinzipiell anwendbare Verfahren zur Berechnung von Dispositionsentscheidungen erläutert, anschließend wird ein Bewertungsrahmen für Dispositionsentscheidungen hergeleitet. Beispielhaft werden im Anschluss einige triviale, aber auch einige nicht-triviale Dispositionsstrategien vorgestellt. Erstere sind einfache Heuristiken<sup>30</sup>, die mit jeweils unterschiedlich hohem Informationsbedarf Dispositionsentscheidungen treffen. Zu letzteren zählen z. B. die simulative What-If-Analyse und die mathematische Optimierung sowohl als Verfahren für den laufenden Betrieb als auch zur Ex-post Untersuchung anderer Strategien.

*Kapitel V* ist das letzte Inhaltskapitel der Arbeit. Es beschreibt neben den Grundlagen der Mobiltechnologie auch ein flexibles Informations- und Interaktionssystem für Kunden, welches die Passagierdisposition ermöglichen kann. Da der Innovationsgehalt eines solchen Systems an sich nicht allzu hoch ist, wird auf eine ausführliche Darstellung verzichtet. Allerdings wird auch ein System vorgestellt, welches schon vor einigen Jahren im Testbetrieb mit realen

<sup>30</sup> Zur Begriffsdefinition vgl. Kapitel IV.

Betriebsdaten der Bahn gearbeitet hat. Damit soll die prinzipielle Realisierbarkeit des hier ausgebreiteten Konzepts demonstriert werden.

Die Arbeit schließt mit einer kritischen Würdigung, welche die wichtigsten Ergebnisse und Erkenntnisse zusammenfasst und deren Relevanz beurteilt, weiteren Forschungsbedarf nennt und einen Ausblick auf mögliche Systemerweiterungen gibt. Bspw. werden dort einige Aspekte einer eventuellen Umsetzung dieses Systems in die Praxis erörtert, worunter auch wirtschaftliche Gesichtspunkte fallen.

In den Kapiteln III - V werden exkursiv die zum Verständnis notwendigen theoretischen Grundlagen gelegt. Ausführlichere Darstellungen einzelner Sachverhalte sind zur Erhaltung der Stringenz des Vorgehens angehängt. Der Aufbau der Arbeit wird in Abbildung 2 mit den Abhängigkeiten der verschiedenen Kapitel verdeutlicht.

## **I.6 Wissenschaftlicher Beitrag**

Nach Mertens zählen zu den Kerngegenständen der Wirtschaftsinformatik intelligenter Entwurf und Einsatz von Informations- und Kommunikationssystemen zur Prozessoptimierung innerhalb des wirtschaftlichen Umfelds (vgl. [Mertens et al. 2002], S. 31ff.).

Selbstverständnis der vorliegenden Arbeit ist genau dieses: Es soll eine an den Möglichkeiten moderner Software- und Kommunikationstechnologie orientierte, leistungsfähige und flexible Systemarchitektur konzipiert werden, die in einem wissenschaftlich bisher wenig beachteten Umfeld eine entscheidende Prozessverbesserung leisten kann, selbst wenn einige der für die Implementierung unterstellten Voraussetzungen in der Praxis noch nicht gegeben sind. Dabei ergeben sich nach dem Kenntnisstand des Autors wissenschaftliche Neuerungen gleich an mehreren Stellen der Arbeit:

- 1) Die kundenorientierte Disposition stellt als solches ein für den schienengebundenen Verkehr neues Forschungsgebiet dar.
- 2) Der in dieser Arbeit gewählte dezentrale Dispositionsansatz „Steuerung der Züge und Passagiere durch auf verschiedene Regionen verteilte (Software-) Agenten“ ist zwar im System der Bahn bereits vorhanden, ist in dieser Arbeit aber durch die gewählte Softwarearchitektur beliebig skalierbar. Prinzipiell ist sowohl eine vollkommen zentralisierte Disposition durch einen einzelnen, das komplette Netz beobachtenden Agenten, als auch eine vollkommen dezentrale Disposition durch verhandelnde, autonome Zugagenten möglich.
- 3) Die softwareagentenbasierte Gesamtsystemarchitektur ist ein in dieser Größenordnung bisher selten realisiertes Anwendungsbeispiel für Multiagentensysteme.
- 4) Ein systematischer Kriterienrahmen zur Erstellung von Dispositionsstrategien und ein Werkzeug zur Abschätzung der Qualität von Dispositionsentscheidungen liegen bisher nicht vor.
- 5) Die Architektur des Systembestandteils „Disponent“ zur Generierung pseudo-optimaler Dispositionsentscheidungen in Echtzeit ist neuartig, das dabei auftretende

Online-Optimierungsproblem wurde in dieser Art noch nicht behandelt.

- 6) Die Lösung von mathematischen Optimierungsmodellen *in Echtzeit* für Steuerungsaufgaben ist in diesem Anwendungsfeld noch nicht erfolgt.
- 7) Die umfangreichen Simulationen des Deutschen Bahnsystems auf Passagierebene, die der Validation zugrunde liegen, sind in dieser detaillierten Weise noch nicht durchgeführt. Es können zum ersten Mal die momentan eingesetzten einfachen Regelsysteme (vgl. Kapitel II) effektiv überprüft werden. Allein diese Möglichkeit würde die vorliegende Arbeit rechtfertigen. Darüber hinaus wird aber ein System vorgestellt, mit dem quasi jede denkbare und sinnvolle Strategie zur Disposition überprüft werden kann (vgl. Kapitel III).

Nach Meinung des Autors handelt es sich demnach um eine sowohl theoretisch als auch praktisch höchst relevante Problemstellung, die es in den nächsten Kapiteln zu untersuchen und bestmöglich zu lösen gilt.



## II Bestandsaufnahme: Die Disposition im Kontext eines Bahnsystems

*Get your facts first, and then you can distort 'em as you please.*

Marc Twain

Die Disposition geschieht nicht kontextlos. Sie ist eingebettet in eine komplexe Aufbau- und Ablauforganisation, deren ausführliche Beschreibung den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde. Nichtsdestoweniger ist es angebracht, das System, innerhalb dessen die Disposition stattfindet, und natürlich die Disposition selbst exakt vorzustellen, bevor die eigentlichen Innovationen dargestellt werden können. Das folgende Kapitel dient genau diesem Zweck.

Nachfolgend soll daher zunächst ein kurzer Einblick in die Deutsche Bahn AG gegeben werden; anschließend werden die Begrifflichkeiten eines Bahnsystems erörtert. Der Produktionsplanungs- und -steuerungsprozess in seiner Gesamtheit bildet den nächsten Betrachtungsschwerpunkt, bevor die Disposition, sowohl als Bestandteil dieses Prozesses als auch als Hauptforschungsgebiet dieser Arbeit, vertieft wird. Insbesondere soll dabei auch geklärt werden, ob die technologischen Voraussetzungen für die kundenorientierte Disposition gegeben sind, wobei dies der einzige Abschnitt zur *Bahntechnologie* bleiben wird.

### II.1 Die Deutsche Bahn AG

Mit der Neustrukturierung der Deutschen Bahn AG in der „großen Bahnreform“ im Februar 1989 sollte der monolithische, bundeseigene Bahnkonzern an Dynamik gewinnen. Ziel war die Schaffung eigenverantwortlicher Ressorts als Profitcenter, die selbständig ihr Budget verwalten und in gegenseitigen Dienstleistungsverhältnissen stehen. Dadurch sollte der Weg für mehr Wettbewerb geebnet werden, der wiederum eine Kostensenkung bewirken und eine Teilprivatisierung im regionalen Bereich vorbereiten sollte. Im Januar 1994 wurde dann die Deutsche Bahn AG als Holding gegründet.

Neben der Privatisierung legte die Bahnreform die institutionelle Trennung verschiedener Funktionsbereiche der Deutschen Bahn fest: Es wurden verschiedene Aktiengesellschaften gegründet, welche seitdem die einzelnen Geschäftsfelder der Bahn bilden. Die Deutsche Bahn AG als Holdinggesellschaft hält jeweils 100 % der Anteile an ihren Töchtern. Die für den weiter unten erörterten Produktionsprozess der Bahn schwerwiegendsten Konsequenzen hat die organisatorische Trennung von Netz und Transport<sup>31</sup>. Prinzipiell lassen sich Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU) und Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) unterscheiden.

---

<sup>31</sup> Die Forderung einer Trennung von Infrastrukturbetrieb und Transport ist in der EU-Richtlinie 91/440 zur „Entwicklung der Eisenbahnunternehmen in der Gemeinschaft“ festgeschrieben. Trotzdem ist diese Trennung umstritten. Der wissenschaftliche Beirat des Verkehrsministeriums spricht sich in [Wiss. Beirat 2002] klar für die Trennung aus. Nach Meinung des Autors ist die Trennung prinzipiell vorteilhaft, da auf dieser Weise ein regulierbarer Wettbewerb auf der Schiene entstehen kann. In praxi hat sie durchaus negative Konsequenzen,

Zu den EIU zählen die *DB Netz AG* und die *DB Station & Service AG*. Die *DB Netz AG* besitzt die gesamte Schieneninfrastruktur und stellt sie den EVU zur Verfügung, indem sie ihnen bestimmte Abschnitte für eine gewisse Zeitspanne vermietet. Diese Abschnitte werden *Fahrplantrassen* genannt. Genauer wird eine Fahrplantrasse „als der Teil einer Infrastruktur definiert, der benötigt wird, um eine bestimmte Zugfahrt auf einer bestimmten Strecke innerhalb eines bestimmten Zeitraumes durchzuführen“ ([Gröger 2002], S. 24). Notwendigerweise ist die *DB Netz AG* auch für die Steuerung des Betriebs auf der Schieneninfrastruktur zuständig. Unter anderem stellt sie Leit- und Sicherungstechnik bereit, übernimmt die Störungsbehandlung im Betriebsablauf und ist in diesem Sinn eine für diese Arbeit wichtige Dispositionsinstanz.

Obwohl zu vermuten wäre, dass die *DB Netz AG* als Privatunternehmen Investitionen, die für den Bahnbetrieb, also insbesondere den Erhalt und den Neubau der Infrastruktur, nötig sind, aus eigenen Mitteln finanziert – schließlich nimmt sie durch den Verkauf von Fahrplantrassen ein – ist dies nicht der Fall: Sie ist zwar *Besitzer* der Schieneninfrastruktur, aber „der Bund trägt gemäß Art. 87e Abs. 4 GG für Ausbau und Erhalt des Schienennetzes der Eisenbahnen des Bundes Sorge. Er finanziert Investitionen in diese Schienenwege nach § 8 Abs. 1 Bundesschienenwegeausbaugesetz; die Investitionen umfassen Bau, Ausbau sowie Ersatzinvestitionen (Bestandsnetzinvestitionen).“ ([BMVBW 2003], S. 45)<sup>32</sup>. Die Planung des Schienennetzes liegt damit in öffentlicher Hand. Sie wird jeweils im „Bundesverkehrswegeplan“ publiziert.<sup>33</sup>

Die *DB Station & Service AG* besitzt alle Bahnhöfe im Gebiet der Deutschen Bahn AG und ist für deren Betrieb und Wartung zuständig. Sie wickelt zudem alle zugehörigen Dienstleistungen ab, u. a. die Information der Reisenden über Bahnhofstafeln und den Fahrkartenerwerb an Schaltern und Automaten. Damit hat sie nur indirekt ebenfalls Kontakt mit der Disposition, weswegen sie für diese Arbeit nicht weiter relevant ist.

Die *DB Fernverkehr AG* im Personenfernverkehr, die *DB Regio AG* im Personennahverkehr und die *Railion Deutschland AG* (ehemals *DB Cargo*) im Güterverkehr sind die verschiedenen Schienenverkehrsunternehmen der Bahn. Sie führen die eigentlichen Transport- und Logistikaufgaben durch. Dazu kaufen sie die benötigten Dienstleistungen und die Erlaubnis zur Nutzung der Infrastruktur bei den EIU ein. Jedes dieser Unternehmen unterliegt ebenfalls der Notwendigkeit der Disposition. Dabei werden jeweils unterschiedliche, zum Teil konfligierende Ziele verfolgt, nämlich den jeweils eigenen Kundenkreis zufrieden zu stellen. Bei Ressourcenkonflikten muss dann im Einzelfall entschieden werden, welcher Zug Vorrang

---

bspw. bei Konflikten während der Durchführung des Fahrplans. Auch die Disposition selbst wird unter Umständen erschwert, da nun verschiedene Organisationen dieselben Ressourcen disponieren (vgl. Abschnitt II.4).

<sup>32</sup> Dies ist keineswegs ein besonderer Vorteil für das Verkehrsmittel Bahn. Im Vergleich mit den konkurrierenden Verkehrsmitteln PKW und LKW wird bspw. deutlich, dass auch in jenem Sektor die Verkehrsinfrastruktur vom Staat zur Verfügung gestellt wird.

<sup>33</sup> [BMVBW 2003] gibt derzeit den Stand der Planung wieder. Letztere wird jedoch wegen der hohen Ausfälle bei der LKW-Maut noch einiger Streichungen bzw. zeitlichen Verschiebungen unterzogen werden.

hat. Dabei kann es nach Erfahrung des Autors durchaus vorkommen, dass ein ICE (Intercity-Express) auf einen Güterzug warten muss.

Neben diesen drei Bahntöchtern können auch private EVU Fahrplantrassen erwerben, wie es explizites Ziel der Trennung von Netz und Transport war. Es sollte der Wettbewerb verschiedener Eisenbahnunternehmen ermöglicht werden, um durch Konkurrenz Effizienzpotenziale zu heben. Daher wurde die DB Netz AG gesetzmäßig dazu gezwungen, auch DB-fremden Unternehmen einen „diskriminierungsfreien Zugang“ zu Fahrplantrassen zu gewähren. Dies hat hauptsächlich im Regionalverkehr funktioniert: Bspw. bietet das private Unternehmen „Connex“ bereits einige Relationen an.<sup>34</sup>

Der Ansatz dieser Arbeit wird durch das faktische Vorhandensein verschiedener EVU im Schienennetz nicht berührt. Auf konzeptioneller Ebene kann von einer einzigen Dispositionsinstanz ausgegangen werden, welche die verschiedenen Interessen aller Beteiligten kennt.



Abbildung 3: Aufbau Deutsche Bahn AG ab 2005 (s. [DB 2005a])

Zusätzlich zu den genannten existieren weitere Tochterunternehmen, die eine stärkere Kompetenzbündelung durch Spezialisierung und verstärkten Wettbewerbsdruck realisieren sollen. So wurde bspw. 2002 die *Stinnes AG* als bedeutender Logistikdienstleister auf der Straße akquiriert, um im Güterverkehr Kundenanforderungen besser erfüllen zu können.

Ab 2005 schließlich wurde der Aufbau der DB AG wieder in Richtung der verschiedenen Funktionsbereiche geändert. Eine Übersicht der Konzernstruktur zeigt Abbildung 3 (Stand 2005).

Betrachtet man die Deutsche Bahn AG anhand einiger Kennzahlen, wird die schiere Größe des Konzerns deutlich. Für das Jahr 2004 ergaben sich nach [DB 2005h] die in Tabelle 3 er-

<sup>34</sup> Ein Erfahrungsbericht des Unternehmens Connex findet sich in [Dewald et al. 2001].

sichtlichen Daten und deren Änderungen gegenüber 2003. Selbst die Netze großer Fluggesellschaften sind im Vergleich dazu relativ einfach strukturiert.

Tabelle 3: Daten und Fakten des Netzwerks der Deutschen Bahn AG mit den Veränderungen zum Vorjahr (vgl. [DB 2005h])

Eigenschaft	Wert 2004	Veränderung zum Vorjahr [%]
Betriebslänge (Länge der Trassen) [km]	34.718,2	-2,5
Personenbahnhöfe	5.477	0,6
Reisende insgesamt [Mio.]	1.694,8	0,8
Reisende pro Tag [Mio.]	4,7	2,2
(Personen-) Züge pro Tag	28.970	-4,0
davon Fernverkehr	1.302	0
Lokomotiven	2.183	-10,60
Triebwagen	11.183	27,30 <sup>35</sup>
Reisezugwagen	9.893	-8,6
Reisendenkilometer [Mio.]	70.260	+1,0
Mitarbeiter im Personenverkehr	64.254	-5,8

## II.2 Bestandteile eines Bahnsystems

Nachfolgend werden grundlegende Begrifflichkeiten des Bahnsystems im Sinne der kundenorientierten Disposition erläutert. Zunächst werden die Entitäten<sup>36</sup> des Systems betrachtet, im Anschluss die Relationen zwischen diesen, die für die Bahn in Form eines Fahrplans vorliegen. In Kapitel IV wird, u. a. beruhend auf den hier dargestellten Systembestandteilen, eine mathematische Formalisierung vorgenommen. Sämtliche in der Arbeit verwendete Terminologie zum Thema Bahn ist eng an die in [Pachl 2005] bzw. [Pachl 2004] im jeweiligen Glossar definierten Begriffe angelehnt. Teilweise wird jedoch eine umgangssprachlich verständlichere Formulierung bevorzugt, um die Lesbarkeit für Nicht-Experten zu erhöhen.<sup>37</sup>

<sup>35</sup> Der Anstieg ist durch die enorme Steigerung bei den gleichstrombetriebenen S-Bahnen erklärbar.

<sup>36</sup> Dabei wird, im Gegensatz zu vielen ingenieurwissenschaftlich orientierten Dissertationen im Bahnbereich, bewusst auf eine sehr detaillierte Darstellung der technischen Details einzelner Bestandteile verzichtet, da diese zur Lösung der Problemstellung nichts beiträgt.

<sup>37</sup> Es kann vorkommen, dass zur Erläuterung von Begriffen Termini bereits vor deren Definition verwendet werden. In diesen Fällen reicht das umgangssprachliche Verständnis jedoch aus.

## II.2.1 Permanente Entitäten eines Bahnsystems: Topologie/Netzwerk

Die Topologie<sup>38</sup> der Bahn umfasst die permanenten Entitäten des Systems, oder, mit anderen Worten, das zugrundeliegende *physikalische*<sup>39</sup> Netzwerk. Dieses ist grob aufgegliedert in Knotenpunkte verschiedenen Typs sowie diese verbindende Strecken.

### II.2.1.1 Knotentypen des Bahnnetzes

Die Knoten des Bahnnetzes werden allgemein als *Stellen* bezeichnet. Stellen sind alle Orte im Bahnnetz, die für die Deutsche Bahn eine bestimmte Bedeutung haben. Zu den Stellen gehören Bahnhöfe, an denen Reisende ein- oder aussteigen können, Netzverzweigungen (Weichen) und andere Stellen, bspw. Signale oder Messpunkte.

Der wichtigste Knotentyp des Bahnnetzes ist ohne Zweifel der *Bahnhof*. Dabei lassen sich Passagierbahnhöfe, Betriebs- und Güterbahnhöfe voneinander abgrenzen, wobei die beiden letzteren Typen für diese Arbeit nachrangig sind<sup>40</sup>. Wesentliches statisches Merkmal von Bahnhöfen ist ihre Kapazität, bzw. die Anzahl der zur Verfügung stehenden Gleise, die ein- bzw. ausfahrende Züge nutzen können. Besonders wichtig für die spätere mathematische Modellierung ist auch die Zahl der in einem Bahnhof aufeinander treffenden *Strecken*: Führt nur eine Strecke durch einen Bahnhof, kann dieser in der Modellierung – wie in der Praxis – stark vereinfacht behandelt werden, da Anschlussbeziehungen kaum bestehen<sup>41</sup>. Treffen mehrere Strecken aus mehreren Richtungen aufeinander, treten in der Regel komplexere Anschlussbeziehungen auf.

Weitere Knotentypen sind aus Kundensicht und damit für diese Arbeit nebenrangig. Signal- oder Weichenanlagen, Gleisübergänge, Überholstellen usw. verbinden lediglich Streckenabschnitte verschiedenen Typs. Aus Sicht der Disposition selbst sind diese Knoten insofern jedoch von großer Bedeutung, als dass die Strecken zwischen zwei Knoten normalerweise allein aus Sicherheitsüberlegungen kapazitiert sind. Um Unfälle zu vermeiden, dürfen Züge nicht gleichzeitig bestimmte Abschnitte befahren. Erst nach einer gewissen *Sperrzeit* wird ein Abschnitt wieder freigegeben (vgl. dazu Abbildung 15).

Reisende sind durch einzuhaltende Sperrzeiten natürlich insofern betroffen, als dass diese natürlich Verspätungen induzieren könnten. Im Rahmen der weiteren Arbeit werden solche Verspätungen als systemexogen betrachtet, selbst wenn sie durch eine zuvor getroffene Dispositionsentscheidung entstanden sind (vgl. Abschnitt II.4).

---

<sup>38</sup> Die *Topologie* ist nach Duden „die Lehre von der Lage u. Anordnung geometrischer Gebilde im Raum“ (vgl. [Duden 2001]).

<sup>39</sup> Im Gegensatz zum physikalischen Netz werden durch den Fahrplan, vgl. Abschnitt II.2.3, „virtuelle Netze“ durch die verschiedenen Zuggattungen definiert. Der Fahrplan gibt durch die Fahrzeit zwischen zwei Bahnhöfen implizit auch oft die physikalische Route vor, prinzipiell sind aber meist mehrere physikalische Routen zwischen zwei Knoten A und B des Netzwerks denkbar.

<sup>40</sup> Dabei können an einem physikalischen Standort mehrere Bahnhofstypen vorhanden sein.

<sup>41</sup> Dies kann nur im Takt der durch den Bahnhof führenden Linie bzw. nur in die Richtung, aus welcher der Passagier gerade gekommen ist vorkommen.

### II.2.1.2 Kanten des Netzwerks

Kanten des Netzwerks werden nachfolgend als *Strecken* bezeichnet. Strecken sind die Verbindungen zwischen jeweils zwei Stellen. Eine Strecke kann aus mehreren (meist parallel liegenden) Gleisen<sup>42</sup> bestehen. Strecken werden durch die diversen Knotentypen in Streckenabschnitte unterteilt, die durch verschiedene, für die praktische Durchführung von Zugfahrten extrem wichtige Eigenschaften gekennzeichnet sind: Kapazität, Elektrifizierung, Maximalgeschwindigkeit, Kurvenradius, Tunnel, Bau- oder sonstige Langsamfahrstellen usw. Diese Eigenschaften einer Strecke determinieren i. d. R. die Nutzungsmöglichkeiten einer Strecke durch einen Zug: Trivialerweise kann z. B. eine Elektrolok nicht auf nicht elektrifizierten Strecken (Strecken ohne *Fahrdraht*) fahren, und Züge mit Neigetechnik haben für Kurvenstrecken höhere zulässige Geschwindigkeiten. Anders gesagt kann für jede Zugkategorie ein Subnetz des physikalischen Netzes definiert werden, auf dem dieser Zug fahren darf. Diese Unterscheidung ist für die weitere Arbeit eher unwichtig, da sie die Pünktlichkeit der Passagiere nur sekundär – im Falle eines Ressourcenkonflikts – beeinflusst. Auch solche Störungen werden als systemexogen betrachtet (vgl. Abschnitt II.4).

Einzelne Strecken des Netzwerkes sind mit Zugnummernmeldeanlagen ausgestattet. Diese Anlagen ermöglichen die Verfolgung eines Zugs auf seinem Lauf und geben somit die Möglichkeit, relativ präzise Aussagen über die Position des Zugs zu treffen. Dieses Prinzip wird auch in der Zukunft weiter Bestand haben: das ETCS (*European Train Control System*, vgl. Abschnitt II.4.4.2.2), mit dem zukünftig das gesamte europäische Eisenbahnnetz überwacht werden soll, beruht derzeit schon auf ähnlichen Anlagen.

## II.2.2 Temporäre Bestandteile: Züge und Passagiere

Die wichtigsten temporären Entitäten des Netzes sind Züge – jeweils mit ihren Besatzungen – und Passagiere. Beide Typen bewegen sich im Netz von einem Knoten A (Quelle oder Startort) zu einem Knoten B (Senke oder Ziel). Beide seien nachfolgend kurz dargestellt:

### II.2.2.1 Züge

Eine Wissenschaft für sich sind Züge und ihre verschiedenen Ausprägungen: Physische Züge unterscheiden sich nach Geschwindigkeit, Antriebsart, Ausstattung, Reichweite (Regional- oder Fernbahn) usw. Allen Arten gemein ist lediglich das Prinzip „Stahl auf Stahl“, d. h. das Rad/Schiene-System. Dieses besteht allerdings schon seit 1835, als der erste Zug in Deutschland, der „Adler“, von Nürnberg nach Fürth fuhr. Wenngleich die Nachfahren des Adlers heute als ICE Geschwindigkeiten von bis zu 300 km/h<sup>43</sup> auf Linienfahrten erreichen (vgl. [DB 2005d]), bringt das Rad/Schiene-System System einen gravierenden, prinzipiellen Nachteil mit sich, nämlich extrem lange Beschleunigungs- und Bremswege, sodass ein Fahren auf Sicht bei höheren Geschwindigkeiten nicht möglich ist. Allerdings steht dem, durch die

<sup>42</sup> Diese Gleise sind im ursprünglichen Wortsinn die „Bahnen“.

<sup>43</sup> Diese Geschwindigkeit kann auf Teilstücken relativ neuer Trassen, bspw. Köln-Frankfurt, realisiert werden. Die Höchstgeschwindigkeit des ICE (Typ 3) liegt nach [DB 2003] bei 330 km/h.

geringen Reibungsverluste bedingt, ein relativ niedriger Energieverbrauch pro Passagier gegenüber.

Neuere Technologien, z. B. die Magnetschwebetechnik des Transrapid (vgl. [TRI 2005]), existieren zwar bereits seit Ende der siebziger Jahre in marktreifer Form, setzen sich jedoch in Deutschland aus verschiedenen, oft politisch-ideologischen Gründen nicht durch. Hauptargument gegen diese Technologie, die Reisegeschwindigkeiten von 400 bis 450 km/h ermöglicht, ohne dabei wesentlich den Fahrweg zu belasten, ist die Inkompatibilität mit dem vorhandenen Gleisnetz.<sup>44</sup> Bessere Chancen haben möglicherweise Mischformen beider Technologien, bspw. die an der Universität Paderborn entwickelten *RailCabs* der *Neuen Bahntechnik Paderborn* (NBP), die das alte Schienennetz mit leichten Umbauten nutzen könnten. Nähere Informationen, inklusive einer Imagebroschüre, finden sich unter [NBP 2005].

Für diese Arbeit sei ein (logischer) Zug – abgekoppelt von seinem physischen Äquivalent – als Instanz einer *Zuggattung* oder *Zugkategorie* definiert. Die Gattung ist eine willkürliche Einteilung von Zügen aufgrund bestimmter Eigenschaften, z. B. dem Komfort, und definiert im Netzwerk der Bahn ein *virtuelles* Subnetz (vgl. Abbildung 4). In Deutschland bekannte Zuggattungen sind bspw. der IntercityExpress (ICE), der Inter- bzw. Eurocity (IC/EC), der InterRegio (IR), der RegionalExpress (RE) und die RegionalBahn (RB) sowie der Durchgangszug (D)<sup>45</sup>. Ein Zug ist eindeutig definiert durch seine Ankunfts- und Abfahrtsereignisse in Bahnhöfen. Zusätzlich existieren pro Zug genau ein Startereignis an der Station, wo der Zug eingesetzt wird, und ein Endereignis (analog). Ankunfts- und Abfahrtsereignisse wechseln sich nach dem Startereignis keineswegs immer ab; es können durchaus mehrere Abfahrtsereignisse (zu Beginn einer Fahrt) und mehrere Ankunftsereignisse (am Ende der Fahrt) hintereinander folgen. Dies wird dadurch erklärt, dass an Start- und Zielpunkten des Fernverkehrs Halte oft eng beieinander liegen<sup>46</sup>. Um zu verhindern, dass Passagiere diese Fernverkehrsverbindungen für Kurzstreckenfahrten „missbrauchen“, wird die reale Existenz (ein Zug, der hält, *muss* irgendwann losgefahren sein) der am Anfang und Ende fehlenden Ereignisse geleugnet.<sup>47</sup>

---

<sup>44</sup> Nach Meinung des Autors ist dieses Argument eher schwach: Der Transrapid würde kein Konkurrenzsystem sondern vielmehr ein Komplementärsystem zum bisherigen Schienennetz darstellen. Die dann möglichen Hochgeschwindigkeitstransporte würden vielmehr den innerdeutschen Flugverkehr unnötig machen. Eine ausführliche Diskussion über das Pro und Contra Transrapid ist an dieser Stelle jedoch unangemessen.

<sup>45</sup> Es existieren jedoch eine Reihe weiterer Kategorien.

<sup>46</sup> Dies gilt bspw. für ICE Züge, die von Hamburg Altona über Hamburg Hbf fahren. Hamburg Hbf ist dann nur als Abfahrt zu buchen.

<sup>47</sup> Zumindest wird dies von der Deutschen Bahn AG so gehandhabt.

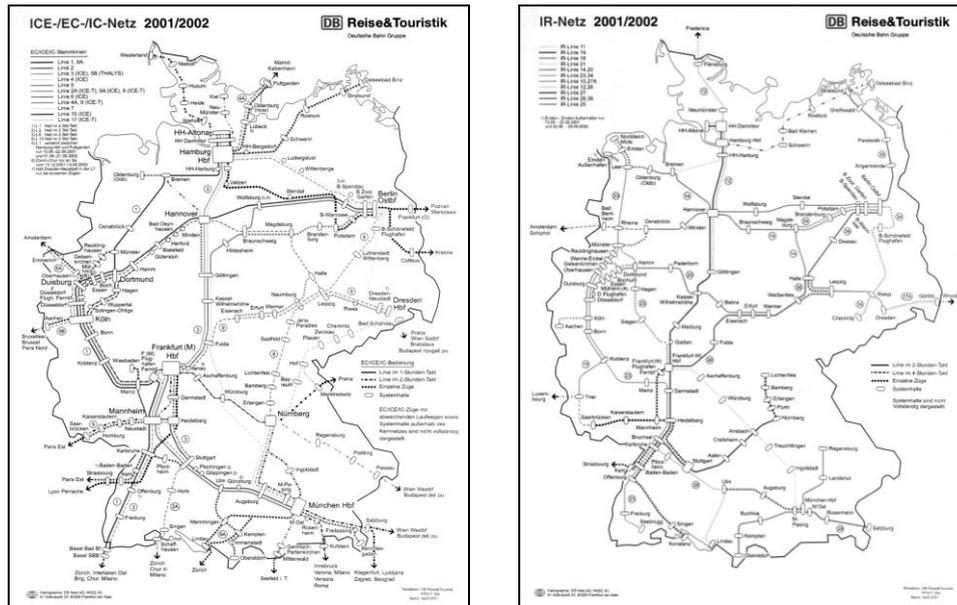


Abbildung 4: Verschiedene virtuelle Netze der Deutschen Bahn AG

Trivialerweise können sich Züge während ihres Laufs verspäten; diese Verspätungen können sich durch die Verflechtungen im Fahrplan schnell im gesamten Netz der Bahn fortpflanzen (vgl. Abschnitt II.4.1.1). Züge sind jedoch i. Allg. in der Lage, Verspätungen in Abhängigkeit von der Größe im Fahrplan integrierter Pufferzeiten wieder aufzuholen. Dieses ist im Sinne der Disposition eine wichtige Eigenschaft ist, weil dort prinzipiell Ereignisse im weiteren Zugverlauf prognostiziert werden müssen. Ob eine Verspätung auf der weiteren Zugfahrt aufgeholt werden kann, hängt von mehreren Faktoren ab:

- Höchstgeschwindigkeit des Zugs
- erlaubte Höchstgeschwindigkeit auf der Strecke
- eventuelle Streckenbelegungskonflikte mit anderen Passagier- und Güterzügen
- Anzahl und Beschaffenheit von Steigungen und Tunnels
- minimale Aufenthaltszeiten in Bahnhöfen
- etc.

### II.2.2.2 Passagiere

Ein *Passagier* oder *Reisender* wird im durch den Fahrplan vorgegebenen Netzwerk einen Weg, seine Route, zwischen zwei Stationen A und B in mindestens einem Zug zurücklegen. Existiert keine Direktverbindung zwischen A und B, muss ein Passagier umsteigen, wofür er eine bestimmte Zeitspanne, die *Übergangszeit*, benötigt.

Passagiere können klassifiziert werden in *Pendler*, die regelmäßig, meist beruflich bedingt, z. B. zweimal pro Tag oder pro Woche, zwischen zwei Stationen verkehren und *Gelegenheitsreisende*, die aus geschäftlichem oder privatem Anlass hin und wieder die Bahn wählen. Eine weitere Klassifikation von Passagieren ist die in *Fernreisende*, *Regionalreisende* und

*Nahverkehrsnutzer*. Beide Einteilungen können für die Bestimmung von Kostenfunktionen für die Wartezeit einzelner Pendler von Bedeutung sein, vgl. Kapitel IV.2.

Passagiere sind in den meisten größeren Bahnsystemen dem Betreiber nicht weiter bekannt, als dass sie für eine bestimmte Relation im Netz eine Fahrkarte kaufen, die oftmals eine bestimmte Gültigkeit hat. Dies wird relativiert durch einige der in Kapitel 1 erwähnten Kundenbindungsinstrumente, bspw. Bonusprogramme für Vielfahrer, oder Reservierungen per Internet, die sowohl den benutzten Zug und den Sitzplatz als auch den Reisenden eindeutig identifizieren. Ansonsten erfolgt die Kontrolle der Fahrausweise noch immer durch einen Zugbegleiter während der Fahrt, sodass bis zum Kontrollvorgang (und, genau genommen, derzeit auch danach) der Reisende unbekannt bleibt. Durch Erhebungen der Anzahl und der Routen der sich im Zug befindlichen Reisenden lassen sich Matrizen konstruieren, die für jede Startort/Zielort-Relation Reisendenzahlen enthalten (sog. Origin/Destination- oder OD-Matrizen).<sup>48</sup>

### II.2.3 Der Fahrplan als verbindendes Element

Die bisher beschriebenen Entitäten des Bahnsystems finden sich zum großen Teil im wichtigsten Kommunikationsinstrument des Öffentlichen Personenverkehrs mit seinen Kunden, dem *Fahrplan*, vgl. Abbildung 5, wieder. Dieser soll im Folgenden kurz betrachtet werden. Dabei werden u. a. einige Besonderheiten des statischen Fahrplans der Bahn betrachtet, die dem normalen Passagier oft nicht bekannt sind.

Der Fahrplan determiniert eindeutig, *welche* Bahnhöfe ein Zug während seines Laufes *wann* anfährt, d. h., er gibt eindeutige Zugfahrten bzw. -läufe<sup>49</sup> vor. Durch den Fahrplan sind demnach alle Kontakte aller Züge mit allen Bahnhöfen, an denen ein Zug startet, hält oder endet, eindeutig festgelegt.

In Deutschland wiederholt sich ein Fahrplan täglich oder wird, z. B. samstags oder sonntags durch einen anderen ersetzt. Grundsätzlich könnte eine *Fahrplanperiode* jedoch auch länger oder gar kürzer sein. Die Endzeit eines Fahrplans liegt meistens in einer der folgenden Perioden, weil einige Fahrten über das Ende einer Fahrplanperiode andauern. Bspw. existieren sogar in Deutschland Züge, die mehrere Tage zu ihrem Ziel benötigen, welches dann allerdings meistens außerhalb Deutschlands liegt. Die Fahrplanperiode ist zu unterscheiden von dem *Gültigkeitszeitraum* eines Fahrplans. In Deutschland wird bspw. meist zwischen Sommer- und Winterfahrplan unterschieden, die beide jeweils ein halbes Jahr gültig sind.

Eine *Linie* ist eine Sammlung von Zügen normalerweise identischer Gattung, welche dieselben Bahnhöfe in derselben Reihenfolge zu unterschiedlichen Zeiten anfahren. Meistens fahren die Züge einer Linie in einer bestimmten Frequenz, dem *Takt*. Der Takt bezeichnet ein

---

<sup>48</sup> Dieses reicht, selbst wenn es eine für die Produktplanung genügende Grundlage liefert, für das Ziel dieser Arbeit als Datenmaterial nicht aus, sodass für den Test des kundenorientierten Dispositionssystems Datenmaterial erst auf Basis plausibler Annahmen generiert werden musste, vgl. Kapitel III.

<sup>49</sup> Im Kontext dieser Arbeit werden die Begriffe Zug, Zugfahrt und Zuglauf synonym und auf der logischen Ebene verwendet, unabhängig davon, aus welchen physischen Teilkomponenten ein Zug besteht.

bestimmtes Zeitintervall, bspw. ein oder zwei Stunden, nachdem der nächste Zug einer Linie nach diesem Zeitintervall eintreffen sollte. Es kommt vor, dass zwei Züge derselben Linie unterschiedliche Start- und Endbahnhöfe haben, sodass beide nur zum Teil dieselben Bahnhöfe anfahren<sup>50</sup>. Eine Linie wird normalerweise von mehreren Zügen befahren, da ein einzelner Zug zumeist nicht in der Lage ist, die sich ergebende Route im Netz in der durch den Takt festgelegten Frequenz zu befahren.

Eine *Station* sei definiert als das durch den Fahrplan determinierte Aufeinandertreffen eines Zugs und eines Bahnhofs. Dabei seien nur die Stationen betrachtet, an denen ein Zug tatsächlich hält, um Passagiere ein- und aussteigen zu lassen. Eine Station wird damit eindeutig durch den Bahnhof und verschiedene Zeitattribute definiert.

Abfahrt		Ankunft			
Zeit	Fahrt			Gleis	Aktuelles
Dieser Plan zeigt die aktuelle Verkehrslage für Paderborn Hbf. Für weitere Fahrplaninformationen wählen Sie bitte Ihre gewünschte Uhrzeit:					
<a href="#">00:00</a> <a href="#">01:00</a> <a href="#">02:00</a> <a href="#">03:00</a> <a href="#">04:00</a> <a href="#">05:00</a> <a href="#">06:00</a> <a href="#">07:00</a> <a href="#">08:00</a> <a href="#">09:00</a> <a href="#">10:00</a> <a href="#">11:00</a> <a href="#">12:00</a> <a href="#">13:00</a> <a href="#">14:00</a> <a href="#">15:00</a> <a href="#">16:00</a> <a href="#">17:00</a> <a href="#">18:00</a> <a href="#">19:00</a> <a href="#">20:00</a> <a href="#">21:00</a> <a href="#">22:00</a> <a href="#">23:00</a>					
12:11	<b>IC 2554</b> <b>Düsseldorf Hbf</b>	Paderborn Hbf 12:11 - Lippstadt 12:26 - Soest 12:36 - Hamm(Westf) 12:51 - Dortmund Hbf 13:16 - Bochum Hbf 13:29 - Essen Hbf 13:39 - Mülheim(Ruhr)Hbf 13:47 - Duisburg Hbf 13:54 - Düsseldorf Flughafen 14:06 - Düsseldorf Hbf 14:17		1	ca. 25 Minuten später
12:18	aktuelle Uhrzeit				
12:22	<b>RB 39252</b> <b>Bielefeld Hbf</b>	Paderborn Hbf 12:22 - Altenbeken 12:33 - Sandebeck 12:45 - Horn-Bad Meinberg 12:52 - Detmold 13:00 - Lage(Lippe) 13:08 - Herford 13:27 - Bielefeld Hbf 13:48		2	pünktlich
12:40	<b>RB 39820</b> <b>Warburg(Westf)</b>	Paderborn Hbf 12:40 - Altenbeken 12:52 - Willebadessen 13:07 - Warburg(Westf) 13:18		2	pünktlich
12:46	<b>RB 39881</b> <b>Hamm(Westf)</b>	Paderborn Hbf 12:46 - Scharmede 12:50 - Salzkotten 12:54 - Lippstadt 13:09 - Bad Sassendorf 13:20 - Soest 13:24 - Borgeln 13:29 - Hamm(Westf) 13:44		1	pünktlich
12:50	<b>MWB83017</b> <b>Holzminden</b>	Paderborn Hbf 12:50 - Altenbeken 13:02 - Bad Driburg(Westf) 13:14 - Brakel(Höxter) 13:23 - Otbergen 13:30 - Godelheim 13:37 - Höxter Rathaus 13:41 - Luchtringen 13:47 - Holzminden 13:53		5	-
13:14	<b>RB 24118</b> <b>Hannover Flughafen</b>	Paderborn Hbf 13:14 - Altenbeken 13:26 - Steinheim(Westf) 13:42 - Hameln 14:15 - Hannover Bismarckstr. 14:59 - Hannover Hbf 15:03 - Lannenhagen Mitte 15:16 - Hannover Flughafen 15:22		3	pünktlich
13:14	<b>MWB82424</b> <b>Bielefeld Hbf</b>	Paderborn Hbf 13:14 - Paderborn Kasseler Tor 13:16 - Paderborn Nord 13:20 - Sennelager 13:30 - Hövelhof 13:38 - Hövelnäge 13:44 - Schloß Holte 13:51 - Sennestadt 13:58 - Windelsleiche 14:03 - Bielefeld Hbf 14:16		5	-
13:16	<b>RB 39823</b> <b>Münster(Westf)Hbf</b>	Paderborn Hbf 13:16 - Scharmede 13:20 - Salzkotten 13:24 - Lippstadt 13:39 - Bad Sassendorf 13:50 - Soest 13:54 - Borgeln 13:59 - Münster(Westf)Hbf 14:48		1	pünktlich
Anzeige aller Halte bis zu diesem Zeichen O, dahinter Anzeige der wichtigsten Halte.					

Abbildung 5: Beispiel für einen Fahrplan der Deutschen Bahn AG – im Bild mit aktuellen Zuglaufinformationen (s. [DB 2005e])

Mit *Zubringer*<sup>51</sup>, als erstem im allgemeinen Sprachgebrauch nicht üblichem Begriff, seien Züge bezeichnet, in denen sich Passagiere befinden, die an einer bestimmten Station ihrer Reise in einen anderen Zug umsteigen wollen. Zubringer sind in diesem Sinn „anschlussvermittelnde“ Züge. Der Zug, mit dem die Reise fortgesetzt werden soll, ist folgerichtig ein *Abbringer*. Es gibt typischerweise zu einem Zubringer mehrere Abbringer, die zu unterschiedlichen Zielbahnhöfen fahren, und jeder Zug kann und wird im Normalfall sowohl Zubringer als auch Abbringer sein. Die Zubringer-Abbringer-Relation ist für den Disponenten eine der wichtigsten Beziehungen überhaupt, da nur in diesen Relationen Anschlusskonflikte entstehen können. Einen Abbringer kann man analog zum Zubringer auch als „anschlussabnehmenden“ Zug beschreiben.

<sup>50</sup> Diese „weiche“ Definition des Begriffs Linie entstammt Gesprächen mit Disponenten der Deutschen Bahn AG und wird für diese Arbeit so übernommen.

<sup>51</sup> Die Termini „Zubringer“ und „Abbringer“ sind ebenfalls Fachtermini der Disponenten der Deutschen Bahn AG.

Zwischen Zubringerankunft und Abbringerabfahrt muss eine gewisse Zeitspanne vergehen, damit ein Reisender die Gelegenheit haben kann, umzusteigen. Dieser Zeitspanne wird *Mindestübergangszeit* oder MÜZ genannt. Diese wird gemeinhin relativ großzügig bemessen werden, ist aber bspw. für Gehbehinderte nicht immer ausreichend, sodass für diese Gruppe die Internet-Verbindungsabfrage der Bahn nicht immer sinnvolle Routen berechnet. Die MÜZ ist bahnhofsspezifisch und abhängig davon, an welchen Gleisen die Züge im Bahnhof halten; das Umsteigen kann schneller erfolgen, wenn der Abbringer direkt gegenüber am Bahnsteig steht. In Extremfällen kann die Mindestübergangszeit zwischen weit entfernten Bahnsteigen bei Bahnhöfen mit großer räumlicher Ausdehnung (z. B. München Hbf) bis zu 15 Minuten betragen. Werden Passagiere individualisiert betrachtet, können *persönliche Übergangszeiten* (PÜZ) in Anlehnung an die Mindestübergangszeit definiert werden: Je nach Fähigkeit des Passagiers wäre es denkbar, das Zeitintervall zu vergrößern (Reisender mit Gehbehinderung oder mit viel Gepäck) oder zu verkürzen (sportlicher Reisender). In dieser Arbeit wird das Konzept persönlicher Übergangszeiten verfolgt.

Als *Anschlüsse* eines Zugs wird schließlich die Menge aller Abbringer, die innerhalb einer definierten Zeitspanne, bspw. 30 Minuten, aus dem Bahnhof abfahren, bezeichnet. Dabei werden auch Züge in Gegenrichtung als Abbringer betrachtet: In einigen Fällen ist dies sinnvoll, um eine Station zu erreichen, an der der Zubringer zuvor nicht gehalten hat, die aber im Lauf des Abbringers enthalten ist. Das durch die Anschlüsse definierte Netzwerk (*Anschlussnetzwerk*) determiniert alle für Passagiere mit bestimmten persönlichen Übergangszeiten denkbaren Routen „durch den Fahrplan“.

Nachfolgend wird der eigentliche Gegenstand dieser Arbeit, die Disposition im schienengebundenen Personenverkehr, zunächst vor dem Hintergrund des allgemeinen Produktionsplanung- und Steuerungsprozesses, näher beleuchtet.

## **II.3 Produktionsplanung und -steuerung im schienengebundenen Personenverkehr**

Die Produktionsplanung des öffentlichen Schienenverkehrs ist eine komplexe, viele unterschiedliche Faktoren umfassende Aufgabe. Anhand der bloßen Dimension des Netzwerks der Deutschen Bahn AG (vgl. Tabelle 3) lässt sich erahnen, wie schwierig diese Aufgabe sein kann.

Systeme solchen Komplexitätsgrads wurden in der Vergangenheit oft durch Hierarchisierung beherrschbar gemacht und in verschiedene, aufeinander aufbauende Subprobleme unterteilt. Erst in jüngster Zeit werden für die Flugindustrie einzelne Planungsschritte, die im Übrigen denen im fahrplangebundenen Schienentransport sehr ähnlich sind, integriert, bisher allerdings nur rudimentär. Im Planungs- und Ausführungsprozess bilden die Ergebnisse des vorausgehenden Planungsschritts die Eingabe für den nächsten: Basierend auf der *Nachfrageprognose* sowie der *Netzwerk-* und *Kapazitätsplanung* werden in der *Produktplanung* die Produkte (Transportangebote für gegebene Verbindungen) und deren Kapazitäten festgelegt. In der folgenden Phase, *Produktionsplanung* und *-scheduling*, werden die Abfahrts- und An-

kunftszeiten, die beteiligten Flotten verschiedener Zuggattungen und deren Umläufe bestimmt. Zur operativen Planungsphase gehören die Zuordnung der physischen Fahrzeuge (*Fahrzeugeinsatzplanung* oder *Fleet Assignment*), die *Besatzungseinsatzplanung* (*Crew Scheduling*) sowie das Scheduling der stationären Operationen.<sup>52</sup>

Die einzelnen Teilprobleme werden normalerweise nicht „from scratch“, d. h., von Grund auf, gelöst; vielmehr werden existente Pläne überarbeitet und verbessert, falls sich die Planungsvoraussetzungen geändert haben. So kann bspw. das Eisenbahnnetzwerk selbstverständlich nicht neu entworfen werden, weil die Infrastruktur historisch gewachsen und somit quasi gegeben ist. Wenn überhaupt, werden geringfügige Änderungen an der Netzstruktur durchgeführt, beispielsweise ein Streckenneu- oder -umbau.

Der Großteil der Planung beschäftigt sich offensichtlich mit der Einsatzplanung der im Prozess beteiligten und im vorigen Abschnitt vorgestellten Ressourcen. Diese hat insbesondere durch die mit der Bahnreform verbundene Privatisierung und Aufteilung in mehrere Unternehmensbereiche noch an Bedeutung gewonnen, wobei die Kosteneffizienz absolut im Mittelpunkt steht. Hinsichtlich einer optimalen Planung und Steuerung besteht dabei aufgrund einer unterschiedlichen Zielsetzung der einzelnen Bereiche, zum Beispiel Kosten- vs. Kundenorientierung, ebenfalls ein Konfliktpotenzial. Zudem nehmen auch politische Entscheidungen, Deregulierungen und spezielle Investitionsprojekte, bspw. der oben erwähnte Transrapid, Einfluss auf die Produktionsplanung der Deutschen Bahn AG, was zu erheblichen Schwierigkeiten führen kann. So beschreibt Baron die Transportpolitik und -planung in der Bundesrepublik Deutschland als ein Spielfeld von Wissenschaftlern, Lobbyisten, Politikern, Gurus, fanatischen und besorgten Bürgern, die auch zukünftig mehrere Generationen von Journalisten beschäftigen wird (vgl. [Baron 1995]).

Die *Durchführung* der Produktionsplanung veränderte sich mit der zunehmenden Leistungsfähigkeit von Modellen und Methoden sowie der größeren Verfügbarkeit leistungsfähiger Hardware in den letzten Jahrzehnten stark. So gibt es mittlerweile für fast alle Teilprobleme im Planungsprozess Optimierungsmodelle, sodass heute in kürzerer Zeit bessere, wenngleich oftmals keine exakt optimalen, Lösungen für die komplexen Planungsaufgaben berechnet werden können. Zu beachten ist jedoch immer, dass allein durch die Hierarchisierung das Gesamtergebnis der Planung prinzipiell suboptimal sein wird, da pro Stufe nur eine Teilmenge möglicher Pläne betrachtet wird. Ein weiteres Problem besteht zudem darin, dass die Planung heutzutage gelegentlich „zu optimal“ ist: das in einer Vorstufe u. U. sogar optimal gelöste Problem verursacht in praxi höhere Kosten, weil z. B. keine Pufferzeiten mehr eingeplant wurden, um die Störanfälligkeit eines Plans zu vermindern. Neuere Ansätze verwenden deswegen Simulationsmethoden, um die tatsächlichen Durchführungskosten eines Plans zu bestimmen und statistisch zu validieren (vgl. z. B. [Demitz et al. 2004] oder [Rosenberger et al. 2002] für den Airline-Bereich).

---

<sup>52</sup> Bei der Ausführung der Pläne ist es dann oft notwendig, aufgrund von Betriebsstörungen und Unregelmäßigkeiten die erstellten Fahrpläne, Routen und Ressourcenzuordnungen kurzfristig zu modifizieren, was die Notwendigkeit der Disposition – und damit auch dieser Arbeit – begründet.

### II.3.1 Besonderheiten des Bahnprodukts

Die Produktionsplanung der Bahn ist mit der in Industriebetrieben nur begrenzt vergleichbar, was auf einige gravierende Unterschiede der jeweiligen Produkte zurückzuführen ist. Diese bestehen erstens in der *Lagerungsfähigkeit*: Während industrielle Produkte und deren materielle Produktionsfaktoren prinzipiell gelagert werden können, kann eine fahrplangebundene Transportdienstleistung nicht aufgehoben werden; die Produktion entspricht zeitlich genau der Konsumption durch den Kunden (Uno-actu-Prinzip) (zu Ausnahmen vgl. [Meffert/Bruhn 2000], S. 52). In der Konsequenz können Bahnprodukte nicht vor Auslieferung qualitätsgeprüft und ggf. nachgebessert oder ausgesondert werden, wie es bei lagerfähigen Produkten üblich ist. Die Bahn muss demnach die Qualität jeder einzelnen Reise im Planungs- und Produktionsprozess *a priori* sicherstellen. Außerdem können ungenutzte Kapazitäten – die Überschussproduktion – nicht mehr abgesetzt werden; ein leerer Sitzplatz im Zug impliziert in diesem Sinn sofort eine suboptimale Mengenplanung des Transportdienstleisters<sup>53</sup>. Umgekehrt können Reisen natürlich nicht auf Vorrat produziert werden. Das in Kapitel I zitierte Preissystem sollte u. a. genau dieser Tatsache Rechnung tragen und die Auslastung der Züge erhöhen.

Zweitens ist die zur Produktion notwendige *Infrastruktur* (Schienennetz und Netzzugangspunkte) zu nennen. Merkmale dieser sind vor allem hohe Bereitstellungskosten, Inflexibilität und Langlebigkeit, was wiederum zur Folge hat, dass Planungen bezüglich der Infrastruktur (und damit auch der angebotenen Relationen, d. h. der Produkte) i. d. R. lange Zeiträume umfassen. Selbst wenn in anderen Industriebereichen ebenfalls große Investitionen zu tätigen sind, so ist doch kaum ein Investitionsprojekt derart aufwändig und langwierig wie eine Infrastrukturmaßnahme der Bahn. Z. B. erhöhen Planungshorizonte, die allein durch die notwendigen Planfeststellungen mehrere Jahrzehnte betragen können, das Investitionsrisiko erheblich.

Drittens haben zudem einige technische Eigenschaften des Systems Bahn erhebliche Konsequenzen für die Planung und Durchführung der Produktion. Gerade hier existieren große Unterschiede zu konkurrierenden Verkehrsträgern. Der bereits erwähnte lange Bremsweg für Schienenfahrzeuge (bei ICE-Zügen je nach Ausgangsgeschwindigkeit mehrere Kilometer), verhindert ein „Fahren auf Sicht“. Dies erfordert eine Außensteuerung, die den Zugfahrzeugführer mit Anweisungen zur Weiterfahrt bzw. zum Anhalten versorgt und die aktuelle Position der Züge an eine Leitstelle übermittelt. Die Steuerung erfolgt derzeit über ortsfeste Signalanlagen an den Gleisen. Da zwischen den einzelnen Signalanlagen recht große Entfernungen liegen, müssen die Sicherheitsabstände zwischen den einzelnen Zügen auf einer Strecke entsprechend groß sein, um Unfälle zu vermeiden. Wegen der so entstehenden großen Zugfolgezeiten wiederum muss die Bahn einerseits versuchen, pro Zugfahrt möglichst viele Passagiere

---

<sup>53</sup> Allerdings kann schwankenden Passagierzahlen auf einer Relation aufgrund der Aufteilung der Züge in Reisezugwagen nicht mit beliebiger Genauigkeit begegnet werden: Ein Waggon kann nicht nur zu einem Bruchteil angekoppelt werden. Auf der anderen Seite ist es offensichtlich möglich, Züge unter Benutzung von Stehplätzen quasi zu *überbuchen*.

befördern. Andererseits müssen die festgelegten Streckenkapazitäten bei der Fahrplanung beachtet werden, sodass sich widersprechende Ziele resultieren.

Ein wesentliches Abgrenzungsmerkmal zu konkurrierenden Verkehrsträgern liegt schließlich in der *Netzzugangsproblematik*. Im Gegensatz zum motorisierten Individualverkehr, wo in der Regel ein Transfer „von Haus zu Haus“ ohne Umsteigen, Fahrzeugwechsel oder ähnliches möglich ist, ist aufgrund der hohen Bereitstellungs- und Unterhaltungskosten der Netzinfrastruktur der Zugang zum Eisenbahnnetz auf relativ wenige Orte, die Bahnhöfe, beschränkt. Diesem Manko kann prinzipiell nur durch intermodale Routenplanung für Reisende begegnet werden: Existiert keine Bahnverbindung zwischen Start und Ziel einer Reise, wird auf alternative Systeme zurückgegriffen<sup>54</sup>.

### II.3.2 Der allgemeine Planungsprozess

In der Literatur finden sich unterschiedliche Ansätze zur Durchführung des Planungsprozesses. Eine weit verbreitete Vorgehensweise ist, wie oben angedeutet, die Hierarchisierung der Planung, d. h. die Unterteilung dieser in mehrere Stufen (vgl. z. B. [Bussieck 1998]). Abbildung 6 zeigt dabei den prinzipiellen Aufbau des Planungsprozesses für periodische Fahrpläne.<sup>55</sup> Nachteil dieses Vorgehens ist, dass der optimale Output einer Stufe, wenn dieser überhaupt berechnet werden kann, gleichzeitig der Input der nächsten Stufe ist, was i. Allg. Suboptimalität der Lösung impliziert: In jeder Planungsphase gehen durch teils im-, teils explizite Festlegungen Planungsspielräume – und damit die Gesamtoptimalität – verloren. Weil die Schritte jedoch nicht unabhängig voneinander sind, könnte die Ressourcennutzung durch eine starke Rückkopplung, oder – weitaus besser – durch eine parallele Durchführung aller Planungsschritte i. d. R. signifikant (im Sinne einer Kostenreduzierung unter Einbehaltung aller relevanten Regeln) verbessert werden. Die Integration der Planungsphasen im ÖPV ist jedoch nicht trivial, da allein schon die Unterprobleme durch eine hohe Komplexität gekennzeichnet sind. Viele Teilprobleme, z. B. das *Crew Scheduling* oder das *Fleet Assignment* in Fluggesellschaften sowie die Busumlaufplanung im städtischen Nahverkehr, sind unter Praxisbedingungen NP-schwer<sup>56</sup> (vgl. z. B. [Mellouli 2003]). Obwohl optimierende Planungssysteme in diesem Bereich grundsätzlich bereits seit Jahrzehnten existieren und beständig weiterentwickelt werden, sind Lösungen für praxisrelevante Problemgrößen fast immer approximativ.

---

<sup>54</sup> Die Deutsche Bahn AG bietet diesen Service auf ihren Internetseiten an. Zur Routenplanung werden auch Busfahrten, Fußwege und Taxistrecken herangezogen.

<sup>55</sup> In diesem vereinfachten Schema sind Langzeitplanungsaspekte (wie die Netzwerkplanung) und die Disposition nicht vorhanden.

<sup>56</sup> Sei  $L^*$  eine formale Sprache. Dann heißt  $L^*$  NP-schwer falls alle  $L$  aus NP polynomial reduzierbar auf  $L^*$  sind. Dies bedeutet insbesondere, dass  $L1$  mindestens so schwer ist wie jedes andere Problem aus NP. Es schließt jedoch nicht aus, dass  $L1$  selbst schwerer ist. NP bezeichnet dabei eine Klasse von Problemen, die von einer nichtdeterministischen Turingmaschine in polynomialer Zeit entschieden werden können (nach [Wikipedia 2005]). Probleme dieser Art sind i. Allg. schwer zu lösen.

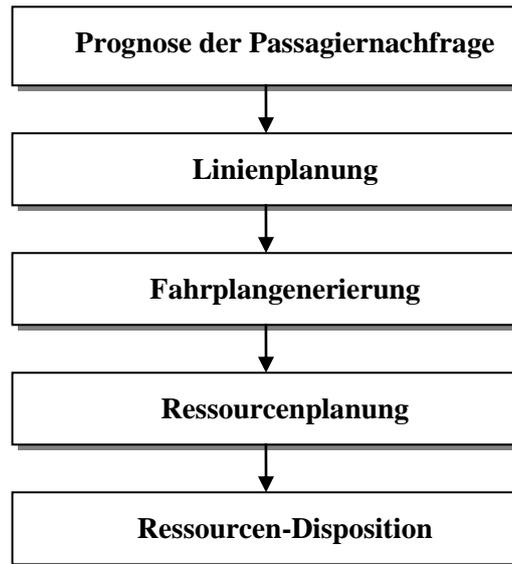


Abbildung 6: Der allgemeine Planungsprozess als Wasserfallmodell in Hierarchieform

Ein weiterer prinzipieller Nachteil dieses Planungsprozesses ist, dass er erneut iterativ durchlaufen werden muss, wenn die in vorgelagerten Stufen getroffenen Entscheidungen zu revidieren sind.

Dennoch spiegelt dieses Konzept, vor allem wegen der Aufteilung in *überschaubare* Planungsabschnitte, die Struktur der Planung bei den meisten Anbietern im fahrplanbasierten Personenverkehr wieder. Eine etwas andere, den zeitlichen Planungshorizont betonende Sichtweise ist die Unterscheidung in eine *strategische*, eine *taktische* und eine *operative* Stufe (vgl. [Assad 1980]):

- Die strategische Planungsebene umfasst einen Planungszeitraum von 5-15 Jahren und hat die Beschaffung der Ressourcen zum Ziel. Es werden also die wichtigsten Systementscheidungen, wie die Bestimmung der Angebotsstruktur des Bahnunternehmens sowie die Planung des Schienennetzwerks durchgeführt.
- Die taktische Ebene umfasst 1-5 Jahre. Sie beinhaltet vor allem die Ressourcenzuweisung. Dabei werden alle der Vorbereitung der operativen Planung dienenden Entscheidungen getroffen, bspw. die Linien- oder die Fahrplanung.
- Die operative Ebene schließlich beschäftigt sich mit dem Tagesgeschäft. Nach [Assad 1980] beträgt der Zeithorizont 24 h bis 1 Jahr, wobei jedoch die Reaktionszeit auf Störungen heute eher im Minutenbereich angesiedelt wird. Alle auf operativer Ebene zu treffenden Entscheidungen dienen der Absicherung eines störungsfreien Ablaufs; es werden physische Ressourcen und Besatzungen ein- und – bei der Durchführung des Fahrplans – umgeplant. Dabei nimmt die Kurzzeitdisposition eine entscheidende Rolle ein.

Nachfolgend werden diese drei Planungsebenen sowie deren Unteraufgaben anhand des in Abbildung 7 dargestellten „Planungsprozesses für Fernbahnen“ am Beispiel der Deutschen

Bahn AG detailliert. Dieser Prozess ordnet die hierarchisierten Planungsaufgaben in ihrer zeitlichen Gliederung dem jeweiligen Planungshorizont (strategisch, taktisch und operativ) zu. Zudem wird ein Überblick über Zielkriterien und Lösungsmethoden für die Problemstellungen in den verschiedenen Planungsebenen gegeben, sofern sie für diese Arbeit relevant erscheinen. Einen darüber hinausgehenden, aktuellen Überblick über Methoden des Operations Research im schienengebundenen Passagierverkehr gibt [Huismann et al. 2005].

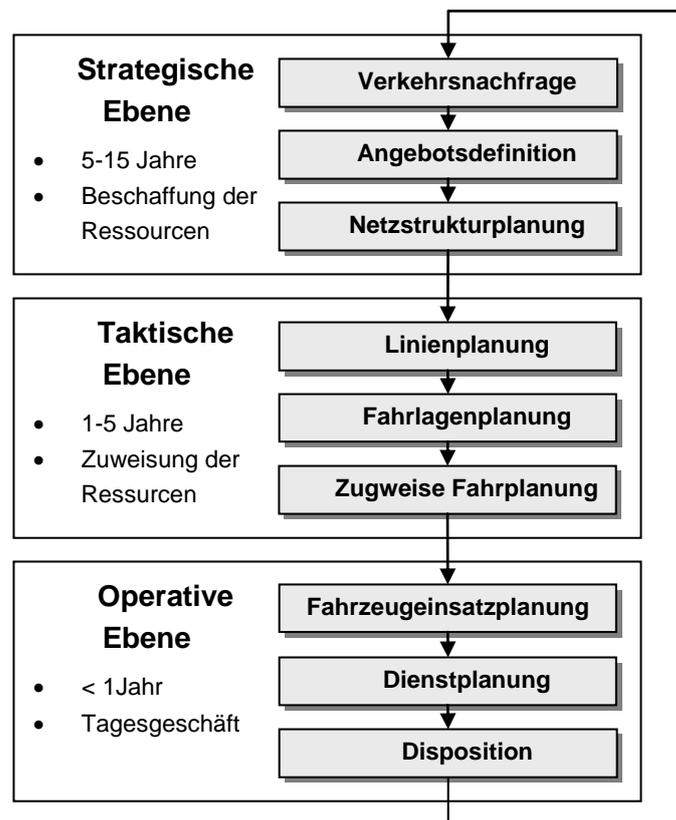


Abbildung 7: Ablaufdiagramm der Planung bei Fernbahnen (in Anlehnung an [Bus-sieck/Zimmermann 1997] und [Assad 1980])

### II.3.3 Strategische Planungsebene

Naturgemäß werden auf strategischer Planungsebene die Entscheidungen mit den längsten Nachwirkungen getroffen. Fehler auf dieser Ebene verursachen daher extrem hohe Kosten.<sup>57</sup> Trotzdem existieren kaum systematische Methoden für die Unterprobleme, mathematische Modelle zum Beispiel sind in dieser Phase von eher nachrangiger Bedeutung. Sie werden, wenn überhaupt, nur zur Prognose der Verkehrsnachfrage eingesetzt. Die Angebotsdefinition beruht hauptsächlich auf konzeptionellen ökonomischen Überlegungen und auf Szenariotech-

<sup>57</sup> So sind z. B. die Kosten für den Neubau einer ICE-Strecke horrend: Die Strecke Köln-Frankfurt kostete, z. T. aufgrund der vielen notwendigen Sonderbauten (Tunnel und Brücken), ca. 30 Millionen € pro Kilometer (vgl. [Ederer 2004]). „Günstigere Strecken“, ohne viele Sonderbauten, werden nach Aussagen eines Mitarbeiters der Transrapid-Konsortiums mit immerhin ca. 15 Millionen € pro Kilometer veranschlagt.

niken. Das überwiegend historisch festgelegte Schienennetz lässt jedoch der Planung auf dieser Ebene ohnehin nur einen relativ geringen Spielraum. Streckenneubauten sind heutzutage eine Seltenheit; Wartung und Pflege des vorhandenen Schienennetzes stehen stattdessen im Mittelpunkt. Hilfreich sind dann eher Methoden zur Bestimmung der Glaubwürdigkeit der Kostenpläne in Infrastrukturprojekten, vgl. z. B. [Gannon 2004].

### II.3.3.1 Prognose der Verkehrsnachfrage

Grundlage jeder Verkehrsplanung ist das prognostizierte Passagieraufkommen, die sog. *Verkehrsnachfrage* zwischen den bewohnten Gebieten einer Gesellschaft. Da die Bahn systembedingt nur sehr langfristig auf Nachfrageschwankungen reagieren kann, müssen Bedarfe für viele Jahre im Voraus prognostiziert werden und mithin Zeiträume von mehreren Jahren und Jahrzehnten umfassen.

Das Ergebnis einer Verkehrsprognose ist die so sog. Quelle-Ziel-Verflechtungsmatrix (englisch Origin/Destination- oder O/D-Matrix), in der für jede Relation (Verbindung zwischen zwei Orten bzw. Regionen) die Verkehrsnachfrage angegeben wird: jeder Eintrag  $(i, j)$  gibt die Anzahl der Personen an, die von Ort  $i$  nach Ort  $j$  reisen möchten.

In der Vergangenheit sind viele Modelle und Methoden zur Bestimmung von O/D-Matrizen entwickelt worden. Eine Möglichkeit, die gesamte Verkehrsnachfrage zu bestimmen ist, eine Vielzahl kostenintensiver Interviews mit potenziellen Kunden zur Erhebung ihrer Reisegewohnheiten zu führen und diese im Sinne des Mikrozensus als Grundlage einer statistischen Analyse zu nutzen. Ein im Vergleich dazu einfacher und kostengünstiger Ansatz ist die Bestimmung der O/D-Matrix über Verkehrszählungen auf bestimmten Verbindungen des Schienennetzes. Eine Übersicht über unterschiedliche Methoden und Modelle zur Generierung von O/D-Matrizen aus diesen Daten wird in [Abrahamsson 1998] gegeben.

O/D-Matrizen bergen verschiedene Probleme in sich:

- Vorliegen unterschiedlicher Matrizen, z. B. aus verschiedenen Verkehrszählungen (Stichproben), sodass „die beste“ oder zumindest eine adäquate O/D-Matrix ermittelt werden muss. In [Abrahamsson 1998] werden auf verschiedenen Modellen beruhende Lösungsansätze für dieses Problem vorgestellt.
- Eine Vielzahl von Passagier Routen wird erst gar nicht erfasst.
- Es wird nur annähernd die aktuelle Nachfragesituation wiedergegeben. Zukünftige Änderungen eines darauf beruhenden Fahrplans können auch die Verkehrsnachfrage in unvorhergesehener Weise beeinflussen, so dass eine Überarbeitung der O/D-Matrix notwendig wird.<sup>58</sup>

---

<sup>58</sup> Dies hängt u. a. damit zusammen, dass Infrastrukturmaßnahmen wie neue Autobahnabschnitte (oder eben Bahnstrecken) über kurz oder lang das Verkehrsverhalten ändern werden. Dies geschieht, weil sich an Bahnhöfen oder Anschlussstellen Wirtschaftsunternehmen ansiedeln, die Verkehrsnachfrage implizieren, oder weil im kompletten Verkehrsnetz günstigere Routen verfügbar werden. Mit dem Neubau der Bahnstrecke Köln-Frankfurt

- Keine Aussage über die Wahl der einzelnen Routen, um von Ort  $i$  nach Ort  $j$  zu gelangen. Es bleibt ungewiss, ob ein Kunde für seine Reise eine nach Kilometern kürzere, günstige Verbindung mit Zügen niederer Kategorie wählt, oder ob er die schnellste und bequemste, dafür aber teurere Verbindung aussucht. Es existieren i. d. R. weitaus mehr mögliche Routen zwischen zwei Orten  $i$  und  $j$  als diese beiden. Zusätzlich kann nicht erfasst werden, an welcher Station ein Reisender auf seiner Route *tatsächlich* umsteigt. In der Praxis ist dies nach Aussagen von Bahnmitarbeitern heute eher von untergeordneter Bedeutung, da die Verbindungsplanung der Bahn die Route meist ohnehin vorgibt.

Ein Beispiel für diese Langfristplanung ist die „Verkehrsprognose 2015“ ([BVMWB 2001]), die von der Agentur Prognos im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen erstellt wurde. In dieser wird sowohl die Verkehrsnachfrage insgesamt als auch nach Verkehrsträgern differenziert dargestellt. Daneben müssen auch die Reisezwecke der Kunden analysiert werden, um das Angebot besser abstimmen zu können. Dabei werden die Verkehrsarten *Berufsverkehr*, *Ausbildungsverkehr*, *Einkaufsverkehr*, *Geschäftsverkehr*, *Urlaubsverkehr* und *Privatverkehr* unterschieden. Nähere Erläuterungen zum Vorgehen bei dieser Prognose finden sich im Anhang A.2.

Während die Prognose des Gesamtverkehrsaufkommens hauptsächlich als Entscheidungsgrundlage für langfristige Investitionen in das Streckennetz dient, muss, vor allem für die spätere Planung der Fahrlagen und Taktraten der Züge, noch eine genauere Untersuchung der Abhängigkeit des Reisendenaufkommens von zeitlichen Faktoren wie Saison, Wochentag und Tageszeit erfolgen.

### II.3.3.2 Angebotsdefinition

Die *Angebotsdefinition* befasst sich mit konzeptionellen Überlegungen für den Betrieb des Verkehrssystems, bspw. die Unterteilung in verschiedene Zugkategorien (IC/EC, ICE, IR etc.) und zusätzliche, sich ergänzende Angebote im Nah-, Regional- und Fernverkehr sowie Erweiterungen des Zugsystems, bspw. Nacht- oder Autozüge. Für diese konzeptionellen Überlegungen spielt natürlich auch der Neubau oder die Stilllegung von Trassen eine große Rolle.

### II.3.3.3 Netzstrukturplanung

Die Verkehrsnachfrage bildet die Grundlage für die Netzstrukturplanung. Da das Schienennetz wie gesagt historisch gewachsen ist, sind hier im Wesentlichen Entscheidungen über die Anpassung des bestehenden Netzes an die prognostizierte Nachfrage zu treffen.

Aufgrund von Angebotsneuentwicklungen oder infrastrukturellen Maßnahmen des Staats werden manchmal Veränderungen an der Netzwerkstruktur, z. B. neue Hochgeschwindigkeitsstrecken (wie jüngst die Strecke Berlin-Hamburg) bzw. Neubau, Ausbau oder Stilllegung einzelner Streckenabschnitte, durchgeführt. Zusätzlich macht der Bau neuer Bahnhöfe oder

---

kann es sinnvoll sein, von Paderborn über Köln nach Frankfurt zu fahren, statt, wie bisher, größtenteils über Kassel. Damit würde ein Reisender diese neue Strecke allein deswegen nutzen, weil es sie gibt.

der Wegfall einzelner Haltepunkte eine Umstrukturierung notwendig. Bei allen möglichen Veränderungen der Infrastruktur ist grundsätzlich genau zu überprüfen, ob eine Durchführung sinnvoll ist, da solcherlei Modifikationen fast immer auf gesellschaftlichen Widerstand, z. B. Klagen von Naturschutzverbänden gegen eine spezielle Trassenführung, Widerstand der Kommunalpolitik gegen Stilllegungen etc., stoßen.

Da das Schienennetz zwar im Besitz der DB Netz AG ist, der Streckenneu- und Ausbau jedoch in den Händen des Bundes liegt, ist die Netzstrukturplanung ein Teil der Bundesverkehrswegeplanung. Das Bundesministerium für Verkehr erarbeitet in unregelmäßigen Abständen den *Bundesverkehrswegeplan*, der die Grundlage für die im Parlament zu beschließenden Gesetze zum Ausbau der Verkehrswege bildet.<sup>59</sup> Eines der Ziele, das bei der heutigen Netzplanung verfolgt wird, ist die Entmischung von schnellen und langsameren Verkehren auf der Schiene<sup>60</sup>.

In dieser Planungsebene erfolgt ebenfalls die Entscheidung, welche virtuellen Netze (vgl. Abschnitt II.2.2.1 und Abbildung 4) die einzelnen Städte verbinden und wo die Haltepunkte der jeweiligen Netze liegen<sup>61</sup>. Selbstverständlich müssen die jeweiligen technischen Gegebenheiten und ökonomische Analysen Berücksichtigung finden. Wie erwähnt, muss für jedes der Netze auch ein eigenes Schienennetz definiert werden, da die einzelnen Zugattungen teilweise unterschiedliche Strecken belegen oder sie – auch auf gleichen Strecken – verschiedene Haltebahnhöfe haben. Hauptsächliches Ziel ist es, dem Kundenaufkommen und den Anforderungen der Kunden an die Zugqualität bzw. den Reisekomfort bestmöglich zu entsprechen.

### II.3.4 Taktische Planungsebene

Auf der taktischen Planungsebene werden Entscheidungen mit mittelfristigen Auswirkungen auf das System getroffen. Sie umfasst die *Linienplanung*, die *zugweise Fahrplanung* und die *Fahrlagenplanung*. Die Linienplanung hat in der taktischen Planungsebene den längsten Planungshorizont, da sie nicht von den jährlich wechselnden Fahrplänen betroffen ist. In dieser Phase werden häufiger Methoden des Operations Research verwendet, wobei vorwiegend Heuristiken anstelle exakter Verfahren (vgl. Abschnitt IV.1.1) im Einsatz sind. Auch hier bestehen diverse Zielkonflikte.

#### II.3.4.1 Linienplanung

Systembedingt ist es nicht möglich, die individuelle Nachfrage jedes Kunden mit direkten Ort-zu-Ort-Verbindungen zu erfüllen. Trotzdem sollte bei der Planung der angebotenen Relationen versucht werden, den Wünschen der Kunden möglichst gerecht zu werden. Dabei stehen vor allem zwei Ziele zueinander in Konkurrenz: Zum einen soll die Zugfahrt möglichst

---

<sup>59</sup> Der aktuelle Bundesverkehrswegeplan ist aus dem Jahr 2003 und liegt mit [BMVBW 2003] vor. Kritische Betrachtungen hierzu enthalten [Müller 2003] sowie [Willeke 2003].

<sup>60</sup> Vgl. hierzu auch die Strategie „Netz 21“ der Deutschen Bahn AG, die in [Fricke 2001] erläutert wird.

<sup>61</sup> Ein umfassenden Überblick über Zielkriterien zur Planung von Haltepunkten für den städtischen Bereich gibt [Jha/Oluokun 2004]. Als Lösungsmethode wird dort ein genetischer Algorithmus eingesetzt.

schnell gehen, zum anderen soll der Zugang zum Netz an möglichst vielen Punkten möglich sein. Dieser Problematik entgegenen die meisten Eisenbahnverkehrsunternehmen durch verschiedene Produktgattungen: Züge mit hohen Geschwindigkeiten und wenigen Zwischenhalten verbinden wichtige Knotenpunkte des Netzes miteinander. Der breite Zugang zum Netz wird durch langsamere Regionalzüge, die auch in kleineren Städten anhalten, gewährleistet. Dazwischen existieren meist noch andere Kategorien. Die Verknüpfung der Netzzugangspunkte mit dem örtlichen Nahverkehr (Bussen, Straßen- und U-Bahnen etc.) sorgt dann für die Möglichkeit, die komplette Reise im öffentlichen Personenverkehr zu bewältigen.

Der Planungsschritt, der sich an die Festlegung der Zuggattungen anschließt, ist die Linienplanung. Ziel der Linienplanung ist, aus einer Vielzahl möglicher Linien und unter Beachtung der vorhandenen Restriktionen eine optimale Menge an Linien zu bestimmen. Restriktionen ergeben sich aus dem durch die Netzstrukturplanung bestimmten Netz als auch durch die zur Verfügung stehenden Zugklassen, d. h. durch die unterschiedlichen Eigenschaften (Komfort, Geschwindigkeit etc.) der physischen Züge und ihrer Anforderungen (Trassenbeschaffenheit, Elektrifizierung etc.) an die Strecke.

Auch bei der Linienplanung müssen sich die Eisenbahnverkehrsunternehmen nach der Kundennachfrage richten: Tagsüber verkehren beispielsweise die Hochgeschwindigkeitszüge der Klasse ICE auf den wichtigsten Strecken bis zu zweimal in der Stunde. In vielen Fällen wird die Taktdichte am frühen Morgen sowie am späten Abend ausgedünnt. Neben einer hohen Taktdichte ist natürlich die Abstimmung der Ankunfts- und Abfahrzeiten der einzelnen Linien aufeinander ein wichtiges Qualitätsmerkmal aus Sicht des Kunden, da nur gut abgestimmte Fahrpläne geringe Wartezeiten an Umsteigestationen garantieren. Mögliche Optimierungsziele sind neben der Abdeckung der Nachfrage die Minimierung der Betriebskosten (vgl. [Claessens et al. 1998]), die Maximierung der Anzahl der Direktverbindungen oder die Minimierung von Wartezeiten.

Eine Übersicht über mehrere Optimierungsverfahren sowie eine detaillierte Betrachtung der Linienplanung ist in [Bussieck 1998] zu finden.

Im weiteren Planungsablauf wird das Schienennetzwerk in seine einzelnen Subnetze aufgeteilt. Die aus der O/D-Matrix vorgegebenen Bedarfe werden auf die Einzelnetze adaptiert, und für jedes dieser Netze wird per Optimierung entsprechend der Zielsetzungen ein Linienplan generiert. Die sich daraus ergebenden Linien sind die Basis für die Fahrlagenplanung.

#### II.3.4.2 Fahrlagenplanung

Die Fahrlagenplanung bestimmt auf Basis des erstellten Linienplans einen periodischen oder nichtperiodischen Fahrplan, also die zeitlichen Lagen der Züge im Verhältnis zueinander. In Deutschland gibt es seit der Einführung des Intercity 1971 mit einem Zweistundentakt einen periodischen Fahrplan. Dabei werden die Ankunfts- und Abfahrtszeiten der Züge in den einzelnen Knoten (Stationen) der jeweiligen Linien derart festgelegt, dass die Linien im vor-

gegebenen Takt bedient werden können. Zusätzlich beinhaltet der Plan die einzelnen Fahrzeiten zwischen allen Stationen, auch wenn der jeweilige Zug dort nicht hält<sup>62</sup>.

Der Fahrplan ist das bei der gesamten Planung des Betriebsablaufes zentrale Element. „Unter dem Fahrplan wird allgemein die vorausschauende Festlegung des Fahrverlaufs der Züge verstanden“ ([Pachl 2002], S. 25). Laut Pachl dient die Fahrplankonstruktion<sup>63</sup> grundsätzlich drei Aufgaben: Koordination der aus der jeweiligen Linien- und Fahrlagenplanung resultierenden Trassenwünsche der EVU, Bereitstellung der maßgeblichen Informationen zur Beschreibung des Soll-Betriebsablaufes für die Betriebsdurchführung und Information der Kunden der EVU. Der Netzbetreiber erstellt letztendlich den Fahrplan.

Die wichtigste Anforderung an einen Fahrplan ist, dass er „wahr“ sein muss. Dies ist erfüllt, wenn „die verwendeten Fahrzeiten korrekt sind und sich bei pünktlichem Betrieb keine Behinderung zwischen den Zügen ergeben“ ([Gröger 2002], S. 16). Neben diesem grundlegenden Aspekt gibt es weitere Qualitätsmerkmale für Fahrpläne (vgl. [Pachl 2002], S. 25f.), nämlich:

- die *Planungsqualität*: Der Fahrplan muss mit den Trassenwünschen der Kunden übereinstimmen.
- die *Stabilität*: Der Fahrplan muss robust gegenüber Störungen sein, d. h., er muss die Fähigkeit besitzen, Verspätungen abzubauen. Die Robustheit des Fahrplans beeinflusst daher maßgeblich die Auswirkungen von Dispositionsentscheidungen: Je stabiler der Fahrplan, desto „einfacher“ ist die Disposition.
- die *Betriebsqualität*: Der Fahrplan muss *im Betriebsablauf* seine Qualität beweisen.

Da die DB Netz AG ein Wirtschaftsunternehmen ist, spielen über die Qualitätsüberlegungen hinaus wirtschaftliche Aspekte bei der Fahrplankonstruktion eine Rolle. So ist die Netz AG darum bemüht, ihre vorhandene Infrastruktur möglichst gut auszulasten.

Bis in die 90-er Jahre wurde der Fahrplan bei der Bahn manuell erstellt. Später wurde verstärkt auf Rechnerunterstützung zurückgegriffen; mittlerweile existieren Vorschläge, die Fahrpläne komplett automatisch zu erstellen. War deren Konstruktion vor der Bahnreform eine „unternehmensinterne“ Aufgabe der Deutschen Bahn, so hat sich dies mit der Trennung von Infrastruktur und Transport geändert. Die DB Netz AG hat nun die Aufgabe, die Trassenwünsche aller Eisenbahnverkehrsunternehmen diskriminierungsfrei zu berücksichtigen. Die ohnehin komplexe Aufgabe der Fahrplanerstellung gewann dadurch ein weiteres, problematisches Moment. Deswegen wird z. B. in [Moreira et al. 2004] eine Methodik, wie Verhandlungen über Kapazitäten *vor* der Erstellung eines Fahrplans stattfinden können, abgeleitet.

---

<sup>62</sup> Im Streckennetz der Deutschen Bahn existieren insgesamt ca. 6.500 Personenbahnhöfe, von denen in 2004 noch 5.477 bedient wurden.

<sup>63</sup> Seitdem die Trennung von Netz und Transport im Zuge der Bahreform vollzogen wurde, wird anstelle von „Fahrplankonstruktion“ auch häufig der Terminus „Trassenmanagement“ verwendet.

Eine detaillierte Darstellung von Verfahren und Ansätzen zur Fahrplanerstellung ist z. B. in [Gröger 2003] zu finden. Das meistgenannte Zielkriterium bei der Fahrplangenerierung ist die Minimierung der Zeit des Reisenden im System, also eine möglichst kurze Reisezeit und minimale Wartezeiten beim Zugwechsel resultieren. Bspw. wird in [Katori et al. 2004] ein genetischer Algorithmus zur Bestimmung von Haltepunkten schneller und langsamer Züge auf einer Strecke mit dem Ziel der Verkürzung der Gesamtreisezeit der Passagiere vorgestellt.

Ferner sollte der Fahrplan so gestaltet sein, dass die Takte der einzelnen Linien gut auf einander abgestimmt sind. So ist es beispielsweise für Kunden aus Regionen mit geringer Siedlungsdichte wichtig, dass die Takte der Nahverkehrszüge als Zu- und Abbringer zu den Fernzügen auf deren Takte abgestimmt sind. Interessanterweise wird in [Vromans et al. 2004] ein positiver Effekt auf die Robustheit eines Fahrplans ermittelt, wenn die Anzahl Halte unterschiedlicher Zugklassen auf einer Strecke homogenisiert wird. Mit der Optimierung von Wartezeiten im Falle von Anschlusskonflikten beschäftigt sich ebenfalls [Tagaki et al. 2004]. Es wird u. a. gezeigt, dass die Kenntnis der tatsächlichen Passagierströme von essentieller Bedeutung für komplizierte Zielfunktionen ist; kleine Änderungen im Input zeitigen u. U. große Änderungen im Ergebnis.

Andere denkbare Optimierungsziele sind, wie angedeutet, die Maximierung des Profits bzw. die Minimierung der Kosten für benötigte Ressourcen, gelegentlich auch die Minimierung von Zeitintervallen für den Umstieg auf gefragten Routen, vgl. z. B. [Lindner 2000]. In Konflikt damit steht die Maximierung der Zuverlässigkeit eines Fahrplans im Falle von Verspätungen bzw. die Robustheit oder Stabilität eines solchen. So wird eine hohe Stabilität durch Fahrzeitzuschläge und Pufferzeiten erreicht<sup>64</sup>, die wiederum verlängerte Fahrzeiten und Zugabstände sowie eine geringere Auslastung der Infrastruktur zur Folge haben.

Ein Überblick über weitere Optimierungsmodelle für die Fahrplangenerierung wird in [Cordeau et al. 1998] gegeben. Neben den bisher genannten Zielen sind noch zusätzliche Restriktionen bei der Erstellung zu beachten, bspw. Sicherheitsaspekte oder die Beachtung beschränkter Überholmöglichkeiten auf einer Strecke. Zusätzlich soll für jede Linie der Zugtyp entsprechend den Anforderungen ausgewählt werden.

Darüberhinaus diskutiert Hansen verschiedene Methoden zur Fahrplanoptimierung mittels eines stochastischen Ansatzes zur Schätzung von Belegungs- und Pufferzeiten an erkannten Flaschenhälsen eines Fahrplans, um letztlich die Fahrplankapazität zu erhöhen. Dabei bezieht er zur Schätzung Messdaten aus der Praxis ein (vgl. [Hansen 2004]). Ebenfalls mit der Fahrplanoptimierung beschäftigt sich [Lova et al. 2005]. Insbesondere werden dabei allerdings neue Züge in bereits existente Fahrpläne innerhalb hochausgelasteter Netze integriert.

Zusätzlich existieren diverse weitere Arbeiten zur Fahrplanung, vgl. z. B. [Gröger 2004], [Kaas/Goossman 2004] und [Radtke/Hauptmann 2004], deren Arbeiten allesamt simulationsgestützte Ansätze vorstellen.

---

<sup>64</sup> Eine sehr gute Darstellung der verschiedenen Arten von Zuschlägen findet sich in [Pachl 2002], S. 122ff.

### II.3.4.3 Zugweise Fahrplanung

Im letzten Schritt wird der erstellte Fahrplan unterschiedlichen lokalen Anforderungen angepasst, d. h., die einzelnen Fahrten werden von erfahrenen Planern optimiert. Bspw. sind auf eingleisigen Trassen die Abfahrtszeiten der Züge aus unterschiedlichen Richtungen derart zu wählen, dass eine Passiermöglichkeit gegeben ist, ohne zu lange Wartezeiten eines Zugs am Passierpunkt zu induzieren. Außerdem ist zu überprüfen, ob der angegebene Zeitplan mit der Durchfahrt durch die einzelnen Bahnhöfe unter Beachtung der jeweiligen Kapazität, der Sicherheit und des Kundenservicegrads eingehalten werden kann. Eine Beschreibung dieser Problematik ist in [Zwaneveld et al. 2001] zu finden. Die Fahrplanung muss außer räumlichen Restriktionen auch zeitliche Aspekte, z. B. Auslastungsspitzen im Feierabendverkehr, berücksichtigen.

Auch und gerade technische Aspekte können in diesem Schritt optimiert werden, bspw. Energie- bzw. Treibstoffverbrauch einzelner Zugtypen auf bestimmten Strecken. Ein interessantes Beispiel dazu findet sich in [Ko et al. 2004].

### II.3.5 Operative Planungsebene

Diese Phase beinhaltet die kurzfristige Planung des Fahrzeug- und Personaleinsatzes und beschäftigt sich mit der Durchführung von Maßnahmen, die einen einwandfreien Ablauf des Systems ermöglichen. Der Einsatz von mathematischen Modellen für die Optimierung und Entscheidungsfindung findet überwiegend in dieser Planungsebene statt, da deren Effizienz in diesem Bereich naturgemäß am größten ist: mit zunehmender zeitlicher Nähe der Ausführung liegt zum einen eine bessere Datenbasis bzgl. zur Verfügung stehender Ressourcen vor, zum anderen sind Zielsetzungen und Restriktionen am genauesten zu spezifizieren. Allerdings werden die mathematischen Modelle in dieser Phase extrem groß, ohne bisher dabei sämtliche denkbaren Planungsrestriktionen zu umfassen. Die Planungsergebnisse dieser Stufe haben den größten Einfluss auf die eigentliche Disposition, sodass die hier verwendeten Zielkriterien als maßgeblich für dispositive Maßnahmen anzusehen sind.

#### II.3.5.1 Fahrzeugeinsatzplanung (Fleet Assignment)

Die Aufgabe der Fahrzeugeinsatzplanung ist die Zuweisung von Lokomotiven und Personenwagen zu den einzelnen Fahrten, die in der Fahrlagenplanung erstellt wurden. Aus den vorangehenden Planungsstufen sind die Anfangs- und die Endstationen mit den dazugehörigen Abfahrts- und Ankunftszeiten der einzelnen Linien bekannt. Die Wahl der Zuggattung inkl. Lokomotiventyp, die Anzahl der Reisezugwagen insgesamt, deren Aufteilung in Wagen der ersten und zweiten Klasse und Zusatzausstattungen des Zugs (z. B. Speisewagen) basieren wiederum auf dem erwarteten Passagieraufkommen und den Kundenanforderungen für die jeweilige Linie. Die Länge und Zusammensetzung kann dabei während der Fahrt zusätzlich durch An- und Abkoppeln einzelner Wagen variiert werden<sup>65</sup>. Ziel der Planung ist es, die be-

---

<sup>65</sup> In der Praxis wird jedoch versucht, dies weitgehend zu vermeiden, da es sich um einen zeit- und ressourcenintensiven Vorgang handelt.

nötigten Lokomotiven und Personenwagen vor Fahrtbeginn an der jeweiligen Abfahrtsstation zur Verfügung stellen zu können. Im Schienennetz der Deutschen Bahn AG bedeutet dies, die vorhandenen ca. 10.000 (aktiven) Reisezugwagen und über 2.200 Lokomotiven den insgesamt 4,7 Mio. Reisenden pro Tag zuzuordnen (vgl. [DB 2005h]). Die hauptsächliche Schwierigkeit der Fahrzeugeinsatzplanung besteht in der beschränkten Kapazität der Ressourcen, der Berücksichtigung ihrer Instandhaltungsanforderungen sowie der Lage der Depots. Wären z. B. vor Beginn der Fahrt nicht genügend Lokomotiven und Personenwagen am Startort vorhanden, müssten diese vom Endpunkt der Linie wieder zurückgeführt oder an Stationen unter Beachtung der benötigten Kapazität angekoppelt werden.

Ein Optimierungsziel für die Fahrzeugeinsatzplanung, insbesondere bei großen Bahnunternehmen, ist die Minimierung des Einsatzes von Fahrzeugen für alle Linien. Damit verbunden sind geringere Kosten für den Transportservice durch die Minimierung der Instandhaltungs- und Investitionskosten für Fahrzeuge und eine Reduzierung der Betriebskosten. In [Schumacher et al. 2004] werden Restriktionen, die bei der Fahrzeugeinsatzplanung wirksam werden, beschrieben. Modelle und/oder Methoden zur Lösung dieser Problematik werden u. a. in [Schrijver 1993], [Löbel 1997], [Biederbick 2000], [Mellouli 2003] oder auch [Mellouli/Suhl 2005] behandelt.

### II.3.5.2 Dienstplanung (Crew Scheduling)

Für die in den bisherigen Planungsphasen erstellten Fahrten müssen schließlich geeignete Arbeitspläne für das benötigte Bordpersonal erstellt werden. Dieses besteht aus Zugführer und mehreren Zugbegleitern, der Crew. Die Dienstplanung von Service-, Catering- und Reinigungspersonal, welche im Bereich der Deutschen Bahn AG teilweise von Subunternehmen durchgeführt wird, wird hier nicht weiter betrachtet.

Die allgemeine Dienstplanung im Schienenverkehr setzt sich in der Praxis aus der eigentlichen *Dienstplanung* und der *Dienstumlaufplanung* für das Bordpersonal zusammen. In der Dienstplanung wird ein geeigneter Satz von Schichten für die Bordpersonalbesetzungen bestimmt. Diese Schichten beinhalten jeweils mehrere Teilstücke von Fahrten für die Bordpersonalbesetzungen innerhalb eines bestimmten Zeitraums, in der Regel für ein oder zwei Tage. Die Generierung der Dienstpläne soll vornehmlich die Anzahl der benötigten Bordpersonalbesetzungen für den Einsatzplan minimieren, womit zugleich eine Minimierung der Personalkosten impliziert wird. Oftmals ist die Optimierung dabei bestimmten Restriktionen (Arbeitszeitregelungen, Ruhezeiten, sonstige betriebliche Regelungen etc.) unterworfen. Ein Optimierungsmodell zur Kostenminimierung wird in [Caprara et al. 1997] erläutert. In [Kroon/Fischetti 2000] wird ein Modell beschrieben, das die Stabilität eines Dienstplans maximiert. Auch hier gilt wiederum: Je stabiler der Dienstplan, desto einfacher wird die Disposition, wenn eine Besetzung oder ein Teil dieser – z. B. durch Krankheit – ausfällt.

Die Dienstumlaufplanung beinhaltet dann die Bildung von Arbeitsplänen für jede einzelne Bordbesetzung über einen größeren Betrachtungszeitraum (bspw. ein Monat) hinweg. Dabei müssen die in der ersten Phase erstellten Dienste für jeden Tag durch die einzelnen Arbeitspläne des gesamten Bordpersonals abgedeckt werden. Optimierungsziel ist auch hier die Mi-

nimierung der Anzahl benötigter Bordbesetzungen für alle Dienste. Eine genauere Betrachtung der zweiten Phase findet sich in [Caprara et al. 1998].

Im Zuge der Neugestaltung der Einsatzplanung des Bordpersonals im Personenverkehr hat die Deutsche Bahn das Programm *Carmen* der Carmen Systems (<http://www.carmen.se>) eingeführt, um den Dispositionsaufwand und die Betriebskosten für das Personal zu reduzieren. Das Programm soll optimale Dienste für einen gegebenen Fahrplan unter automatischer Berücksichtigung von Arbeitszeitregelungen, Ruhezeiten und anderen Regelungen berechnen, vgl. [Kohl 2003].

### II.3.5.3 Disposition

Die Disposition ist maßgeblich für die Durchführung des reibungslosen Ablaufs im Schienenverkehr. Bei dem auf strategischer und operativer Ebene ermittelten Planungsablauf kann es während der Ausführung zu unerwarteten Beeinträchtigungen kommen. Aufgabe der Disposition ist es dann, schnellstmöglich Entscheidungen zu treffen, die – unter Einhaltung der gegebenen Fahrplanrestriktionen – den ordnungsgemäßen Ablauf des Betriebes wiederherstellen. Die Durchführung des Entscheidungsprozesses erfolgt durch Disponenten, die einen räumlich begrenzten Ausschnitt des Bahnnetzes überwachen und im Falle einer Störung eingreifen müssen. Dies geschieht entweder manuell oder mit Hilfe mathematischer Entscheidungshilfen, unter Einsatz moderner Informationstechnologie. Eine weiterführende und strukturiere Betrachtung dieser Dispositionsproblematik aus theoretischer Sicht und am Beispiel der Deutschen Bahn AG erfolgt im nächsten Abschnitt.

## II.4 Disposition im Schienenverkehr in Theorie und Praxis

Nachdem alle im vorigen Abschnitt beschriebenen Planungsprobleme und Optimierungsmodelle gelöst wurden, gilt es nun, den öffentlich gemachten Fahrplan umzusetzen. Aus mehrererlei Gründen muss die Disposition als extrem wichtige Phase des PPS-Prozesses angesehen werden:

- Während in den vorgelagerten Phasen die Kosten nur *geplant* wurden, fallen sie jetzt *tatsächlich* an. Dabei kann es dazu kommen, dass die in den vorgelagerten Stufen u. U. sogar optimal gelösten Ressourcenzuordnungen in praxi höhere Kosten verursachen, weil z. B. keine Pufferzeiten mehr eingeplant wurden, um die Störanfälligkeit eines Plans zu vermindern (vgl. [Demitz et al. 2004], [Barter 2004] oder auch [Rosenberger et al. 2002]).
- Erst während der Disposition besteht *echter Kundenkontakt*, d. h., eine schlechte Disposition sorgt unmittelbar für unzufriedene Kunden.
- Die Disposition ist *zeitkritisch*: Umfangreiche Analysen oder Berechnungen können nicht erfolgen. Trotzdem sollte sie alle der oben dargestellten sowie einige zusätzliche Zielkriterien berücksichtigen.
- Erst in dieser Phase fallen die zuvor gemachten Planungsfehler auf – nur während der Disposition können Planer Erfahrungen über Korrekturmaßnahmen sammeln.

Im folgenden Abschnitt wird daher zunächst die Dispositionsproblematik theoretisch beleuchtet. Dazu werden grundlegende Begrifflichkeiten erörtert und Disposition als Optimierungsproblem eingeordnet.

Im Anschluss werden verschiedene existente Ansätze zur informationstechnischen Unterstützung der Disposition diskutiert, bevor der konkrete Ablauf der Disposition im Bereich der Deutschen Bahn AG, gleichsam als Istanalyse zu verstehen, geschildert wird. Dies geschieht u. a. am Beispiel der regionalen Leitstelle in Hannover. Darunter fallen auch Technologien und Voraussetzungen im Bahnsystem, die der Unterstützung der Disposition und damit der Verbesserung der Kundenzufriedenheit dienen.

### II.4.1 Begriffliche Grundlagen

Offensichtlich ist die Pünktlichkeit der ca. 29.000 Züge im Personenverkehr einer der wichtigsten Maßstäbe für die Servicequalität im täglichen Betrieb. Dies gilt sowohl aus Sicht der Bahn als auch aus Sicht der Kunden, insbesondere im Hinblick auf die kundenorientierte Disposition. Daher ist ein Fahrplan, der ein hohes Maß an Pünktlichkeit und Stabilität bietet, eine Grundlage für die Kundenzufriedenheit.

Aus theoretischer Sicht stellt die Disposition eine Art Regelkreis dar: *Ursachen* verschiedener Art sorgen für *Störungen* bei der Durchführung des Fahrplans, die ihrerseits weitere Verzögerungen hervorrufen. Ab einer gewissen Größenordnung führt dies zu *Konflikten*. Um die mit den Konflikten verbundenen Auswirkungen auf den Fahrplan zu begrenzen und einen ordnungsgemäßen Ablauf wiederherzustellen, kann ein Disponent bestimmte *Maßnahmen* ergreifen. Diese können und werden ihrerseits Ursachen für weitere, *induzierte Störungen* und *Konflikte* sein. Dieser *Regelkreis der Disposition* ist in Abbildung 8 dargestellt und wird im Folgenden Sektor für Sektor, beginnend bei den Störungen, erläutert.

#### II.4.1.1 Störungen und Verspätungen

Der Zugverkehr im Netz ist, wie in den vorigen Abschnitten beschrieben, an einen fest vorgegebenen Taktfahrplan gebunden. Im täglichen Betrieb wird jedoch der Bahnverkehr immer wieder von unvorhergesehenen Störungen betroffen.

Störungen resultieren aus vielerlei Ursachen, begonnen beim Personal, welches durch Verspätung, Krankheit oder aus anderen Gründen nicht einsatzbereit ist, bis zu Störungen an Triebwagen, Waggons oder anderen technischen Einrichtungen des Zugs. Weiterhin können Defekte am Streckennetz auftreten, wie z. B. an Signalen oder Weichen. Sind die bisher genannten Störungen noch im gewissen Maße einkalkulierbar, können auch Schäden durch höhere Gewalt, wie Unwetter, oder Sabotage vorkommen. Nicht zu vernachlässigen sind auch Personenschäden durch Unfall oder Suizid, von denen pro Jahr im gesamten Schienennetz nach Aussagen von Mitarbeitern der Bahn ca. 2.000 auftreten<sup>66</sup>, und die den Verkehr auf der jeweils betroffenen Strecke selbstverständlich für mehrere Stunden behindern. Eine Statistik

---

<sup>66</sup> Dabei variieren die Aussagen im niedrigen Tausenderbereich. In jedem Fall ziehen Personenschäden beträchtliche Verkehrsbeeinflussungen nach sich.

über die Verteilung der verschiedenen Störungsursachen wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht erhoben und ist nach Wissen des Autors auch nicht öffentlich publiziert. Nachfolgend erfolgt eine kurze Kategorisierung verschiedener Störungstypen.



Abbildung 8: Der Regelkreis der Disposition im Schienenverkehr

Im Allgemeinen werden die im Schienenverkehr auftretenden Störungen oft mit *Verspätungen* gleichgesetzt, da sie als solche nach außen sichtbar werden. In der Literatur sind verschiedene Ansätze bezüglich der Klassifizierung von Verspätungen dargestellt. Diese Klassifikation dient zumeist als Grundlage für die Entwicklung von Modellen für die Erstellung eines konfliktfreieren Fahrplans und dem effizienteren Einsatz von Dispositionsmaßnahmen hinsichtlich eines optimalen Betriebsablaufs. Dabei sind die Kenntnis über das Ausmaß und die Häufigkeit der entstandenen Verspätungen in verschiedenen Situationen von Bedeutung.

Der erste Ansatz nach [Adenso-Díaz et al. 1999] oder auch [Biederbick/Goecke 2000] unterteilt die auftretenden Verspätungen in drei Kategorien. Die Aufteilung erfolgt dabei anhand der Auswirkungen auf den Betriebsablauf und der Notwendigkeit des Einsatzes von Dispositionsmaßnahmen.

- *Kategorie I* umfasst Verspätungen, die sich nur auf ein Objekt im System beziehen und ansonsten keinen Einfluss auf andere Systembestandteile ausüben. Konkret bedeutet dies, dass das Ausmaß einer Verspätung so gering ist, dass kein Anschlusszug verpasst werden wird, wenn nichts Unvorhergesehenes passiert. Der Reiseverlauf des Kunden wird in diesem Fall nur durch die Dauer der Ausgangsstörung beeinträchtigt, nicht aber durch eventuelle Folgeverzögerungen. Dispositionsmaßnahmen sind demnach aufgrund der Konfliktfreiheit für Verspätungen der Kategorie I nicht erforderlich. Allerdings kann es vorkommen, dass mehrere Verspätungen dieser Kategorie den gleichen Zug betreffen, wodurch die akkumulierte Gesamtverspätung eventuell in einer der höheren Kategorien fällt.
- Bei *Kategorie II* handelt es sich um Verspätungen, die durch ihr Eintreten andere Systembestandteile beeinflussen. Die Auswirkungen sind allerdings überschaubar, sodass ein Störungsmanagement durch globale Regelsysteme möglich ist. Verspätet sich im täglichen Bahnbetrieb ein Zug aufgrund einer Störung dieser Kategorie, werden die auftretenden Verspätungen über die „Wartezeitregeln für Anschlussverbindungen“ behandelt (vgl. Abschnitt II.4.4.4). Diese Regelwartezeiten beinhalten einen bestimmten Zeitpuffer, in dem Züge an Knotenpunkten aufeinander warten, sodass Anschlüsse für die Reisenden sichergestellt sind. Liegt die Dauer der Verspätung innerhalb dieses Zeitpuffers entsteht kein Konflikt, und Dispositionsmaßnahmen sind nicht erforderlich.
- Durch Verspätungen der *Kategorie III* entstehen folgerichtig *Konflikte*. In diesem Fall werden durch eine auftretende Verspätung andere Systembestandteile derart beeinflusst, dass ein Störungsmanagement über globale Regelsysteme nicht mehr möglich ist. Konsequenz ist die Notwendigkeit der Anwendung von Dispositionsmaßnahmen, um den Konflikt aufzulösen.

Eine andere, gängige Unterteilung der Störungen differenziert hinsichtlich der Ursache des Auftretens (vgl. z. B. [Carey 1999] und [Zhu/Schnieder 2001]):

- Wenn im Bahnbetrieb die Fahrt eines Zugs direkt durch eine Störung beeinträchtigt wird, dann wird dieses als *primäre Verspätung* bezeichnet. Die Störungen werden dabei i. A. nicht durch Fehler im Fahrplan verursacht, sondern sind meist Ergebnis von Ereignissen wie technischen Fehlern, Organisationsfehlern oder Witterungseinflüssen. Das Ausmaß der Verspätung ist dabei abhängig von der Art, Lokalität, Dauer, Ausdehnung und dem Zeitpunkt der jeweils auftretenden Störung. Das Auftreten dieser Art von Störungen ist nicht bzw. nur begrenzt steuerbar, sodass eine Vorhersage ihres Eintritts nur anhand von Erfahrungswerten möglich ist (vgl. [Huisman/Boucherie 2001]). Eine Verminderung der Auswirkungen durch dispositive Maßnahmen ist hierbei nicht oder kaum möglich (vgl. [Carey 1999]). In der Literatur finden sich mehrere Modelle, die sich mit den Auswirkungen von primären Verspätungen befassen. So wird in [Huisman/Boucherie 2001] ein Modell beschrieben, welches den Einfluss primärer Verspätungen regionaler Züge sowie deren Auswirkungen bestimmt. Dabei

werden die Verspätungen für InterCity- und InterRegio-Züge auf der Strecke zwischen Ammersfoort und Zwolle in den Niederlanden in Abhängigkeit von der Verspätung regionaler Züge sowie die Wahrscheinlichkeit der Verspätungen modelliert. Ein anderes Modell wird in [Zhu/Schnieder 2001] dargestellt. Dieses kann unter anderem zur Bestimmung der primären Verspätungen aufgrund von technischen Fehlern verwendet werden.

- *Sekundäre* oder *induzierte Verspätungen* werden durch primäre Verspätungen von Zügen verursacht und entstehen durch die verschiedenen technischen und organisatorischen, durch den Fahrplan determinierten Abhängigkeiten der Züge untereinander. Die entstandenen Sekundärverspätungen können ihrerseits wiederum sekundäre Verspätungen generieren. Die Ausbreitung von primären im Vergleich zu sekundären Verspätungen ist dabei abhängig vom Aufbau des Schienennetzes, der Verkehrsdichte und den verwendeten Regelsystemen, weshalb eine effektive Disposition immer auch eine Reduktion von Sekundärkonflikten zum Ziel haben muss.<sup>67</sup> Es gibt prinzipiell zwei Arten sekundärer Verspätungen. Die erste entsteht in Bahnhöfen, wenn ein Zug zur Sicherstellung des Anschlusses auf einen verspäteten Zug warten muss. Die zweite Art entsteht durch eine wechselseitige Behinderung von Zügen an Konfliktpunkten als direkte Konsequenz in Bezug auf eine Beschränkung der Ressourcen des Bahnsystems, wenn z. B. ein Zug einen verspäteten Zug überholen oder passieren lassen muss. In [Carey 1999] werden mehrere Heuristiken vorgestellt, welche die Zuverlässigkeit des Fahrplans verbessern sollen. Dabei werden unter anderem verschiedene Sekundärverspätungen und deren Ausbreitung unter Berücksichtigung ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit analysiert.

Eine andere Terminologie verwendet schließlich Jacobs, der jedoch ebenfalls nach dem Ursprung (vgl. [Jacobs 2003], S. 25ff.) klassifiziert:

- *Urverspätungen* werden durch äußere Einflüsse bzw. Störungen verursacht, und
- *Folgeverspätungen* haben ihre Ursache in anderen Verspätungen

Zusätzlich dazu nennt er

- *Einbruchsverspätungen*, die eintreten, wenn verspätete Züge in den zu disponierenden Netzbereich eines Disponenten eintreten.<sup>68</sup>

Generell gilt: Kleinere Verspätungen können häufig aufgrund der im Fahrplan vorhandenen Pufferzeiten wieder aufgeholt werden.

---

<sup>67</sup> Eine extreme Strategie wäre z. B. „Immer Warten, bis der Zubringer eintrifft“. Diese würde eine maximal schnelle Ausbreitung von Störungen zur Folge haben.

<sup>68</sup> Logischerweise existieren analog dazu Ausbruchsverspätungen.

### II.4.1.2 Konflikte

Da das Schienennetz der Deutschen Bahn an einigen Stellen sehr stark ausgelastet ist, lösen Verspätungen oftmals Konflikte aus. Das Erkennen und Lösen entstandener Konflikte ist ein zentraler Bestandteil des Dispositionsprozesses. Martin definiert einen Konflikt als „unvorhergesehen auftretendes Ereignis, das Abweichungen vom geplanten Betriebsablauf zur Folge hat und eine Entscheidung zwischen mindestens zwei Varianten erzwingt“ (vgl. [Martin 1998], S. 314). Der veränderte Istzustand kann in diesem Zusammenhang nicht mehr durch globale, automatisierte Regelsysteme behandelt werden, weil Ressourcen wie Züge, Personal, Bahnhöfe oder Strecken zum vorgegeben Zeitpunkt schlicht nicht verfügbar sind, weswegen nicht alle technischen und organisatorischen Anforderungen an den Ablauf erfüllt werden können. Eine Entscheidung durch einen menschlichen Disponenten ist erforderlich.

Besonders wichtig – vor allem aus Sicht der kundenorientierten Disposition – innerhalb des Dispositionsprozesses ist die *Auswirkung des Konfliktes auf den Kunden*. Es lässt sich unterscheiden zwischen für den Kunden direkt relevanten bzw. zu bemerkenden Konflikten einerseits und Konflikten, von denen Kunden nicht direkt betroffen sind oder die ihnen nicht auffallen, andererseits. Beispiel dafür wäre ein durch den Fahrplan festgelegter, planmäßiger Zielort, der nicht über die vorgesehene physikalische Route des Bahnnetzes erreicht werden kann, weil diese bereits belegt oder gänzlich gesperrt ist. Ein Kunde wird den aufgetretenen Konflikt u. U. nicht einmal bemerken, wenn alternative Routen (oder Ausweichstrecken) existieren, über die das Ziel noch rechtzeitig zu erreichen ist. Ein solcher Konflikt ist aus Kundensicht irrelevant, während z. B. ein verpasster Anschluss oder ein aufgrund einer Fehlplanung nicht abfahrbereiter Zug den Kunden unmittelbar betrifft.

Eine mögliche Kategorisierung auftretender Konflikte lässt sich wie folgt in Anlehnung an [Fay 2000a] und [Martin 98], S. 314ff. darstellen:

- *Fahrplankonflikte* treten auf, wenn eine Zugfahrt verfrüht oder verspätet durchgeführt wird. Dies muss nicht zwangsläufig zur Beeinflussung anderer Zugfahrten führen. Die Planabweichung an sich bildet aber bereits eine Konfliktsituation hinsichtlich der Pünktlichkeit und der Wahrscheinlichkeit, zu einem weiteren Konflikt zu führen. Fahrplankonflikte haben somit grundsätzlich einen potenziellen Charakter und treten vorwiegend in Kombination mit den anderen Konfliktarten auf. Die eigentlich wichtige Untergruppe der Fahrplankonflikte sind die *Verspätungskonflikte*. Diese liegen vor, wenn eine geplante Zeit überschritten wird, d. h. der Zug unpünktlich ist.<sup>69</sup>
- *Anschlusskonflikte* sind die für diese Arbeit wichtigsten Konflikte, weil der Umsteigevorgang akut gefährdet ist. Es muss die Frage geklärt werden, ob und wie lang ein abfahrbereiter Zug auf seine Zubringer warten oder ob er gleich starten soll.
- *Umlaufkonflikte* treten immer dann auf, wenn Ressourcen (Besetzungen oder Züge) nicht zur richtigen Zeit (vor Fahrtbeginn) bereitgestellt werden können.

---

<sup>69</sup> Dabei stellt das Vorliegen einer negativen Verspätung – der Zug ist verfrüht – für die Praxis kein wirkliches Problem dar, weil ein Zug ohnehin nicht früher, als vom Fahrplan vorgegeben, losfahren darf.

- *Dispositionskonflikte* entstehen durch unterschiedliche Lösungsvorschläge für ein und denselben Konfliktfall in einem hierarchisch gegliederten Dispositionssystem. Diese sollten im Idealfall bereits durch den Entwurf eines Dispositionssystems vermieden werden. In der Praxis ist dies jedoch nicht immer möglich, weil Regional- und Fernverkehr das gleiche physikalische Schienennetz benutzen. Zwar hat der Fernverkehr in der Regel Vorrang, dies kann aber unter Umständen vom Disponenten des Regionalverkehrs nicht antizipiert werden. Eine weitere Möglichkeit zur Entstehung solcher Konflikte besteht, wenn unterschiedliche Methoden desselben Dispositionssystems eventuell zu unterschiedlichen Lösungen führen. Für diesen Fall muss eine Bewertungsfunktion existieren, welche die Lösungen unterschiedlich priorisiert.<sup>70</sup>
- *Deadlock-Konflikte* sind gekennzeichnet durch das Geben einer Starterlaubnis für eine bestimmte, als zulässig erachtete Fahrt, die aber später aufgrund irgendeiner Gegebenheit im System nicht fortgesetzt werden kann.
- *Fahrwegkonflikte* resultieren meist aus Planungsfehlern: Trotz unterschiedlicher planmäßiger Zielorte tritt eine zeitlich überschneidende Berührung der Fahrwege auf einem Streckenabschnitt auf.
- *Belegungskonflikte* schließlich treten auf, wenn mehrere Züge zur gleichen Zeit den gleichen planmäßigen Zielort (bzw. das gleiche Zielgleis) beanspruchen, bspw. aufgrund zuvor eingetretener Verspätungskonflikte.

Offensichtlich können nur Verspätungs- und Anschlusskonflikte direkt von Kunden wahrgenommen werden, wobei die reine Verspätung eines Zugs weitaus folgenloser ist als ein verpasster Anschluss, der normalerweise weitaus größere Verspätungen für den einzelnen Reisenden impliziert.

Ein auftretender Konflikt kann häufig mehreren der oben genannten Kategorien zugeordnet werden. Ferner unterscheiden sich die Konfliktarten bezüglich der Notwendigkeit zur Konfliktlösung: Während bspw. die Lösung von Fahrwegkonflikten aus Gründen der Betriebssicherheit zwingend notwendig ist, kann ein Anschlusskonflikt prinzipiell beliebig aufgelöst werden, wobei es ratsam erscheint, im Zweifel nicht zu warten, um die Verspätungsausbreitung einzudämmen. Gerade aus einer kundenorientierten Perspektive ist die Anschlusssicherung jedoch ein außerordentlich wichtiges Qualitätsmerkmal. Neben Dispositionsstrategien, die verpasste Anschlüsse minimieren, bildet ein von vornherein robuster Fahrplan – ausgestattet mit entsprechenden Pufferzeiten – hierfür die Grundlage.

#### II.4.1.3 Dispositive Maßnahmen

Die Aufgabe der Disposition ist nun, Maßnahmen einzuleiten, die zur Konfliktlösung dienen. Dispositive Maßnahmen beschränken sich dabei auf die Veränderung von betrieblichen Regelungen. Technische Beschränkungen, wie die Veränderung der maximalen Geschwindigkeit eines Zugs auf einem Streckenabschnitt, sowie die Zuggeschwindigkeit selbst, stehen entweder aus Sicherheitsüberlegungen oder wegen physikalischer Restriktionen als Maßnah-

---

<sup>70</sup> Dieses ist insbes. Auch für den hier gewählten Ansatz von Bedeutung.

men nicht zur Verfügung. Trotzdem existieren für eine Dispositionsabteilung wie der Betriebsleitung der Deutschen Bahn AG diverse Dispositionsmaßnahmen zur Konfliktlösung. Zu diesen zählen (vgl. [Jacobs 2003], S. 31ff.):

- Die *Verlängerung bzw. Verkürzung von Haltezeiten* oder die *Einführung zusätzlicher Haltepunkte* an Stationen im Schienennetz falls beispielsweise bei einem Überholungs halt der überholende Zug verspätet ist. Hierbei kann es unter Umständen auch nötig sein, den Fahrweg des langsameren Zugs zu verlegen.
- Die *Veränderung der Reihenfolge* von Zügen sowie die *Veranlassung eines Überholvorgangs*
- Die *Veränderung des Fahrweges* mit Umleitungen über relative Zielorte sowie die *Verlegung der Zugläufe* falls z.B. bei Ankunft eines verspäteten Zugs im Bahnhof das planmäßige Gleis belegt ist. Hierbei müssen evtl. Restriktionen wie eine ausreichende Bahnsteiglänge und vorhandener Fahrdrabt bei Elektrobetrieb beachtet werden. Bei Fahrwegalternativen auf der Strecke, beispielsweise auf mehrgleisigen Strecken, ist zudem zu beachten, dass die Signaltechnik für einen Betrieb in der gewünschten Fahrtrichtung ausgelegt ist.
- Die *Einführung zusätzlicher Züge* oder *Stornierung einzelner Zugfahrten* bzw. Zugverbindungen. Diese Maßnahme kann allerdings nur in Absprache mit den EVU durchgeführt werden. Es ist auch möglich, den Zug nur auf einer Teilstrecke ausfallen zu lassen, z. B. durch eine vorgezogene Wende, um so den Gegenzug wieder planmäßig verkehren zu lassen.
- Die *Veränderung der Abstände* zwischen den einzelnen Zügen, wobei diese aber den minimalen Sicherheitsabstand nicht unterschreiten dürfen. Dies wird erreicht durch *Fahrzeitverlängerungen*, die bei dichtem Betrieb auf einer Strecke und einer eingetretenen Störung eines Vorauszugs zur Verhinderung eines Auflaufkonfliktes erforderlich sein können.

Aus Sicht der Kunden ist insbesondere die Verlängerung/Verkürzung von Haltezeiten zu betrachten, weil Anschlusskonflikte normalerweise nur im Sinne „Warten“ oder „Nicht Warten“ aufgelöst werden können. Auch die Einführung zusätzlicher Haltepunkte ist interessant: Es ist denkbar, dass ganze Passagiergruppen durch Re-Scheduling unter Benutzung eines Zugs höherer Gattung einen Zielort erreichen können, wenn dieser Zug ausnahmsweise in diesem Ort hält.

Im Sinne der kundenorientierten Disposition können die dispositiven Maßnahmen um die Passagiersteuerung bzw. die Kommunikation mit dem Reisenden als zusätzliche Maßnahme erweitert werden.

#### II.4.1.4 Ursachen und Auswirkungen von Störungen

Der Regelkreis schließt sich mit der Betrachtung verschiedener Ursachen für die oben definierten Verspätungen und Konflikte. Die Ursachen für die auftretenden Störungen können in Anlehnung an [Fay 2000a] in mehrere Kategorien aufgeteilt werden:

- *Planungsfehler* resultieren aus fehlerhaften bzw. nicht optimal durchgeführten Teilbereichen der Produktionsplanung. Zu dieser Kategorie zählt z. B. eine schlecht entwickelte Umlaufplanung der Ressourcen. Die in der Fahrzeugeinsatzplanung für die Zuweisung zu den einzelnen Fahrten benötigten Ressourcen sind dabei vor Einsatzbeginn schlicht unverfügbar oder nur verspätet einsatzbereit. Das gleiche gilt für ein falsch geplantes *Wartungsrouting*<sup>71</sup> der Fahrzeuge bzw. zu gering kalkulierte Servicezeiten für die Wartung der Ressourcen. Eine nicht optimal durchgeführte Dienstplanung mit auftretenden Personalengpässen kann ebenso zu Verspätungen führen. Bei den sich ergebenden Konflikten handelt es sich demnach zumeist um Umlaufkonflikte, die ihrerseits Verspätungskonflikte und daraus resultierende Anschlusskonflikte verursachen. Mögliche Dispositionsmaßnahmen sind in diesem Fall die Einführung zusätzlicher Züge, um die jeweilige Verbindung aufrecht zu erhalten.

Außerdem umfassen Planungsfehler falsch festgelegte Ankunfts- und Abfahrtszeiten an einzelnen Bahnhöfen. Daraus können sich sowohl Verspätungskonflikte als auch Anschlusskonflikte resultieren. Maßnahmen zur Regulierung sind dann u. a. eine Verkürzung oder Verlängerung von Haltezeiten zur ordnungsgemäßen Wiederherstellung des Fahrplans.

- *Organisationsprobleme* beinhalten unter anderem Störungen durch verspätetes oder fehlendes Personal. Die Auswirkungen auf den Betriebsablauf sind davon abhängig, inwieweit und in welchem Zeitraum Ersatzbesetzungen oder Springer zur Verfügung stehen. Auch hier können wiederum durch Umlaufkonflikte verursachte Anschlusskonflikte und Verspätungskonflikte entstehen, die eventuell durch die Verkürzung von Haltezeiten aufgelöst werden können.

Organisationsprobleme treten auch dann auf, wenn Zusatzzüge aufgrund einer unplanmäßigen Steigerung der Verkehrsnachfrage eingesetzt wurden oder bspw. Güterzüge das Streckennetz *tagsüber* nutzen (müssen).<sup>72</sup> Mit der daraus resultierenden höheren Ausnutzung des Schienennetzes steigt die Wahrscheinlichkeit, dass Fahrweg- und Belegungskonflikte entstehen. Dispositive Maßnahmen können hierbei die Veränderung des Fahrweges mit Umleitungen über relative Zielorte sowie die Verlegung der Zugläufe sein.

- *Technische Fehler subsumieren* Störungen in Bahnhöfen, an Gleisanlagen und Signalen sowie an den Zügen.
  - Technische Störungen in Bahnhöfen führen dazu, dass sich die ursprünglich eingeplanten Haltezeiten verlängern. Dadurch entstehen Verspätungskonflikte,

---

<sup>71</sup> Regelmäßige Möglichkeiten für Wartungen müssen ebenfalls bereits in der Fahrlagenplanung berücksichtigt werden. Geschieht dies unzureichend, können Ressourcenengpässe entstehen, weil Wartungen natürlich immer vorrangig durchzuführen sind.

<sup>72</sup> Normalerweise wird versucht, den Güterverkehr zu den Zeiten abzuwickeln, in denen wenig Personenverkehr stattfindet.

die durch Verkürzung der Haltezeiten an den folgenden Bahnhöfen vermindert werden können.

- Störungen an Gleisanlagen können je nach Art und Lokalität des auftretenden Fehlers zu reduzierten Fahrgeschwindigkeiten des Zugs oder zu einer völligen Blockade der Gleisstrecke führen. Dabei entstehen primär Fahrweg- oder Verspätungs- und Belegungskonflikte. Bei einer Gleisblockade kommt es zu einem Deadlock-Konflikt. Zu treffende Maßnahmen sind in diesem Fall abhängig von der Art und Lokalität des Fehlers. Alle oben genannten Dispositionsmaßnahmen können hilfreich sein.
- Entsteht ein technischer Fehler am Zug, ergeben sich die gleichen Konfliktarten, und entsprechende Maßnahmen müssen eingeleitet werden.
- *Andere Fehler* umfassen schließlich menschliches Versagen und Umwelteinflüsse (z. B. wetterbedingte technische Störungen) bzw. *höhere Gewalt*.
  - Bei den teilweise sehr komplexen Aufgaben und Anforderungen im System Bahn kann es immer wieder zu Fehlern bei der Ausführung der jeweiligen Tätigkeiten kommen. Diese können dabei je nach Mitarbeiter und Arbeitsplatz zu allen möglichen Konflikten führen.
  - Umwelteinflüsse sind – ebenso wie menschliches Versagen – nur in engen Grenzen<sup>73</sup> vorhersehbar. Mögliche Fehler sind z. B. beschädigte oder blockierte Gleisanlagen. Hindernisse sind beliebiger Art, z. B. Überschwemmungen, Schnee, Stürme sowie Beschädigungen an Oberleitungen und Zügen. Wenn Züge betroffen sind, werden dabei vorwiegend Belegungskonflikte verursacht, bei Beschädigung von Gleisanlagen auch Deadlock-Konflikte. Dispositionsmaßnahmen sind bei Fehlern an Gleisanlagen die Umleitung von Zügen. Wenn Züge selbst betroffen sind kann, je nach Ausmaß der Störung, die Verkürzung von Haltezeiten oder der Einsatz zusätzlicher Züge sinnvoll sein, um den Bahnbetrieb aufrecht zu erhalten.

#### II.4.2 Disposition als Online- bzw. Echtzeitoptimierungsproblem

Die Aufgabe, einen gestörten Betriebsablauf unter Einhaltung der oben angesprochenen Restriktionen und der Verfolgung der genannten möglichen Ziele, bspw. Minimierung der kumulierten Verspätungen der Züge, wieder herzustellen, ist aus theoretischer Sicht ein Optimierungsproblem. In der klassischen kombinatorischen Optimierung ist eine der Grundannahmen, dass die Daten und Parameter jeder Problem Instanz ex ante vollständig gegeben sind. Aus diesen vollständigen Informationen berechnet dann ein Algorithmus eine optimale bzw. approximative Lösung. Optimierungsprobleme dieser Art werden *Offline-Optimierungsprobleme* genannt.

---

<sup>73</sup> Wenn ein Wetterbericht Sturm vorhersagt, ist davon auszugehen, dass die Wahrscheinlichkeit für ein blockiertes Gleis *höher* als bei gutem Wetter ist. Konkret nützt dies dem Disponenten aber überhaupt nicht.

Für die Disposition ist die Voraussetzung vollständiger Information nicht erfüllt, da Entscheidungen unmittelbar getroffen werden müssen, ohne dass zukünftige Ereignisse bekannt sind. Disposition ist dank dieser Eigenschaft ein Beispiel sog. *Online-Optimierungsprobleme*.

Ein Online-Problem wird als ein Problem definiert, bei dem die Daten des Problems dem Online-Algorithmus sukzessiv, in Form einer Folge von Anfragen, bekannt werden. Je nach Spezifikation des Problems werden dabei die Entscheidungen des Online-Algorithmus zusätzlichen Einschränkungen unterworfen. So unterscheiden sich die Modelle, die zur Analyse von Online-Algorithmen verwendet werden vorwiegend hinsichtlich des Informationszugangs der Problem Daten für den Online-Algorithmus. Die am häufigsten genutzten Musterbeispiele für Online-Optimierungsprobleme sind nach [Krumke 2001] das *Sequenz-* und das *Zeitstempel-Modell*.

*Sequenz-Modell:* Ein Online-Algorithmus  $ALG$  wird in diesem Modell mit einer endlichen Folge  $\sigma = r_1, r_2, \dots, r_m$  von Anfragen konfrontiert. Die Anfrage  $r_i$  muss sofort nach ihrem Auftreten durch den Algorithmus unwiderruflich abgearbeitet bzw. beantwortet werden. Während der Bearbeitung hat der Algorithmus keine Kenntnis über nachfolgende Anfragen; erst nach erfolgter Bearbeitung der Anfrage wird dem Algorithmus die nächste Anfrage mitgeteilt. In manchen Fällen wird dabei das Auftreten der letzten Anfrage angekündigt. Die Bearbeitung erfolgt durch den Algorithmus anhand spezifischer Regeln des Optimierungsproblems. Die Bearbeitung von  $r_i$  durch  $ALG$  verursacht entsprechende Kosten oder Profite, deren Minimierung (bzw. Maximierung) angestrebt wird (vgl. [Grötschel et al. 2001]).

Ein Entscheidungsproblem dieser Art ist das BahnCard-Problem: Für einen Gelegenheitsfahrer steht eine Zugfahrt an. Lohnt es sich, eine BahnCard zu kaufen oder lohnt es sich nicht, wenn zugleich nicht bekannt ist, ob im Gültigkeitszeitraum noch andere Zugfahrten anstehen.

*Zeitstempel-Modell:* Im Gegensatz zum Sequenz-Modell wird in diesem Modell jede Anfrage  $r_i$  der endlichen Folge  $\sigma = r_1, r_2, \dots, r_m$  mit einem Zeitstempel gekennzeichnet. Diese Freigabezeit  $t_i \geq 0$  ist eine nichtnegative reelle Zahl, welche den Zeitpunkt der Veröffentlichung oder der Ankunft einer Anfrage spezifiziert. Der Online-Algorithmus  $ALG$  berechnet die Entscheidungen über sein Verhalten zu einem bestimmten Zeitpunkt  $t$  nur durch die bisher bekannten Anfragen bis zu diesem Zeitpunkt.

Der grundlegende Unterschied zum Sequenz-Modell ist offensichtlich, dass der Algorithmus die Anfragen nicht sofort abarbeiten muss, sondern die sich ergebenden Anfragen *sammeln* und Entscheidungen *verzögern* kann. Diese Verzögerung ermöglicht es zudem, die bisher getroffenen Entscheidungen zu revidieren, sofern diese noch nicht ausgeführt wurden. Dieses Vorgehen hat verschiedene Vor- und Nachteile: Die Sammlung von Anfragen ermöglicht dem Algorithmus bspw. mehr Zeit zur Berechnung optimaler Lösungen und macht die Abarbeitung planbar. Allerdings impliziert eine Verzögerung der Abarbeitung neben den eigentlichen Kosten der Anfrage zusätzliche Kosten durch das Warten, welche abhängig von der abgelaufenen Zeit sind. In der Praxis wird diese Art der Modellierung vorwiegend bei Online-Transportproblemen und Logistikproblemen eingesetzt.

In realen Problemstellungen, u. a. auch bei der Disposition, existiert zusätzlich eine Echtzeitrestriktion, d. h. die Entscheidung muss *schnell* getroffen werden. „Schnell“ wird dabei durch das jeweilige System definiert: Bei der Disposition liegt die Reaktionszeit u. U. bei wenigen Minuten (vgl. [Grötschel et al. 2001], S. 680).

#### II.4.2.1 Online-Algorithmen

Grundsätzlich wird zwischen zwei Arten von Online-Algorithmen unterschieden: Bei *deterministischen* Algorithmen ist das Ergebnis eindeutig durch die Eingabe festgelegt. Im Gegensatz dazu werden in *randomisierten* Algorithmen Zufallseinflüsse derart berücksichtigt, dass dieselbe Eingabe zu unterschiedlichen Ergebnissen führen kann (vgl. [Grötschel et al. 2001], S. 683).

Für die Konstruktion von Online-Algorithmen existieren verschiedene prinzipielle Verfahren, welche also auch für die Disposition eingesetzt werden könnten und deshalb nachfolgend kurz erläutert werden. Als kanonisches Beispiel für deren Anwendung sei das Online-Traveling-Salesman-Problem (OLTSP), die Online-Variante des bekannten Traveling-Salesman-Problem (TSP), gewählt. Dabei besucht ein Handelsreisender während einer Tour verschiedene Städte mit einer einheitlichen Geschwindigkeit. Die Anfragen für die zu besuchenden Städte erhält der Reisende online während seiner Tour. Diese soll als Restriktion am Startpunkt beginnen und nach erledigter Arbeit dort wieder enden.

- Die *FIFO-Strategie* arbeitet ohne Vorausplanung, d. h., alle Anfragen werden in der Reihenfolge ihres Auftretens abgearbeitet. Die Abarbeitung erfolgt dabei anhand der Freigabezeit; eine Änderung der Reihenfolge ist in diesem Fall nicht möglich, sodass Kosteneffizienz nur Zufallsbedingt möglich ist. In praxi wird FIFO zumeist in der Produktionsplanung und -kontrolle verwendet. Ein Grund dafür ist die Tatsache, dass FIFO bspw. im Verkauf oder der Produktion zunächst alte Lagerbestände abbaut. Eine Verwendung von FIFO sollte daher nur in Betracht gezogen werden, wenn bestimmte Nebenbedingungen dieses erfordern (vgl. [Grötschel et al. 2001]). Im OLTSP entsteht als Lösung eine Tour, in der alle Städte in der Reihenfolge ihres Auftretens besucht werden.
- Ähnlich dem GREEDY-Verfahren zur Offline-Optimierung charakterisiert der „*Online-GREEDY*“ Algorithmen, die nach einer bestimmten, gemeinsamen Strategie verfahren. Diese Strategie wählt immer die lokal beste Entscheidung zur Bearbeitung der nächsten Anfrage. Eine Planung, aber keine Vorausplanung, findet statt. Die Position einer Anfrage in der Bearbeitungsreihenfolge wird jedoch niemals revidiert. Es wird also entweder die nächste Anfrage derart bearbeitet, dass die geringsten Bearbeitungskosten entstehen, oder es wird – bei mehreren vorliegenden Anfragen –zunächst die Anfrage mit den geringsten Kosten in Bezug auf den aktuellen Systemstatus bearbeitet. GREEDY führt damit eine extreme Form der lokalen Optimierung durch. Dennoch wird der GREEDY-Ansatz häufig in der Praxis angetroffen, weil er einfach zu implementieren ist. Außerdem erfüllt er Echtzeit-

Anforderungen und arbeitet stabil, eben weil Entscheidungen nicht revidiert werden. Im OLTSB besucht GREEDY zu jedem Zeitpunkt die *nächstgelegene* Stadt. Dieses Verhalten kann zu sehr ineffizienten Lösungen führen. Die Praxis zeigt aber, dass für einige Problemstellungen die sich ergebende Lösung ausreichend sein kann.

- Die REPLAN-Strategie kann für ein Online-Optimierungsproblem im Zeitstempel-Modell nur unter einer bestimmten Voraussetzung verwendet werden: Es muss eine Methode vorliegen, die zu einem bestimmten Zeitpunkt eine optimale oder zumindest gute Lösung für das statische Optimierungsproblem liefert. Im Gegensatz zur GREEDY-Strategie versucht die REPLAN-Strategie die *global aussichtsreichste* Entscheidung zu treffen. REPLAN bestimmt beim Eintritt eines systemrelevanten Ereignisses eine neue (optimale) Lösung für alle bisher bekannten Anfragen im laufenden Systembetrieb. Aufgrund dieser nachträglichen, auf alle Anfragen bezogenen, Optimierung wird REPLAN in der Literatur oftmals auch als REOPT bezeichnet. Zu jedem Zeitpunkt wird eine global optimale Lösung berechnet. In Bezug auf die gesamte Anfragenfolge bzw. auf den Systemstatus ist die ermittelte Lösung naturgemäß nur lokal optimal. Bei einer neuen Anfrage kann die alte Arbeitsanweisung verworfen werden, ohne dass deren Effizienz genutzt wurde.

REPLAN bietet Vorteile bei Systemabstürzen, da aufgrund der Konzeption alte Anfragen rekonstruiert werden können. Kosteneffizienz wird jedoch nur global berücksichtigt, und häufige Revisionen können zu einem unvorhersehbaren Verhalten führen. Insgesamt ist der Aufwand für die notwendige Offline-Lösung sehr groß und nur Echtzeit-kompatibel, wenn eine gute Approximation existiert. Damit ist die Anwendung für das Dispositionsproblem nur bedingt zu empfehlen, u. a., weil in jedem REOPT-Schritt viele Dispositionsentscheidungen revidiert werden könnten. Im unten vorgestellten mathematischen Modell (vgl. Abschnitt IV.6) wird daher eine Beschränkung der Anzahl von Dispositionsentscheidungen als zusätzliche Restriktion eingeführt. Für das OLTSB berechnet der REPLAN-Algorithmus zu jedem Zeitpunkt, an dem eine neue Stadt bekannt wird, eine optimale Tour für alle bisher besuchten Städte. Die Berechnung erfolgt hierbei kostenoptimal unter Beachtung der verwendeten Zielfunktion. Eine Tour wird u. U. jeweils nur bis zur nächsten Anfrage aufrechterhalten.

- Bei IGNORE werden – analog REPLAN – das Zeitstempel-Modell und eine Approximation für das entsprechende Offline-Problem vorausgesetzt. Hauptaspekt dieser Strategie und wesentlicher Unterschied zu REPLAN bestehen darin, die Kosteneffizienz einer zu einem bestimmten Zeitpunkt berechneten optimalen Offline-Lösung vollständig auszunutzen. Zudem ist die zukünftige Systemtätigkeit absolut voraussagbar, wenn einmal ein optimaler Plan berechnet wurde. Neue Anfragen werden bei IGNORE temporär ignoriert und gesammelt. Ist der aktuelle Plan ab-

gearbeitet, berechnet IGNORE einen neuen Plan, der alle bisher nicht berücksichtigten Anfragen optimiert.

Ein Nachteil dieser Strategie ist die Auslassung eines Optimierungspotenzials, da zwischenzeitliche Anfragen vollständig ignoriert werden, obwohl diese ohne jeglichen Schaden für den alten Plan eingefügt werden könnten. Zudem ist der Erfolg dieser Strategie in einer Echtzeit-Umgebung abhängig von den problemspezifischen Gegebenheiten und der Güte des approximativen Algorithmus. Nach [Grötschel et al. 2001] lässt sich jedoch feststellen, dass sich IGNORE in einer Single-Server-Umgebung weitaus stabiler und berechenbarer verhält als REPLAN. Für das OLTSP wartet der IGNORE-Algorithmus zunächst bis das erste Ziel bekannt ist. Anschließend wird der Salesman in diese Stadt bewegt. Ist er dort angekommen, wird eine optimale Tour mit den Zielen berechnet, die in der Zwischenzeit bekannt wurden. Die berechnete Tour wird komplett abgearbeitet. Dieser Ablauf wird analog bis zum Ende weiter verfolgt.

Für das Dispositionsproblem sind alle vier Strategien einsetzbar, wobei schlecht zu prognostizieren ist, welches Vorgehen in der Praxis am besten funktionieren wird. Daher wird in dieser Arbeit eine Festlegung auf eine bestimmte prinzipielle Vorgehensweise vermieden. Stattdessen werden mehrere Methoden vorgeschlagen, die, je nach Ausgestaltung, in eine der genannten Kategorien fallen.

#### II.4.2.2 Bewertung von Online-Algorithmen: Kompetitive Analyse und Alternativen

Sleator/Tarjan schlagen bereits 1985 vor, einen Online-Algorithmus mit einem optimalen Offline-Algorithmus zu vergleichen (vgl. [Sleator/Tarjan 1985]). In [Karlin et al. 1988] wird für diesen Ansatz der Begriff der *kompetitiven Analyse* eingeführt.

Die Maßzahl für die Güte eines Algorithmus, seine Kompetitivität, wird durch den *kompetitiven Faktor* (engl.: *competitive ratio*) bezeichnet. Vereinfacht ausgedrückt ist ein Online-Algorithmus  $c$ -kompetitiv, falls er im ungünstigsten Fall höchstens  $c$ -mal schlechter ist als der optimale Offline-Algorithmus, wobei  $c$  einen konstanten Faktor bezeichne<sup>74</sup>.

Ein praktisches Problem der kompetitiven Analyse ist der relativ aufwändige Beweis für das Vorliegen eines bestimmten Faktors  $c$  für einen Online-Algorithmus. Ein Beispiel aus dem Bereich Bahn liefern Gatto et al. Sie analysieren in [Gatto et al. 2005] das Online-Verspätungsmanagement auf einer einzelnen Zuglinie, indem sie es auf das bekannte Ski-Ausleihproblem zurückführen. Zur Lösung stellen sie eine Reihe 2-kompetitiver Algorithmen vor.

Die kompetitive Analyse wird oft als ein Spiel zwischen einem Online-Spieler und einem bösartigen Offline-Gegenspieler (*malicious adversary*), der den Abstand zwischen der Opti-

---

<sup>74</sup> Die mathematisch exakte Definition der Kompetitivität für deterministische und randomisierte Online-Algorithmen kann [Grötschel et al. 2001], S. 683ff. entnommen werden.

mallosung und der Lösung des Online-Spielers maximieren will, betrachtet. Ein *oblivious adversary* (blinder Gegenspieler) hat dabei keine Kenntnis über die Aktionen und die Ergebnisse der Zufallsexperimente des Online-Algorithmus, während ein *adaptive adversary* (adaptiver Gegenspieler) über ebendiese Kenntnisse verfügt (vgl. [Grötschel et al. 2001], S. 684ff.).

Die kompetitive Analyse wird (mit Recht) als unrealistisch pessimistisch kritisiert, da sie den schlechtesten Fall untersucht. Es existieren mehrere Beispiele für Online-Algorithmen, die trotz eines schlechteren kompetitiven Faktors unter realen Bedingungen bessere Ergebnisse liefern als alternative Algorithmen mit kleinerem „ $c$ “ (vgl. [Grötschel et al. 2001]). Aus diesem Grund wurden verschiedene Alternativen zur und Erweiterungen für die kompetitive Analyse entwickelt. Beispiele dafür sind *resource augmentation* oder *diffuse adversary* (vgl. [Koutsoupias/Papadimitriou 1994]). Beim Einsatz von *resource augmentation* erhält der Online-Algorithmus mehr Ressourcen (z. B. mehr oder schnellere Rechner), um seine Position gegenüber dem Offline-Algorithmus zu verbessern. Ein *diffuse adversary* ist ein Offline-Gegenspieler, der die Eingaben für den Online-Algorithmus zufällig nach einer bekannten Verteilung auswählt, wobei dem Online-Algorithmus die Art der Verteilung (aber nicht die Verteilung selbst) bekannt ist. Eine Übersicht zu diesem Thema gibt [Fiat/Woeginger 1998], Kap. 17.

Es bleibt demnach festzuhalten: Beliebige Dispositionsalgorithmen werden aufgrund der Natur der Problemstellung normalerweise suboptimale Problemlösungen berechnen, da sie unter unvollständiger Information arbeiten. Insofern ist es nicht zwangsweise sinnvoll, exakt-optimierende Methoden zur Disposition zu verwenden. Unter Umständen erweisen sich Heuristiken bzw. einfache Regelsysteme als für die Praxis wesentlich nützlicher. Teilziel der vorliegenden Arbeit ist es jedoch, Strategien zur Disposition auf ihre Güte zu untersuchen. Eine strenge kompetitive Analyse scheint als Worst-Case-Analyse zu diesem Zweck ungeeignet, weil sie, für ein Problem dieser Größenordnung, extrem aufwändig und für die Arbeit wenig zielführend ist. Da jedoch die auftretenden Störungen im Schienennetz der Bahn einer Wahrscheinlichkeitsverteilung unterliegen, erscheint es sinnvoll, einen *diffuse adversary* als Offline-Gegenspieler zu verwenden, um neben qualitativen auch quantitative Aussagen über die Qualität eines jeweiligen Dispositionsalgorithmus zu treffen. Es sollte also ein Offline-Algorithmus implementiert werden, der die Qualität der verwendeten Online-Strategien testet.

### **II.4.3 Methoden und Systeme zur computerbasierten Entscheidungsunterstützung für die Disposition**

Die Disposition findet im Verhältnis zu den anderen PPS-Phasen in der Literatur wenig Beachtung, vgl. z. B. [Huisman et al. 2005] oder [Bartholomeus/Gouweloos 2005]. Zwar werden eine Reihe möglicher Methoden, die innerhalb einer automatisierten Disposition Verwendung finden könnten, aufgezeigt, die explizite Einbeziehung von Kunden ist jedoch eher selten. Dies ist verständlich, weil momentan die Maßnahmen des Disponenten ohnehin auf die Beeinflussung der bahnseitigen Bestandteile der Dispositionsaufgabe begrenzt sind.

Dies ist verständlich, weil bisher nur wenig sinnvolle Interaktionsmöglichkeiten mit Reisenden während der Reise existieren und zusätzlich die Einbeziehung weiterer Variablen die ohnehin komplexe Aufgabe der Online-Fahrplanrekonstruktion erheblich erschweren würde.

Trotzdem existieren in der Literatur einige Ansätze, die Kunden aus verschiedenen Gründen in die Dispositionsentscheidung mit einbeziehen; größtenteils geschieht dies in Form von Optimierungsmodellen. Die Zielfunktionen behandeln die dabei für Kunden besonders relevanten Kriterien wie Pünktlichkeit (meist jedoch der *Züge*), Anschlusssicherung und Wartezeit.

Dabei ist zu beobachten, dass die meisten Methodiken im Rahmen eines Testsystems zur Simulation des Bahngeschehens implementiert werden. Es resultiert eine Fülle von Softwaresystemen, mittels derer vorgeschlagene Methoden validiert werden und die deswegen in letzter Konsequenz als Entscheidungsunterstützungssysteme für die Disposition gelten können, vgl. dazu Abschnitt III.2. Dabei sind Systeme und Methoden nicht immer sauber voneinander abzugrenzen. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass eine effiziente Disposition heutzutage aufgrund der wachsenden Anforderungen an den Disponenten ohne die Nutzung computerbasierter Entscheidungsunterstützungssysteme kaum möglich ist: Solche Systeme dienen in den Betriebszentralen der Deutschen Bahn AG bereits dem Disponenten während des Betriebsablaufes sowohl zur Erkennung als auch zur Entscheidungshilfe bei der Lösung auftretender Konflikte. Dabei müssen sie insbesondere die hohe Komplexität des Konfliktmanagements reduzieren sowie eine schnelle Beurteilung der Situation unterstützen.

Dieser Abschnitt gibt zunächst einen kurzen Überblick über einige Ansätze zur automatisierten Disposition. Dabei werden diejenigen betont, welche für die kundenorientierte Disposition nützliche Ideen beinhalten oder eine sinnvolle Erweiterung darstellen. Zusätzlich werden einige der angesprochenen Softwaresysteme überblicksartig vorgestellt. Letzteres geschieht mit dem Ziel, bei der Sollkonzeption einer Komponente zur kundenorientierten Disposition möglichst viele der praktischen Anforderungen abzudecken.

#### II.4.3.1 Methoden zur (automatisierten) Disposition

Methoden zur automatisierten Disposition, im Kontext dieser Arbeit Dispositionsstrategien genannt, suchen im Falle eines auftretenden Konflikts nach einem neuen zulässigen und angesichts der aktuellen Netzsituation durchführbaren Fahrplan in einer Art und Weise, dass realiter kein menschlicher Eingriff mehr vonnöten wäre. Wichtig sind solche Verfahren oftmals für den Einsatz in Simulationssystemen, da ansonsten Simulationsläufe im Konfliktfall nicht weiterlaufen können, unabhängig davon, ob sie zur Fahrplanung, zum Test der Robustheit eines Fahrplans oder zur anderwärtigen Simulation des Betriebsablaufes (bspw. zur bloßen Visualisierung) verwendet werden.

Auch für die Praxis könnte sich der Einsatz solcher Methoden als sinnvoll erweisen: [Bartholomeus/Gouweloos 2005] zeigen z. B., dass allein eine (automatisierte) Optimierung der Zugreihenfolgenplanung im Konfliktfall die Pünktlichkeit der Züge im niederländischen Bahnnetz signifikant erhöhen würde, weil bisher die menschlichen Disponenten nach anderen

Kriterien entscheiden und die Wichtigkeit einer korrekten Zugreihenfolge unterschätzen. Allerdings sprechen sich Bartholomeus und Gouweloos auch dafür aus, eher einfache, für Disponenten verständliche und damit einsetzbare Regelsysteme für die Disposition zu verwenden, da die Entscheidungsgrundlage ohnehin nicht präzise genug erfasst würde, zumindest gelte dies für die niederländische Bahn. Unter anderem deswegen werden in der vorliegenden Arbeit auch relativ einfache heuristische Ansätze verfolgt.

Ebenso sinnvoll (und ebenfalls in dieser Arbeit umgesetzt) ist es, mittels Sollfahrplan und aktueller Zuglaufdaten den Betriebsablauf in naher Zukunft zu simulieren, um Konflikte frühzeitig zu erkennen und/oder verschiedene dispositive Maßnahmen zu testen. Bei den in der (Bahn-) Literatur genannten Simulationsverfahren werden *synchrone* und *asynchrone* Verfahren unterschieden. Bei den synchronen Verfahren werden konstante oder variable Zeitschritte benutzt, in denen jeweils alle Ereignisse (Fortbewegungen der Züge) betrachtet werden. Bei der asynchronen Variante wird der Simulationslauf für jeden Zug einzeln betrachtet. So kann unter anderem sichergestellt werden, dass die Züge mit einer höheren Priorität bei der Streckenbelegung Vorrang erhalten. Züge werden also gleichsam hierarchisiert. Das automatische Dispositionsverfahren „ASDIS“, das in der Arbeit von Jacobs ([Jacobs 2003]) entwickelt wird, fällt in diese Kategorie.

In der Vergangenheit wurde oftmals mathematische Programmierung zur Problemlösung eingesetzt<sup>75</sup>. Einige netzwerkbasierte Formulierungen mathematischer Programme finden sich bspw. in [Schöbel 2001] und [Schöbel 2002], sowohl mit einfacher als auch mehrfacher Zielsetzung, wobei ein Branch & Bound-Verfahren zur Lösung vorgeschlagen und einige Eigenschaften der jeweiligen Modelle bewiesen werden. Auch die in den nächsten Abschnitten etwas genauer betrachteten Ansätze von Martin sowie Shen und Wilson fallen in diesen Bereich.

Einen guten, wenngleich nicht vollständigen Überblick über Konflikterkennungs- und Auflösungsverfahren aus der Literatur geben [Oh et al. 2004]. Sie unterscheiden nach Transportmodus (Fracht vs. Passagier und Fracht) sowie nach Methodik, wobei sie feststellen, dass neben Mathematischer Programmierung hauptsächlich heuristische Ansätze benutzt wurden, auch und gerade aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz (z. B. Expertensysteme).

In jüngerer Zeit kommen verstärkt metaheuristische Ansätze zum Einsatz. Bspw. wird in [Wegele/Schnieder 2004] gezeigt, wie ein genetischer Algorithmus zur automatisierten Disposition eingesetzt werden kann. In [Wegele/Schnieder 2005] wählen beide Autoren dann eine etwas andere Problemrepräsentation und optimieren mittels Branch & Bound in Verbindung mit Tabu-Search, einer speziellen Art der lokalen Suche.

Zur Konfliktlösung können weitere Methoden herangezogen werden, bspw. die in [Jacobs 2004] genannten. Allerdings wird bei keinem der vorgestellten Ansätze explizit Rücksicht auf die Passagiere genommen. Die meisten Verfahren berücksichtigen Passagiere – wenn überhaupt – nur anonymisiert, sodass die Verfahren zwar in die in dieser Arbeit konzipierte Sys-

---

<sup>75</sup> Zu den Grundlagen mathematischer Programmierung vgl. Abschnitt IV.1.1.1.

temarchitektur zu integrieren seien sollten, dies aber keinen besonderen Nutzen im Sinne der Kundenorientierung hätte. Es ist andererseits nicht auszuschließen, dass einige dort angewendete Methoden für die hier beschriebene Anwendung nach leichter Modifikation sehr gute Ergebnisse erzielen.

[Gatto et al. 2005] weisen zudem darauf hin, dass die wenigstens Arbeiten in der Literatur sich auf theoretischer Ebene mit dem Online-Problem beschäftigen. Sie zitieren lediglich *eine* Studie ([Anderegg et al. 2002]), welche sich mit dem Busverkehr unter der Fragestellung, wie lang Busse mit vorgegebenem Ankunftsintervall bei Passagieren mit vorgegebener Ankunftsrate warten sollten, wenn die Gesamtwartezeit der Passagiere zu minimieren ist, befasst.

Nachfolgend werden exemplarisch einige der genannten Methoden unter dem Aspekt der Verwendbarkeit einiger Konzepte für die kundenorientierte Disposition näher untersucht.

#### II.4.3.1.1 Lineare Optimierung unter mehrfacher Zielsetzung

In [Martin 1998] wird der Aufbau eines Dispositionsmodells zur rechnergestützten Konfliktlösung vorgestellt, welches auf linearer Optimierung beruht. Aufgrund der vielfältigen Zielsetzungen bei der Disposition existieren in dem Verfahren von Martin drei Zielfunktionen: Die erste beeinflusst die Pünktlichkeit, die zweite sorgt für einen reibungsarmen Ablauf des Betriebs, und die dritte minimiert die Zahl folgeverspäteter Züge. Die erste Zielfunktion bewertet in diesem Modell die pünktliche Betriebsabwicklung bzw. Fahrplanstabilität und wird stets zuerst optimiert. Es wird dabei nicht zugelassen, Folgeverspätungen eines Zugs durch Verspätungsabbau bei anderen Zügen zu kompensieren. D. h., die absolute Pünktlichkeit eines Zugs wird höher bewertet als bspw. eine Verspätung von fünf Minuten bei gleichzeitigem Verspätungsabbau von fünf Minuten bei einem anderen Zug. Ferner haben pünktliche Züge Vorrang vor verspäteten, und durchfahrende Züge werden haltenden bevorzugt. Als Bewertungsmaßstab dient ein Wert der *Zähflüssigkeit* oder *Flüssighaltung* des Betriebs, der von der mittleren Folgeverspätung aller Züge und der Bereichsgröße abhängt. Wird bei der Optimierung ein Schwellenwert überschritten, wird das Ergebnis verworfen und mit der Zielfunktion der Flüssighaltung des Betriebs erneut optimiert.

Bei der Zielfunktion der Flüssighaltung des Betriebes wird auf Gewichtungsfaktoren verzichtet, da nur die behinderungsbedingten Wartezeiten minimiert werden sollen. Die dritte Funktion mit der Zielsetzung der Minimierung der Anzahl folgeverspäteter Züge wird anschließend unter Gewichtung der Verspätungen optimiert. Dazu werden spezifische Kosten pro Verspätungsminute nach Zugtypen aufgeteilt und zugeordnet. Die Höhe der Kosten wird durch den Anwender vorgegeben. Da das Optimum bei Optimierung der dritten Zielfunktion u. U. nicht eindeutig ist, wird die Zielfunktion der Pünktlichkeit zur Nebenbedingung. Das optimale Ergebnis ist eine Variante mit minimaler Folgeverspätung bei möglichst wenig betroffenen Zügen.

Das beschriebene Dispositionsmodell kann je nach Anwendung modifiziert werden. So können z. B. die Fahrzeiten je nach Anforderung konstant oder variabel gehalten werden. Außerdem ist die Bewertungsgrundlage für die Pünktlichkeit modellunabhängig, mit der Einschränkung, dass die Gewichtungsfaktoren konstant sein müssen. Der Einsatz des Modells

kann dabei in einem Disponentenunterstützungssystem erfolgen, um im Konfliktfall mit der Hilfe von Dispositionsentscheidungen eine kundenorientierte Konfliktlösung hinsichtlich der Pünktlichkeit zu ermöglichen. In diesem Modell werden Passagiere allerdings nicht explizit betrachtet, im Prinzip steht nach wie vor die Pünktlichkeit der Züge im Mittelpunkt, weswegen eine grundsätzliche Eignung im Kontext der vorliegenden Arbeit zwar gegeben ist, für sich genommen aber noch lange nicht ausreicht. Trotzdem wird auch in der vorliegenden Arbeit ein Ansatz zur mathematischen Optimierung weiter verfolgt.

#### II.4.3.1.2 Minimierung von Passagierwartezeiten mittels linearer Optimierung

Ein Modell, welches die Minimierung der Passagierwartezeiten bei unterschiedlichen Dispositionsstrategien zum Ziel hat, ist in [Shen/Wilson 2000] zu finden.

Die Passagierwartezeit umfasst in diesem Ansatz die Wartezeit auf den Bahnsteigen, die Wartezeit für die Passagiere, die aufgrund von verpassten Anschlussmöglichkeiten auf den nächsten Zug warten, die Wartezeit für die Passagiere, wenn sie einsteigen, während der Zug wartet und die Wartezeit in den Zügen, wenn ein Zug wartet.

Die Ankunftsrate der Passagiere wird dabei über den Betrachtungszeitraum als konstant angenommen. Das Ausgangsmodell besteht aus einer nichtlinearen Zielfunktion mit nichtlinearen Nebenbedingungen, welche durch ein lineares Modell approximiert werden. Dieses wird dabei mit vier verschiedenen Strategien für zwei unterschiedlich lange Störungen in einem Modell der MBTA<sup>76</sup> (*Massachusetts Bay Transportation Authority*) Red-Line getestet. Die einzelnen Strategien im Konfliktfall sind dann „Warten“, „keine Maßnahmen“, „Warten mit Auslassen einzelner Stationen“ und „Warten mit Auslassen einzelner Stationen sowie Umkehr des Zugs“.

Als Maß für die Effektivität einzelner Strategien wird eine *mittlere gewichtete Wartezeit* gebildet. Diese besteht aus der mittleren Wartezeit an Bahnhöfen und der mit dem Faktor 0,5 gewichteten mittleren Wartezeit im Zug<sup>77</sup>. Als Störungen werden Unterbrechungen von zehn bzw. zwanzig Minuten betrachtet; im Anschluss wird eine Sensitivitätsanalyse zur Untersuchung des Einflusses unter der Annahme, dass die Unterbrechungsdauer vorher bekannt ist, durchgeführt. Insgesamt konnten die folgenden Ergebnisse aus den Testläufen ermittelt werden: Die Strategie „Warten“ verringerte die Wartezeit um 10 - 18 % gegenüber dem Anwenden keiner Strategie. Das Auslassen einzelner Stationen im Konfliktfall zur Reduktion der Passagierwartezeit ergibt nur eine geringfügige Verbesserung gegenüber der Strategie „Warten“. Die Kombination der beiden Strategien ergibt eine Reduktion der Wartezeit zwischen 13 und 23 %. Die Umkehr eines Zugs im Konfliktfall als Strategie bewirkt schließlich eine erhebliche Verringerung: Aus der Kombination mit der Warten-Strategie resultiert für dieses spezielle Bahnsystem eine Senkung der Wartekosten um 35 - 57 %.

---

<sup>76</sup> Informationen zur MBTA finden sich unter [MBTA 2005].

<sup>77</sup> Damit wird unterstellt, dass die Wartezeit im Zug angenehmer empfunden wird als diejenige im Bahnhof. Diese Annahme wird auch in dieser Arbeit getroffen.

Eine Schwierigkeit des Modells ist die Bestimmung von Entscheidungsvariablen für die Strategie des Auslassens einzelner Stationen. Da diese Strategie aber nur eine marginale Verbesserung gegenüber dem Warten erbringt, kann sie als nachrangig betrachtet werden.

Da dieses Modell für eine sehr kleine Regionalbahn eingesetzt wurde, bestehen für die Eignung zum Einsatz im Sinne der kundenorientierten Disposition im Bereich der Deutschen Bahn AG große Zweifel. So ist die Umkehr von Zügen ohne großen Aufwand allein schon aufgrund fehlender Detaildaten nicht sinnvoll modellierbar. Übernommen werden können dagegen z. T. die Gewichtungsfunktionen für die Passagierwartezeiten. Ebenfalls liefert diese Studie trotz der Inkommensurabilität der betrachteten Bahnsysteme den Hinweis, dass die Betrachtung der dispositiven Maßnahmen „Einführung und Wegfall von Halten“ für das zu entwickelnde Modell nebenrangig ist.

#### II.4.3.1.3 Evaluation von Wartezeitregelungen

In [Goverde 1998] schließlich wird ein Ansatz präsentiert, der zur Evaluierung des Einflusses von Wartezeitregelungen auf die Passagierwartezeiten dient. Dabei sollen als dynamischer Gegensatz zu den festen Wartezeitregelungen optimale Wartezeiten entwickelt werden.

Die während des Betriebsablaufs auftretenden Störungen verursachen unterschiedliche Verspätungen. Zur Vermeidung verpasster Anschlüsse entscheiden Disponenten, dass ein Zug auf einen verspäteten Zug warten soll. Die sich für den wartenden Zug ergebenden Verspätungen werden als Wartezeitregelung betrachtet. In diesem Zusammenhang wird untersucht, wie lang die Wartezeitregelung unter Berücksichtigung der Passagierwartezeit maximal sein darf, ohne dass der Anschluss aufgegeben werden muss. Zudem wird eine optimale Dispositionsstrategie aus dem Vergleich verschiedener Szenarien erarbeitet.

Das Ziel der Wartezeitenkontrolle ist die Verhinderung langer Wartezeiten für diejenigen Passagiere, die Gefahr laufen, einen Anschlusszug zu verpassen. Stattdessen müssen längere Wartezeiten für die anderen Passagiere akzeptiert werden. Daher ist es in diesem Modell sinnvoll, die *Unbequemlichkeiten* aller Passagiere zu minimieren. Dazu gehören alle Passagiere, die umsteigen, einsteigen oder ihren Zielort erreicht haben sowie die Passagiere an nachfolgenden Stationen. Als Maß für die Unbequemlichkeit wird die individuelle Wartezeit der Passagiere verwendet; die Zielfunktion ergibt sich in der Minimierung der gesamten Wartezeiten der involvierten Passagiere.

Aufgrund vorausgegangener Studien wird die Wartezeit der Passagiere entsprechend gewichtet: So stellt eine Wartezeit im Zug auch hier für den einzelnen Passagier eine geringere Unbequemlichkeit dar als das Warten auf dem Bahnsteig und wird deshalb mit einem höheren Faktor versehen als Warten im Zug. Dabei wird nicht nach der Art der Passagiere unterschieden, sondern nur nach der Wartelokalität, sodass in der Zielfunktion aus der gesamten Wartezeit eine verallgemeinerte Wartezeit wird. Diese wird zusätzlich mit Kosten bewertet. Weiterhin wird in diesem Modell zwischen primärer (direkt erlittener) und sekundärer (induzierter) Wartezeit der Passagiere unterschieden.

Eine Berechnung der sekundären Wartezeit erfolgt über ein zusätzliches Modell, welches die Verspätungsausbreitung vorhersagt. Aufgrund der Abhängigkeit der Verspätungsausbrei-

tung von der Wartezeitregelung ist ein Referenzsystem notwendig, um die Ergebnisse der verschiedenen Wartezeitregelungen vergleichen zu können. Demzufolge ergibt sich die Wartezeit aus der Differenz zwischen der im Testsystem ermittelten verallgemeinerten Wartezeit und der des Referenzsystems.

In Bezug auf die Passagierwarteminuten und die möglichen Verspätungen kann das beschriebene Dispositionsmodell schnell verschiedene Szenarien bewerten. Es kann somit dem Disponenten zur Entscheidungsunterstützung bei Konfliktsituation dienen. Weiterhin kann das mathematische Modell Richtlinien für unterschiedliche Kombinationen von Verspätungen von Zubringerzügen generieren. Für Szenarien mit unterschiedlichem Passagieraufkommen kann das Modell optimale Wartezeitregelungen berechnen. Eine Validierung erfolgte in einer realen Testumgebung mit zwei Stationen und vier Linien, basierend auf dem niederländischen Schienennetz und mit dem Fahrplan aus den Jahren 1996 und 1997. Eine Erweiterung des Modells mit der Einbeziehung einer Routenwahl von Passagieren, die einen Anschluss verpasst haben, sollte zusätzlich implementiert werden. Dadurch ist die Reisewartezeit nicht nur abhängig von den Abständen der einzelnen Anschlusszüge, sondern auch von der erwarteten Restzeit bis zur geplanten Abfahrt von Zügen anderer Linien.

Prinzipiell ist das beschriebene Vorgehen als Strategie für die kundenorientierte Disposition geeignet. Für die Verwendung in der dispositiven Kontrolle bei der Deutschen Bahn AG müsste das Modell auf das Schienennetz der DB AG adaptiert werden, was hinsichtlich der enormen Größenunterschiede der betrachteten Bahnsysteme schwierig erscheint. Nutzbar ist dieser Ansatz aber hinsichtlich vieler zugrunde liegender Annahmen, wenngleich das in dieser Arbeit entwickelte System weit darüber hinausgeht, u. a. indem es die Passagiersteuerung als Dispositionsmaßnahme einführt.

#### II.4.3.2 Softwarearchitekturen/Computerunterstützung für die Disposition

Die Betriebspraxis der Disposition ist heute in hohem Maße rechnergestützt. Die Disponenten und Fahrdienstleiter sollen möglichst von Routineaufgaben entlastet werden. Dennoch werden die letztendlichen Entscheidungen über dispositive Maßnahmen von Menschen getroffen. Das Betriebszentralenkonzept für die Zukunft sieht einen weiteren Schritt in Richtung Automatisierung vor: Ein wesentliches Ziel ist die „Errichtung von Leitsystemen zur umfassenden und weitgehend automatisierten Disposition im Streckennetz der Niederlassungen“ ([Girke/Bader 2001], S. 27). Nachfolgend werden einige veröffentlichte und z. T. in der Praxis umgesetzte Konzepte und Systeme vorgestellt.

##### II.4.3.2.1 Das „Informationssystem Transportleitung Personenverkehr“ (ISTP)

Seit Ende der neunziger Jahre wird von den Disponenten des Personenverkehrs bei der Deutschen Bahn das „Informationssystem Transportleitung Personenverkehr“ (ISTP) eingesetzt. In diesem System fließen sämtliche verfügbare Informationen über die aktuelle Verkehrssituation zusammen. Die Hauptaufgabe dieses Bahn-Dispositionssystems liegt darin, Verspätungen von Zügen aufzudecken und Möglichkeiten und Unterstützungshilfen für die Bearbeitung dieser Verspätungen bereitzustellen. ISTP besteht, wie in Abbildung 9 darge-



Kombination aller Sichten ergibt ein vollständiges Bild der momentanen Situation. Selbstverständlich bietet der Client die Möglichkeit, sich eine Zugliste der aktuell fahrenden Züge anzuschauen (s. Abbildung 10). Diese enthält neben Gattung und Nummer des Zugs auch seine Richtung, die aktuelle Position sowie eine eventuelle Verspätung.

Eine geografische Orientierungshilfe bietet die Netzansicht in Abbildung 11, die Strecken, Stellen und Züge in Form einer skalierbaren Landkarte anzeigt. Um sich den Verkehr auf einer bestimmten Strecke darzustellen, können die Zeit-Wege-Linien der dort fahrenden Züge angezeigt werden (vgl. Abbildung 12). Bei dieser Sicht werden auf der Abszisse die Kilometerwerte und auf der Ordinate die Zeiten abgetragen. Schnelle Züge haben dementsprechend eine flache Linie, langsame Züge werden mit steileren Linien dargestellt. Vertikale Abschnitte implizieren einen Halt. Je nach Verspätungsgrad werden Züge mit unterschiedlichen Farben gekennzeichnet; bspw. Dunkelrot für Züge, die mehr als 20 Minuten Verspätung aufweisen.

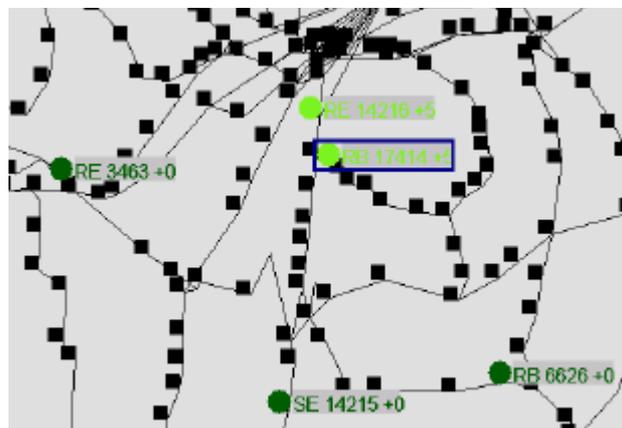


Abbildung 11: Ausschnitt aus der Netzansicht (aus [Heth 1999], S. 9)

Das Vorgangsverfolgungs-Modul schließlich dient dazu, auf Verspätungen hinzuweisen, Konsequenzen aufzuzeigen und Entscheidungen zu ermöglichen. Außerdem automatisiert es große Teile des notwendigen Informationsflusses, der im Falle einer Verspätung eingeleitet werden muss. Mit Hilfe einer Spracherzeugungseinheit kann das Modul betroffene Bahnhöfe vollautomatisch per Telefon anwählen und über die Verspätungen informieren, zudem können über ein SMS-Gateway Kurznachrichten an die Mobiltelefone der Zugbegleiter gesendet werden.

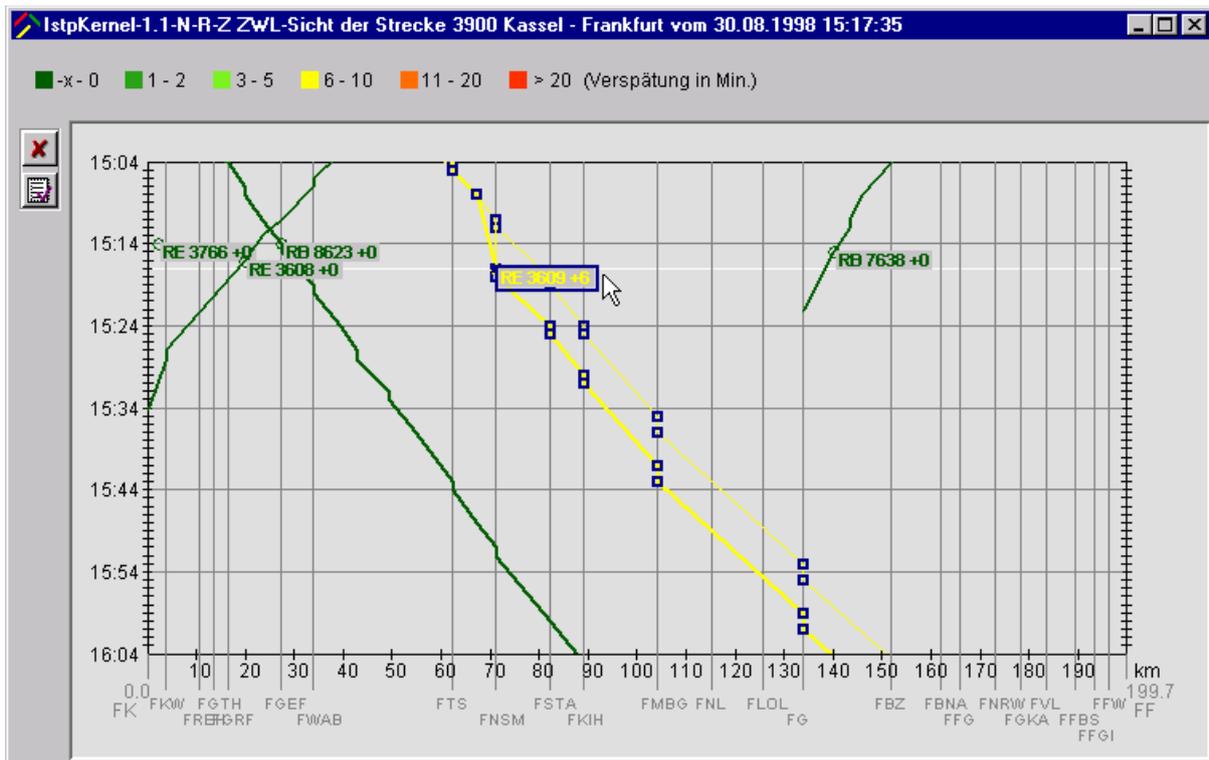


Abbildung 12: Die Zeit-Wege-Linie der Strecke Kassel -Frankfurt (aus [Heth 1999], S. 10)

#### II.4.3.2.2 Steuerung durch dezentrale autonome Agenten

Ein weiterer interessanter Ansatz von Fay sieht eine *Steuerung durch dezentrale autonome Agenten* vor (vgl. [Fay 2000b]). In seinem Modell gibt es zwei Arten von Agenten: T-Agenten (Transportwunsch-Agenten) sowie F-Agenten (Fahrwegabschnittagenten). Die T-Agenten setzen einen Wunsch zur Befahrung eines Fahrwegabschnitts ab, der dann von dem jeweiligen F-Agenten als Bestätigung zur Fahrwegreservierung zum gewünschten Zeitpunkt bzw. mit einer Ablehnung beantwortet wird. Falls ein F-Agent auf dem geplanten Fahrweg eine Absage erteilt, muss die Prozedur mit einem alternativen Fahrweg wiederholt werden. Auf diese Weise „handeln“ die Agenten ohne zentrale Koordinierung die Betriebssteuerung untereinander „autonom“ aus.

#### II.4.3.2.3 Wissensbasierte Entscheidungsunterstützung

Eine *wissensbasierte Entscheidungsunterstützung* wird in [Fay 1999] vorgestellt (vgl. auch ([Jacobs 2003], S. 65ff.). Abbildung 13 zeigt die schematische Darstellung des von Fay und Schnieder entwickelten und in [Fay 2000a] beschriebenen Systems für die Unterstützung des Dispositionsprozesses. Es umfasst ein auf Expertenwissen basierendes Entscheidungsunterstützungssystem mit einer Simulationskomponente und einer grafischen Benutzeroberfläche. Die Unterstützung umfasst dabei die Erkennung von Konflikten, die Simulation der Verkehrsentwicklung innerhalb der nächsten Stunde, die Anzeige relevanter Informationen, die Prognose von Dispositionsauswirkungen und das Vorschlagen von Dispositionsentscheidungen, basierend auf Expertenwissen. Für die Erstellung der Regeln wurden die Disponenten nach ihrem Entscheidungsverhalten in den entsprechenden Konfliktsituationen untersucht. Da

die so entstanden Regeln eine gewisse „Unschärfe“ besitzen, wird diese mit Hilfe von Fuzzy-Logik abgebildet. Die Regelbasis wird durch ein Petrinetz abgebildet; Fay spricht daher von einem „Fuzzy-Petrinetz“. Für das Magnetschnellbahnsystem Transrapid wurde Fays Technologie bereits als Labormuster realisiert.

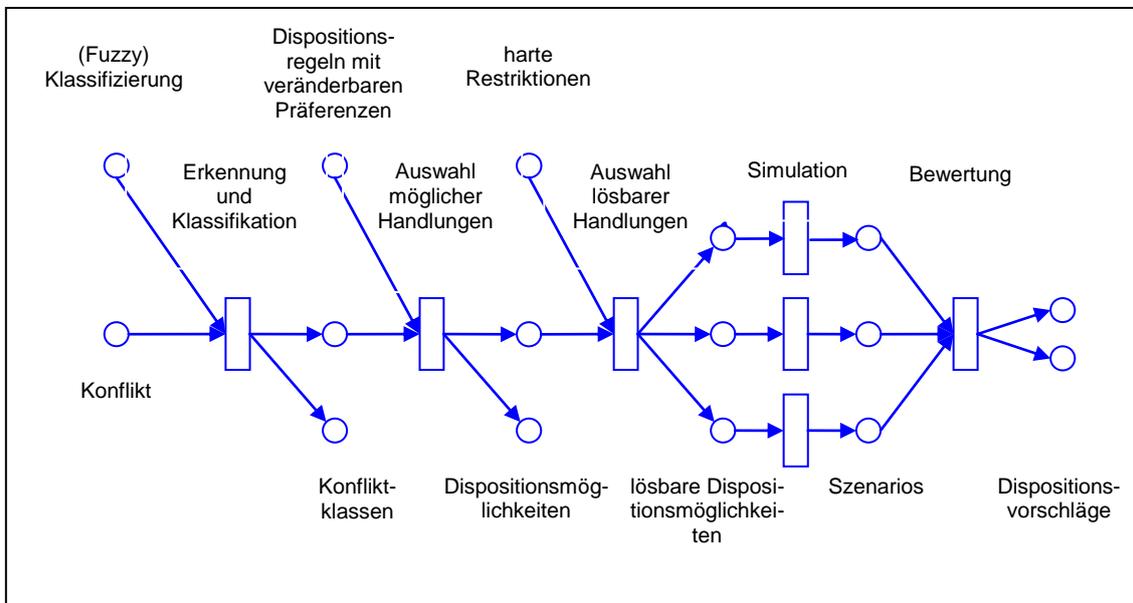


Abbildung 13: Konfliktlösung basierend auf Expertenwissen (vgl. [Fay 2000a])

Die Systemarchitektur des Disponentenunterstützungssystems beinhaltet eine zentrale regelbasierte Komponente, die das gesammelte Expertenwissen für die Dispositionsentscheidungen beinhaltet. Auf Grundlage dieser Komponente entwickelt das System Lösungen für den jeweiligen Konflikt.

Ist eine Störung aufgetreten, wird das Expertenwissen nach Regeln durchsucht, die eine passende Lösung für den Konflikt beinhalten. Dabei müssen die primären Zielsetzungen des Verkehrsprozesses beachtet werden. Mit der Auswahl der für die aktuelle Konfliktsituation anwendbaren Regeln ergeben sich mehrere mögliche Dispositionsentscheidungen. Erfüllt diese Auswahl die harten Restriktionen bzw. globalen Vorschriften, wird sie weiter verwendet. Zur Abschätzung der Auswirkungen der einzelnen Maßnahmen werden diese in parallelen Simulationsmodellen, welche die aktuelle Verkehrssituation darstellen, getestet. Die sich daraus ergebenden Szenarien werden anschließend unter Berücksichtigung der jeweiligen Zielsetzung automatisch evaluiert. Ergibt sich anhand der Auswertung, dass die Maßnahmen keine adäquate Lösung darstellen oder sogar neue Konflikte verursachen, erfolgt ein erneuter Auswahlprozess mit anschließender Bewertung. Die Maßnahmen mit den besten Lösungsansätzen für den Konflikt werden danach dem Disponenten vorgeschlagen. Dabei wird der Disponent zusätzlich über den Anteil der Maßnahmen an der Konfliktlösung informiert; ebenso über die anderen Lösungen. Der Disponent kann daraufhin die Empfehlung annehmen, sie modifizieren oder eine eigene Entscheidung treffen.

Das System berücksichtigt dabei Passagierinformationen nicht explizit, obwohl die Architektur grundsätzlich dazu geeignet wäre. Das in dieser Arbeit zu konzipierende Dispositionssystem muss dennoch u. a. auch den hier beschriebenen Entscheidungsprozess unterstützen.

#### II.4.3.2.4 Eine Systemarchitektur für die rechnergestützte Disposition

Ein etwas komplexeres System stellt die am DS&OR Lab der Universität Paderborn entwickelte Systemarchitektur für die rechnergestützte Disposition im schienengebundenen Verkehr dar. Diese Systemarchitektur stellt, gleichsam als eine der Vorleistungen zu der vorliegenden Arbeit, einen wesentlichen Input für die Modellierung des im folgenden Kapitel beschriebenen konzeptuellen Modells für die kundenorientierte Disposition, selbst wenn – im Unterschied zu letzterem – auch hier Passagierinformationen nur rudimentär für eine einzelne Entscheidungssituation berücksichtigt werden. Nichtsdestoweniger wird darin eine der Kernkomponenten der vorliegenden Arbeit, der Passagierrouter, erstmals beschrieben. Sie soll daher kurz vorgestellt werden.

Die in Abbildung 14 dargestellte Systemarchitektur integriert nach [Suhl/Mellouli 1999] Problemlösungs-, Simulations- und Analysekomponenten mit wissensbasierter Verarbeitung von Wartezeit- und Expertenregeln. Dieser Aufbau soll Disponenten in den Betriebszentralen u. a. bei der Bewertung der Istsituation bei mehreren auftretenden Verspätungen, der Erkennung von zu bearbeitenden Konflikten, der Anwendung globaler und lokaler Vorschriften und der Auswertung der Analysen und Ausarbeitung einer Entscheidung zur Konfliktlösung unterstützen.

Die Systemarchitektur beinhaltet als Grundlage eine zentrale objekt-orientierte Komponente zum Management des planmäßigen, aktuellen und erwarteten Zustands aller Ereignisse im Schienennetz, d. h. insgesamt aller Zwischenhalte und Weiterfahrten der fahrenden Züge. Im Hintergrund wird die erwartete Verspätungsausbreitung im abgebildeten Schienennetz unter Propagierung der in der Regel direkt aus dem Überwachungssystem stammenden Soll-/Ist-Vergleiche simuliert. Eine die globalen und lokalen Regelungen untersuchende Konflikterkennungskomponente meldet Konflikte an den Dispatching-Assistenten, welcher das Expertenwissen besitzt. Zusammen mit der direkt angeschlossenen graphischen Benutzungsoberfläche bildet dieser die oberste Stufe des Disponentenunterstützungssystems.

Bei Abweichungen vom geplanten Ablauf wird der Disponent durch die Konflikterkennung und den Dispatching-Assistenten über das Auftreten und die Lage des Konfliktes informiert. Mit Hilfe der Wissenskomponente wird die Störung sofort klassifiziert, und verschiedene Problemlösungskomponenten werden aufgerufen. Danach wird dem Disponenten ein Vorschlag zu Konfliktlösung unterbreitet. Diesen kann er annehmen – oder eine eigene Entscheidung treffen. Entscheidet er über die Verzögerung der Weiterfahrt eines Anschlusszugs, wird diese Information in der objektorientierten Datenbasis als minimale Verspätung – und nicht nur als erwartete Verspätung – gespeichert. Dies geschieht, weil Expertenentscheidungen von Propagierungsalgorithmen nur verwendet, aber nicht überschrieben werden dürfen. Die Simulationskomponente und die Konflikterkennung können dabei, neben der Nutzung in

der operativen Phase, auch schon während der Planungsphase verwendet werden, um Erkenntnisse über Engpässe im Schienennetz zu erlangen und Konflikten vorzubeugen.

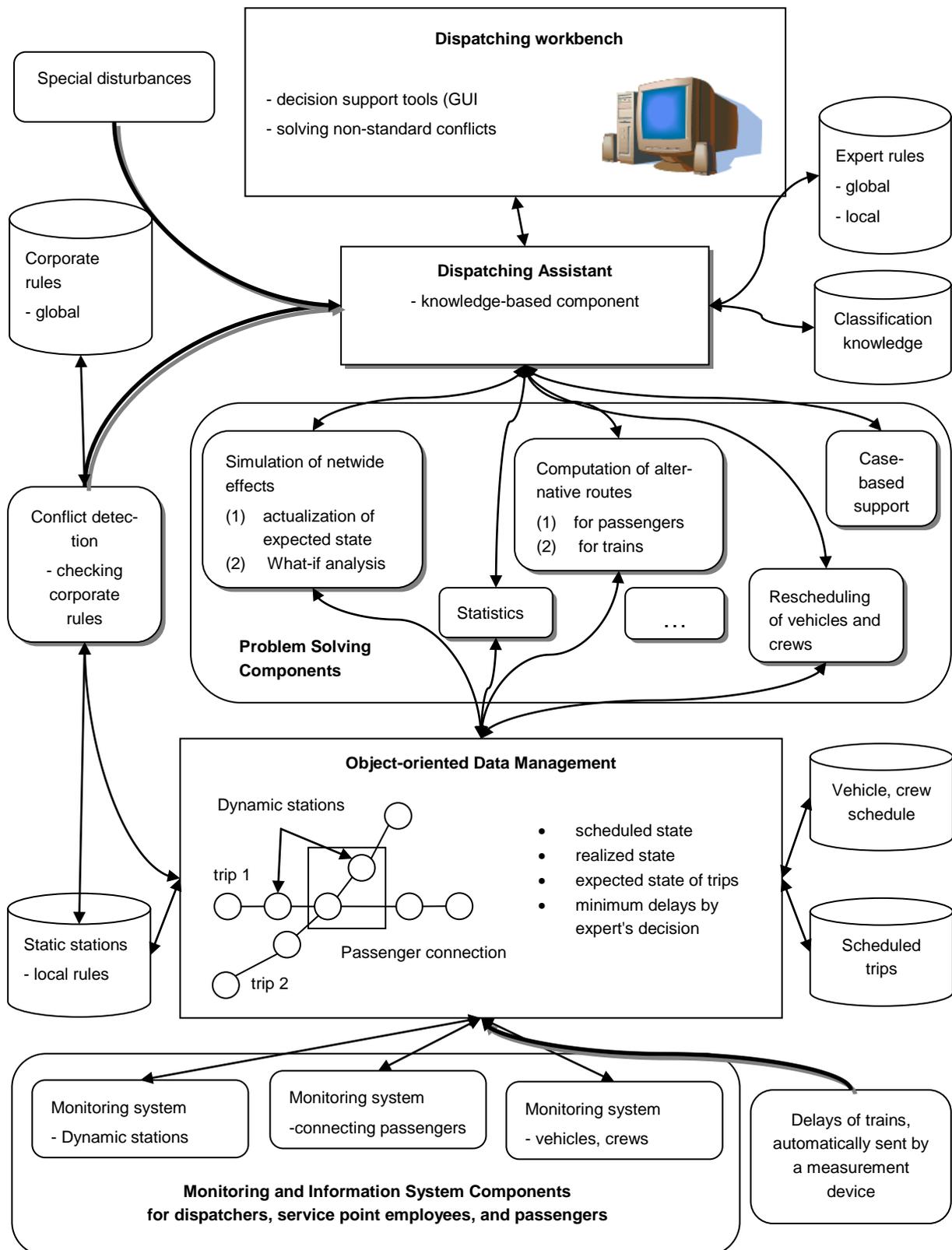


Abbildung 14: Architektur eines Entscheidungsunterstützungswerkzeugs für Disponenten (Quelle: [Suhl/Mellouli 1999]).

In die beschriebene Systemarchitektur können Optimierungssysteme als Problemlösungskomponente zur Unterstützung der dispositiven Kontrolle integriert werden. Im realen Betrieb wird das Optimierungsmodell von der Dispatching-Assistenten-Komponente bei einem auftretenden Konflikt aufgerufen. Das Modell liefert dann Lösungen für das jeweilige spezifische Problem. Die sich daraus ergebenden Lösungen dienen dem *Dispatching-Assistenten*, ein EUS für den Disponenten, zur Unterbreitung von Entscheidungsvorschlägen für die Konfliktlösung, welche vom Disponenten angenommen, modifiziert oder verworfen werden können.

Optimierungssysteme können auf diese Weise auch zu Ausbildungszwecken bei der Bewertung von Entscheidungen auszubildender Disponenten eingesetzt werden. Die Bewertungen sind dabei aber nur möglich, wenn die jeweiligen Zielfunktionen der Optimierungsprobleme die Kriterien beinhalten, mit denen auch die Auswirkungen der Entscheidungen im Simulator-Betrieb gemessen wurden. Das System benutzt dabei alle Informationen, die dem Disponenten zum Zeitpunkt der Entscheidung zur Verfügung standen. Danach können die Entscheidungen verglichen und bewertet werden.

Ein anderer Aspekt ist die Bewertung der Lösungsqualität von Heuristiken. Wie im vorigen Kapitel erwähnt ist aufgrund der Komplexität der Probleme und der geringen Lösungszeit eine exakte Optimierung kaum möglich. Daher können die Optimierungsmodelle offline zur Bewertung der Qualität verwendeter Heuristiken und zur Entwicklung neuer Heuristiken herangezogen werden, da in diesem Fall die Lösungszeit eine untergeordnete Rolle spielt.

#### II.4.3.3 Zwischenfazit

Aus den bisherigen Ansätzen lassen sich einige Anforderungen an ein System zur kundenorientierten Disposition ableiten. Bspw. sollte eine Obermenge der bisher vorgestellten Verfahren zur Findung von Vorschlägen als dispositive Maßnahmen eingesetzt werden können. So sind neben Simulations- und Optimierungsverfahren auch Heuristiken und andere Methoden denkbar.

Die angesprochenen gewichteten Passagierwartezeiten sind ein sinnvoll erscheinender Ansatz zur Bewertung von Dispositionsentscheidungen, wenngleich in einem Realsystem andere Kriterien ebenfalls zu berücksichtigen sind, bspw. die Anzahl der Veränderungen des geplanten Ablaufs. Allerdings ist bei dem Ansatz der Passagierwartezeiten zu berücksichtigen, dass ungeplante Wartezeiten während der Fahrt nicht unbedingt der Verspätung bei der Ankunft entsprechen. Nichtsdestoweniger müssen auch Verspätungen während der Fahrt Berücksichtigung finden, wenn es darum geht, eine aktuell anstehende Dispositionsentscheidung zu treffen, da die tatsächlich am Ende einer Fahrt erworbene Verspätung unter Umständen nicht leicht zu prognostizieren sein wird.

Ein recht offensichtlicher und viel versprechender Modellierungsansatz ist die Agentenbasierte Modellierung: Das Realsystem besteht aus einer Vielzahl meist vollkommen autonom handelnder Akteure, den Passagieren. Dazu kommen bahnseitig ebenfalls viele Akteure, die im Rahmen ihres Verantwortungsbereichs selbständig agieren.

Auch die Verwendung wissensbasierter Systeme zur Ablaufsteuerung erscheint sinnvoll. Ein zu konzipierendes System sollte die Möglichkeit beinhalten, feste Regelbeziehungen, bspw. pro Zug und Bahnhof oder für bestimmte Verkehrssituationen beinhalten.

Allen bisher dargestellten Ansätzen ist jedoch gemein, dass der Kunde nicht individualisiert betrachtet wird, eine strikte Kundenorientierung fehlt, was den wissenschaftlichen Beitrag des in dieser Arbeit eingenommenen Standpunktes untermauert.

Zusätzlich sind die meisten Systeme nicht für den Einsatz in einem größeren Netz wie dem der Deutschen Bahn AG und für eine große Anzahl Passagiere konzipiert. Lediglich der Ansatz in [Suhl/Mellouli 1999], der eine der Vorarbeiten zu dieser Thesis darstellt, weist in diese Richtung, wurde jedoch zum damaligen Zeitpunkt nicht direkt umgesetzt.

#### **II.4.4 Disposition in der Praxis: Organisation und Ablauf bei der Deutschen Bahn AG**

In den vorigen Abschnitten wurde beschrieben, warum Störungen im Betriebsgeschehen auftreten, welche Folgen sie haben, welche dispositiven Maßnahmen im Konfliktfall getroffen werden können und mittels welcher Computermodelle und -systeme dies unterstützt werden kann. In der Praxis läuft all das selbstverständlich nicht kontextfrei ab: Die Disposition ist als organisatorische Einheit in ein reales Bahnsystem eingebettet und entsprechend ausgestaltet. Verschiedene organisatorische Einheiten des Konzerns müssen in dem ohnehin sehr komplexen System miteinander kooperieren, um ein möglichst gutes Dispositionsergebnis zu erzielen. Dabei ist keineswegs eindeutig definiert, was genau ein „gutes“ Ergebnis der Disposition bedeutet. Bisher wurde unterstellt, dass der Sollzustand des Betriebsgeschehens das Ergebnis des in Abschnitt II.3 dargestellten Prozesses, der Produktionsplanung und -steuerung, ist. Die primäre Zielsetzung der Disposition ist dann im Normalfall die möglichst genaue Einhaltung der Pünktlichkeit der Züge bzw. des erstellten Fahrplans. Weitere Ziele sind die Aufrechterhaltung des Verkehrsflusses im Fall auftretender Konflikte und die kurzfristige Anpassung des Angebots an eine veränderte Nachfragesituation. „Gute“ Disposition wäre also, die Summe der Verspätungen von Zügen zu minimieren.

Für Disponenten, die den Güterverkehr abwickeln, sieht das anders aus: Werden Güter nicht pünktlich an den Zielort transportiert, werden von der Bahn zu zahlende Vertragsstrafen fällig, sodass im Güterverkehr Dispositionskriterium ist, die Summe der Konventionalstrafen zu minimieren. Die Ziele beider Disponentenarten stehen also in Konflikt, weil sie sich dasselbe Netz teilen müssen<sup>78</sup>. Da Vertragsstrafen direkt und sicher anfallen, während die durch unzufriedene Reisende entstehenden Kosten noch immer nur schwer zu beziffern sind, hat der Güterverkehr oft Vorrang.

Trotzdem sind natürlich alle dispositiven Maßnahmen unter Beachtung der Aufwands- und Kostenminimierung sowie der Kundenzufriedenheit durchzuführen. Dafür existieren bereits eine Reihe von Verfahrensvorschriften und technischen Systemen, deren Auflistung den

---

<sup>78</sup> Aus diesem Grund werden in dieser Arbeit für die kundenorientierte Disposition eigene Bewertungsmaßstäbe definiert und die Systemabgrenzung so gewählt, dass eine widerspruchsfreie Disposition möglich ist.

Rahmen dieser Arbeit sprengen würden, für die aber gilt: Sämtliche Entscheidungen zur Konfliktlösung beruhen auf der Erfahrung vieler Disponenten.

Allen Organisationseinheiten, die sich mit der Disposition befassen, ist somit eines gemeinsam: Die Aufgabe besteht zunächst darin, das aktuelle Betriebsgeschehen, die *Netzlage*, möglichst genau zu erfassen und aufgetretene Störungen und Konflikte möglichst automatisiert<sup>79</sup> zu erkennen. Im Anschluss werden erfahrene Disponenten anhand der Informationen aus dem Netzabschnitt, für den sie zuständig sind, die Lage im Netz analysieren und im Fall eines aufgetretenen Konflikts dispositive Maßnahmen einleiten. Je nach Zielsetzung des Disponenten werden dann unterschiedliche Maßnahmen ergriffen, um einen Istzustand dem ursprünglich geplanten Sollzustand wieder anzugleichen.

Wie dieser Prozess in der Praxis implementiert sein kann, wird nachfolgend am Beispiel der Deutschen Bahn AG erläutert. Es wird ein Einblick in aufbau- und ablauforganisatorische Aspekte sowie die Informations- und Kommunikations-Infrastruktur der Disposition als organisatorischer Einheit gegeben. Dabei sollte immer auch Augenmerk auf die Konzernstruktur (vgl. Abschnitt II.1) gelegt werden, weil sie einen Großteil der notwendigen Dispositionsabläufe vorgibt.

#### II.4.4.1 Die Dispositionsorganisation bei der Deutschen Bahn AG

Die Disposition war – zumindest im Bereich der Deutschen Bahn AG – ursprünglich Aufgabe der Fahrdienstleiter an den Stellwerken. Diese hatten jeweils nur einen sehr begrenzten Bereich zu überwachen. Im Laufe der Zeit wurde die Betriebsleitung immer stärker zentralisiert. Heute existiert ein hierarchisch organisiertes System von Betriebsleitstellen, die für die Zugüberwachung und -steuerung zuständig sind. Auf der obersten Ebene liegt die Netzleitzentrale in Frankfurt, die für die Disposition der Fernreisezüge und der überregionalen Güterzüge zuständig ist.<sup>80</sup> Sie ist weisungsbefugt gegenüber der nächsten Hierarchiestufe, die zunächst aus 15 Betriebszentralen (BZ) bestand, deren Anzahl auf sieben reduziert wurde.<sup>81</sup> Diese befinden sich in Berlin, Hannover, Duisburg, Leipzig, Frankfurt, Karlsruhe und München und sind jeweils zuständig für die Betriebsüberwachung und Disposition in einem regional abgegrenzten Bereich.

Die Betriebszentralen gehören heute der DB Netz AG. Sie ist als Infrastrukturbetreiber für einen reibungslosen Verkehrsfluss, d. h. für sämtliche Dispositionsentscheidungen, auf den Schienen ebenso zuständig wie für Trassenneubau und -wartung. Dementsprechend stellt die Netz AG Dienstleistungen für die drei bahneigenen EVU DB Cargo, DB Reise & Touristik sowie DB Regio bereit. Auch den Privatbahnen bietet die Netz AG ihre Leistungen an. Sie ist

---

<sup>79</sup> In der Praxis können selbstverständlich nicht alle Konflikte automatisiert erfasst werden. Meldungen über fehlendes Personal werden z. B. von Mitarbeitern telefonisch weitergegeben.

<sup>80</sup> Eine Beschreibung der Aufgaben und verwendeten Technologien in einer Netzleitzentrale findet sich in [Breu 2003].

<sup>81</sup> Detailliertere Informationen zur Arbeitsweise der Betriebszentralen finden sich in [Jacobs 2003], [Kant 2000], [Pachl 2002] sowie [Girke/Bader 2001].

mit rund 44.000 Mitarbeitern für ca. 35.500 Gleiskilometer zuständig und erbringt damit eine jährliche Leistung von etwa einer Milliarde Trassenkilometer<sup>82</sup>.

Der zu disponierende Bereich einer Betriebszentrale ist in mehrere *Streckendispositionsbezirke* unterteilt. Für diese Bezirke ist jeweils ein Zuglenker (Disponent) verantwortlich. Ziel ist, diesem Zugdisponenten direkten steuernden Durchgriff auf die Fahrstrecken der Züge zu geben. Die Zuständigkeit für die Zugüberwachung und -steuerung liegt bei den *örtlich zuständigen Fahrdienstleitern*, die allerdings Weisungen des Zugdisponenten entgegennehmen. Aus diesem Grunde sind die Arbeitsplätze der Disponenten und Fahrdienstleiter räumlich nebeneinander angeordnet.

Aufgrund des hohen Kommunikationsbedarfs zwischen der Netz AG und ihren Kunden unterhalten die anderen EVU in den BZ ebenfalls Transportleitungen. Darüber hinaus betreibt bspw. die Regio AG darüber hinaus noch weitere Standorte; auch andere EVU haben eigene Leitstellen.

Die angesprochene Zentralisierung wird vor allem durch die Einführung *elektronischer Stellwerke* (ESTW) sowie die Nachrüstung älterer Relaisstellwerke zur Fernsteuerung möglich: Die Fahrwege der Züge und der Betrieb können von Ferne aus manipuliert bzw. kontrolliert werden.

Eine wichtige Voraussetzung für eine weitgehende Automation der Zugsteuerung wurde mit der sog. *fahrplanbasierten Zuglenkung* geschaffen.<sup>83</sup> Hierbei werden sämtliche für die Steuerung notwendigen Informationen im *Zuglenkplan* vorgehalten. Dieser dient als Grundlage für die Zugsteuerung über die Leit- und Sicherungstechnik. Der Zuglenkplan bezieht seine Informationen immer aus dem aktuellen *Dispositionsfahrplan*. Der Dispositionsfahrplan wiederum ist der um dispositive Maßnahmen erweiterte Sollfahrplan. Damit hat der Disponent mit seinen Entscheidungen zur Disposition direkten Einfluss auf die Zugsteuerung. Dem örtlich zuständigen Fahrdienstleiter fallen i. d. R. nur überwachende Tätigkeiten zu.

Ziel der räumlichen Konzentration der Bedieneinrichtungen und der Zusammenführung der einzelnen Dispositionsebenen war es, die Effektivität und Flexibilität der Disposition zu steigern und die Zusammenarbeit der Disponenten zu vereinfachen sowie damit die Konfliktbehandlung zu erleichtern. Die direkte Kommunikation ermöglicht eine schnelle Informationsversorgung anderer betroffener Dispositionsstellen und damit eine zeitnahe Reaktion auf Störungen, was insbesondere bei Fernverkehrsverbindungen von hoher Bedeutung ist. In der Praxis führt dieser Grundgedanke in Verbindung mit der Konzernstruktur nicht unbedingt zum angestrebten Ziel, da die Netz AG letztendlich die Kontrolle über den Trassenverbund behält. Die Fahrdienstbetreiber mieten einzelne Streckenabschnitte für eine bestimmte Zeit, ähnlich den sog. „Slots“<sup>84</sup> in der Luftfahrt. Treten innerhalb einer Fahrdienstgesellschaft

---

<sup>82</sup> Die Zahlen stammen aus [DB Netz 2005] und [DB 2005h]. In Trassenkilometern wird die zurückgelegte Strecke der Züge ausgedrückt.

<sup>83</sup> Zur fahrplanbasierten Zuglenkung siehe [Bormet 2002].

<sup>84</sup> Slots sind die Zeitfenster, innerhalb derer ein bestimmtes Flugzeug starten oder landen darf. Kann ein Slot nicht genutzt werden, muss bis zum nächsten freien Slot gewartet werden.

Komplikationen auf, die nicht lokal bzw. innerhalb des EVUs gelöst werden können, muss eine Abstimmung mit der Netz AG erfolgen. Eine Kommunikation der verschiedenen EVU untereinander findet – trotz kurzer Kommunikationswege – oft nicht statt und ist i. Allg. auch nicht möglich, da nur der Netz AG die wirkliche Gleisbelegung bekannt ist. Diese künstliche Trennung einstiger Gesamtstrukturen führt zu höheren Kommunikations- und Personalaufwänden, da übergreifende Schritte zwischen mehreren Unternehmen ausgehandelt werden müssen. Jedes Unternehmen muss zu diesem Zweck Ansprechpartner zur Verfügung stellen, die im Konfliktfall im Prinzip dieselbe Aufgabe zu lösen haben – allerdings mit unterschiedlichen Zielsetzungen.

Ein weiteres Problem der organisatorischen Trennung in verschiedene EVU unter dem Dach der DB ist die Aufteilung des Gesamtbestandes an Ressourcen wie Zugmaschinen und Waggons in die einzelnen Gesellschaften. Fällt ein Fahrzeug aus, kann es vorkommen, dass zwar ein Ersatzfahrzeug in erreichbarer Nähe zur Verfügung steht, dies aber einem anderen Unternehmen gehört und somit nicht ohne weiteres einsetzbar ist; Ressourcenkonflikte können entstehen (vgl. auch Abschnitt II.4.4.2.3). Jedes einzelne Unternehmen kann dem nur durch einen höheren Bestand an Fahrzeugen begegnen, was jedoch eine höhere Kapitalbindung impliziert. Gleiches gilt für Personal. So dürfen z. B. Zugführer aus Sicherheitsgründen nur Strecken befahren, die ihnen bekannt sind.

Zusammenfassend lässt sich sagen: Störungen können, wie oben erläutert, verschiedenste Ursachen haben und innerhalb der Dispositionsstruktur der DB AG auch noch in unterschiedliche Verantwortlichkeitsbereiche fallen. Solange jeder Dienstleister Störungen und Konflikte innerhalb seines Bereichs regeln und auflösen kann, ist dies unproblematisch. Sind Konflikte nicht lokal lösbar, oder benötigt die Behebung zu viel Zeit, ist meist die ganze Dienstleistungskette involviert. Da der Bahnverkehr im Interesse des Kunden fortgesetzt werden muss, können Dispositionsmaßnahmen nur unter Einbeziehung aller betroffenen Unternehmen erfolgen. Die Vielfältigkeit der Störungsursachen wird demnach durch die Vielfältigkeit der Verfahren zur Behebung der Störungen noch potenziert. Der im Rahmen dieser Arbeit oft zitierte „Disposition“ – vgl. Kapitel III – ist also in Wirklichkeit eine komplexe Organisation von an der Disposition beteiligten Mitarbeitern verschiedener Bahnunternehmen, die in der Praxis an örtlich nicht weit voneinander entfernten Terminals die gleiche Aufgabe mit teils widersprechenden Zielsetzungen zu lösen versuchen. Dafür steht ihnen mittlerweile eine einheitliche Datengrundlage zur Verfügung: Das Reisendeninformationssystem RIS. Dieses wird u. a. im nächsten Abschnitt besprochen.

#### II.4.4.2 Bahnseitige technologische und organisatorische Unterstützung der Disposition

##### II.4.4.2.1 RIS – Das Reisendeninformationssystem der Deutschen Bahn AG

Ein gutes, übersichtliches und auf die Bedürfnisse der Reisenden abgestimmtes Informationsangebot während der Fahrt ist wie erwähnt ein wesentliches Qualitätsmerkmal einer Bahnreise. Eine schnelle, umfassende und verlässliche Information über

- eventuelle Verspätungen
- Änderungen von Abfahrts- und Ankunftsgleisen oder -orten
- Sonder- und Ersatzzüge
- mögliche Anschlüsse in den Bahnhöfen

sind essentiell für Reisende während einer Fahrt.

Mit dem Reisendeninformationssystem „RIS“ verfolgt die Bahn daher das Ziel, die Servicequalität im Schienenverkehr und damit die Kundenzufriedenheit zu steigern. Dazu sollen die Bahnpassagiere und alle Mitarbeiter der Bahn besser und schneller als bisher über Verspätungen und Zugausfälle informiert werden.

Das tägliche Betriebsgeschehen im Personenverkehr mit den ca. 1.300 Zugfahrten im Bereich DB Reise & Touristik und den über 28.000 Zügen pro Tag im Bereich DB Regio zwischen den Bahnhöfen bzw. verschiedenen Stellen im Schienennetz wird bereits weitgehend überwacht. Technisch ermöglicht wird dies in erster Linie durch Zugnummernmeldeanlagen der Stellwerke, welche die aktuelle Position der Züge an die Betriebszentralen weitergeben. Zusätzlich wird mit Hilfe der technischen Fahrwegüberwachung der Zustand des Fahrweges erfasst und an die Betriebszentrale übermittelt, wodurch technische Störungen schneller erkannt werden können. Insgesamt sorgt dies für eine aufgrund der Datenbasis effizientere Disposition. Bei nicht durch Zugnummernmeldeanlagen überwachten Strecken erfolgt die Verspätungsweitergabe bzw. die Zuglaufverfolgung fernmündlich durch die Zugbegleiter, wobei diese Informationen bei weitem nicht so verlässlich sind wie automatisch erfasste. Beispielsweise ist nur bedingt zu unterscheiden, ob eine Meldung zu spät eingetroffen ist, weil der Zugbegleiter sie zu spät abgesetzt hat, oder ob ein Zug tatsächlich verspätet ist. Meldungen über Passagiere erfolgen zurzeit in jedem Fall per Telefon, bspw. wird ein Antrag zur Anschlusssicherung vom Zugbegleiter per Telefon an die Betriebszentrale weitergegeben, was natürlich, bei mehreren hundert Passagieren pro Zug, recht ineffizient sein kann.

Eine Weiterentwicklung des Systems verbindet Mobilfunk und Satellitenortung und basiert auf dem bereits für den Fernverkehr bestehenden Informationssystem der Bahn, mit dem zuvor nur die ca. 1.000 täglich verkehrenden Fernzüge von der zentralen Transportleitung durch das Satellitenortungssystem GPS überwacht wurden. Eine grundlegende Neuerung von RIS ist die Integration der Nahverkehrszüge. Mittels RIS können die aktuellen Positionen der bis zu 30.000 Fern- und Nahverkehrszüge pro Tag in Echtzeit erfasst und analysiert werden. Um Datenkonsistenz zu gewährleisten, wird diese Aufgabe zentral gelöst. Sobald sich aus den Positionsdaten Abweichungen ergeben, werden Konsequenzen, bspw. Verspätungsausbreitungen, berechnet. Die Daten der Fernverkehrszüge werden dabei wie bisher durch GPS an den Zentralrechner übermittelt. Viele Züge, insbesondere im Nahverkehr, verfügen jedoch momentan noch nicht über ein automatisches Ortungssystem verfügen. Dieser Problematik begegnet die Bahn durch Ausrüstung der Kundenbetreuer mit Handys. Somit können auch von diesen Zügen Abfahrtszeiten, aktuelle Positionen sowie Störungen und die dafür verantwortlichen Gründe per SMS an den Zentralrechner übermittelt werden. Eine Umrüstung der

Nahverkehrszüge auf GPS erfolgt parallel, so dass mit einer Anbindung von 70 % dieser Züge an das Satellitenortungssystem im Jahr 2007 zu rechnen ist.

Um dem RIS-System nötigenfalls alle Informationen in Echtzeit auf SMS-Basis zur Verfügung zu stellen, werden sowohl die 4.000 Kundenbetreuer im Nahverkehr als auch die rund 1.700 Zugbegleiter im ICE und InterCity – unabhängig von der SMS-Ausstattung – mit dem dafür notwendigen Kommunikationssystem ausgerüstet. Neben der Positions- und Störungsmeldung können dem Zentralrechner zugleich auch Informationen über die Anzahl der Umsteiger für die Anschlussverbindungen mitgeteilt werden<sup>85</sup>. Außerdem können die Kundenbetreuer und Zugbegleiter auch benötigte Informationen vom Zentralrechner abrufen. Die dort in Echtzeit verarbeiteten Daten stehen somit bundesweit und zeitnah<sup>86</sup> für aktuelle Kundeninformationen zur Verfügung. Die Informationsübertragung an den Kunden soll dabei an den verschiedenen Orten durch das RIS-Intranet folgendermaßen erfolgen:

- Nahverkehrszüge ohne Kundenbetreuer sollen mit einem digitalen Ansagesystem und teilweise mit elektronischen Anzeigen ausgerüstet werden.
- In Nahverkehrszügen sollen alle Kundenbetreuer über sämtliche Echtzeit- und Anschlussinformation verfügen.
- Im ICE und InterCity wird die Information über die vorhandenen Anzeigesysteme oder den Zugbegleiter erfolgen.
- Im Internet sind die aktuellen An- und Abfahrtspläne für alle Bahnhöfe erhältlich.<sup>87</sup>
- In den Bahnhöfen soll die Informationsübertragung an den Kunden über qualitativ verbesserte Anzeigen und Lautsprecherdurchsagen erfolgen.

Bis Ende 2003 wurden bereits die wichtigsten Knotenbahnhöfe und die wichtigsten Nah- und Fernverkehrsstrecken in dieses System integriert sein. In den folgenden Jahren sollte das neue System flächendeckend auf ca. 3.600 Bahnhöfe, auf alle Fernverkehrszüge und auf ca. 70 % der Nahverkehrszüge ausgedehnt werden. Insgesamt soll die Überwachung des kompletten Netzes der Deutschen Bahn AG bis zum Jahr 2008 abgeschlossen sein.

Zusätzlich zum RIS-System selbst plant die Deutsche Bahn, dieses auf Anfrage auch für den intermodalen Verkehr verfügbar zu machen. Die Anschlusssicherung zwischen dem Schienenverkehr und anderen Verkehrsträgern soll für die Reisenden durch zuverlässige Echtzeit-Informationen an den Umsteigepunkten verbessert werden. Dabei sind in der Praxis jedoch vermutlich größere organisatorische Probleme zu lösen.

Es bleibt festzuhalten, dass RIS, wenn es vollständig implementiert ist, in der Tat alle zur Kundeninformation wünschenswerten Daten zur Verfügung stellt. Damit wäre eine der Hauptvoraussetzungen an ein System zur kundenorientierten Disposition erfüllt. Trotzdem

---

<sup>85</sup> Zumindest ist dies in der von der Bahn benutzten Datenstruktur nebst einer Vielzahl weiterer Informationen vorgesehen.

<sup>86</sup> Im Prinzip kann der RIS-Datenstrom im Bahnnetz an beliebigen Orten empfangen und verarbeitet werden. Das in Kapitel 6 vorgestellte personalisierte Meldesystem per SMS berechnete aus dem RIS-Datenstrom relevante Verspätungen und sendete diese an die eingebuchten Teilnehmer.

<sup>87</sup> Dies kann unter <http://reiseauskunft.bahn.de/bin/bhftafel.exe/dn> überprüft werden!

bleibt noch die Aufgabe, die Information geeignet zu individualisieren und für den Reisenden damit einen echten Mehrwert zu schaffen. Weitere grundlegende Informationen zu RIS sind in [Meurer 2000] zu finden.

#### II.4.4.2.2 Technologische Unterstützung von Dispositionsentscheidungen: Leit- und Sicherungstechnik

Einhergehend mit den informationstechnologischen Maßnahmen für das RIS unternimmt die Bahn verstärkte Anstrengungen, um die aktuelle Netzsituation exakt erfassen zu können. Mittels moderner Sicherungs- und Telekommunikationstechnik werden, wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, Disponenten und Fahrdienstleiter bei ihrer Aufgabe unterstützt, sodass sie Konflikte früher erkennen und ggf. durch eine vorausschauende Disposition minimieren können.<sup>88</sup>

Dabei resultiert der Plan der exakten Erfassung eigentlich eher aus dem Sicherheitsgebot bei der Ausführung des Fahrplans: Wie oben beschrieben verhindert der lange Bremsweg im Schienenverkehr i. Allg. ein „Fahren auf Sicht“. Daher ist eine Außensteuerung nötig, um die Sicherheit des Betriebes zu gewährleisten. Die wichtigsten Funktionen der Leit- und Sicherheitstechnik sind dementsprechend (vgl. [Pachl 2002], S. 35):

- Sicherstellung der Zugintegrität (alle Waggons des Zugverbandes sind angekuppelt)
- Feststellung und Übermittlung der Position der Züge
- Weitergabe der Fahrbefehlinformationen an den Zugführer

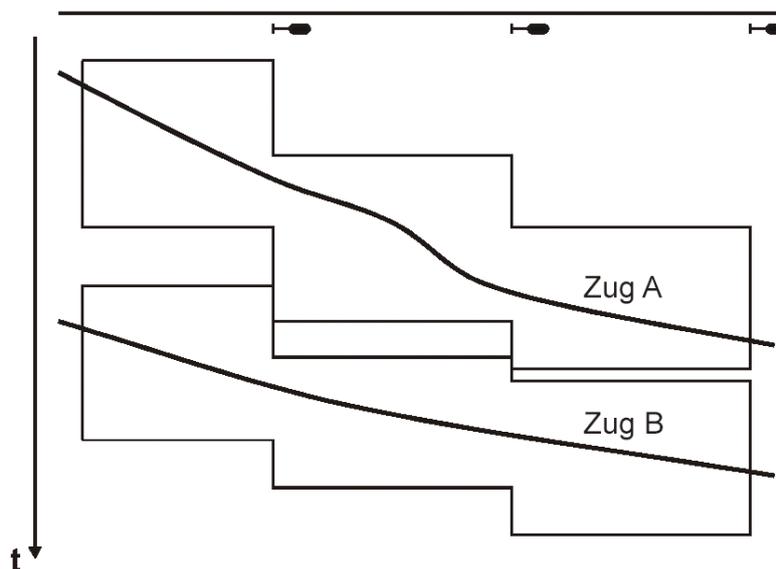


Abbildung 15: Sperrzeitentreppe zweier Züge, Quelle: [Gröger 2002], S. 17

<sup>88</sup> Eine weitere, der Literatur entnommene Methode, Züge zu lokalisieren, ohne dazu große Infrastrukturinvestitionen vorzunehmen, wird im Übrigen in [Geistler/Böhringer 2004] beschrieben. Dabei werden während einer Fahrt mittels Sensoren wahrgenommene Ereignisse mit der bekannten Streckeninfrastruktur abgeglichen, sodass sich recht präzise Ortungen vornehmen lassen.

Heute werden bei der Bahn i. d. R. ortsfeste Signalanlagen zur Steuerung des Betriebs eingesetzt. Daher muss der Fahrweg in *Blöcke* eingeteilt werden, die niemals von zwei Zügen gleichzeitig befahren werden sollten. Diese Technik wird *Fahren im Raumabstand* genannt. Für jeden Zug im Fahrplan entsteht pro Strecke dadurch eine *Sperrzeitentreppe*, die beschreibt, wie der Zug die Fahrwegblöcke belegt (vgl. Abbildung 15).

Dieses Vorgehen impliziert aufgrund der Sperrzeiten Abstände zwischen zwei Zügen, die teils erheblich größer sind als der eigentlich sinnvolle Bremswegabstand. Dadurch bleiben bereits bei der Fahrplankonstruktion, vor allem aber bei der Disposition, Netzkapazitäten ungenutzt. Zudem sind Bereitstellung, Erhaltung und Wartung der ortsfesten Signalanlagen sehr teuer. Dementsprechend sollen zukünftig möglichst große Teile der Steuerungslogik von Fahrweg in das Schienenfahrzeug verlagert werden. Der Mobilfunkstandard für Bahnen, GSM-R (*Global System for mobile Communication – Rail*), sowie das Satellitenortungssystem GPS bzw. eine Zugortung über passive Informationsträger auf den Gleisen, sog. (Euro-) *Balisen*, ermöglichen diese Umstellung. Dies geschieht im Übrigen sowohl auf nationaler als auch auf internationaler Ebene: Beide Technologien entspringen in erster Linie dem europäischen Gemeinschaftsprojekt ERMTS (*European Rail Traffic Management System*), welches die Verbesserung des vorhandenen Kommunikations- und Meldesystems zum Ziel hat. Da auf europäischer Ebene unterschiedliche, vorwiegend inkompatible Systeme existieren, die den an Bedeutung zunehmenden grenzüberschreitenden Verkehr erschweren<sup>89</sup>, muss die Abschaffung nationaler Unterschiede im transeuropäischen Streckennetz für Hochgeschwindigkeitszüge und die Schaffung von Interoperabilität durch einheitliche Standards primäres Ziel sein, um die Bahn gegenüber der Luftfahrtindustrie konkurrenzfähig zu machen. GSM-R implementiert dabei eine einheitliche Kommunikationsplattform, welche im nächsten Abschnitt kurz erläutert wird<sup>90</sup>. Ebenfalls von großer Bedeutung ist die europaweite Vereinheitlichung der Sicherheits- und Meldetechnik für die teilnehmenden Bahnen im Rahmen des Projekts des European Train Control Systems (s. u.).

Begleitend dazu wird der Verkehrsfluss durch den Aufbau neuer elektronischer Stellwerke optimiert, welche die Funktion von bis zu sechs konventionellen Stellwerken übernehmen. Mittlerweile wird bereits die Mehrzahl der elektronischen Stellwerke, deren Aufgabe aus der computerisierten Steuerung von Weichen, Schranken und Signale für die Züge liegt, von einer Betriebszentrale aus überwacht.

All diese Maßnahmen ermöglichen letztlich eine schnellere Gleisfreigabe auf den Fahrwegen, sodass Sicherheitsabstände auf Strecken verkürzt werden können – bis hin zum Fahren

---

<sup>89</sup> Im grenzüberschreitenden Verkehr sind daher bisher häufig Mehrfachausrüstungen der Fahrzeuge notwendig; dies ist bspw. beim „Thalys“, einem Hochgeschwindigkeitszug, der zwischen Köln, Paris und Brüssel verkehrt, der Fall.

<sup>90</sup> Für die kundenorientierte Disposition ist dieses System insofern von Belang, als dass es zur Kommunikation mit und zur Steuerung der Passagiere ebenfalls eingesetzt werden kann und sollte. Die These, dass mit geschickter Nutzung *vorhandener* Technologie die „Informationslücken“ eines Reisenden während der Fahrt gefüllt werden könnten, wird somit belegt.

im absoluten Bremswegabstand. Dies wiederum erhöht die Kapazität der Strecken und ermöglicht dadurch höhere Taktraten auf den Linien bzw. mehr Freiheiten für die Fahrplangestaltung und die außerplanmäßige Bereitstellung von Trassen, um z. B. auf eine veränderte Nachfragesituation zu reagieren. Andererseits werden so auch die Anforderungen an die Disposition erhöht: Bei Konflikten entsteht ein Bedarf nach schnelleren und effizienteren Dispositionsentscheidungen aufgrund des gegenüber Störungen anfälligeren Fahrplans. Auf Fernbahnstrecken besteht im Gegensatz zu Regionalbahnstrecken ebenfalls ein höherer Bedarf an dispositiver Kontrolle, da dort schnell fahrende Fernzüge und langsamere Regional- und Güterzüge dieselben Ressourcen nutzen.

#### II.4.4.2.2.1 GSM-R

GSM-R ist einer der Hauptbestandteile des ERMTS-Projekts, zu dessen Einführung sich bereits 32 europäische Eisenbahnverwaltungen bereit erklärt haben. Auf der nationalen Ebene verfolgt die Deutsche Bahn AG mit GSM-R das Ziel der Schaffung einer effizienten Leit- und Sicherheitstechnik. GSM-R ist für die Bahn ein Eckpfeiler der Zukunftsstrategie „Netz 21“ (vgl. [DB 2004]).

Ein weiterer Grund pro GSM-R ist der Ersatz der bisherigen Kommunikationsanwendungen: Zurzeit erfolgt die Kommunikation, bspw. für Bahn- und Rangierfunk oder auch zwischen Gleisarbeitern mittels verschiedener analoger Systeme (vgl. [DB 2005c]). Diese bringen erhebliche Nachteile und Probleme mit sich:

- Die Instandhaltung und Erneuerung der alten Systeme wird immer aufwändiger und kostenintensiver. Es entstehen zudem hohe Betriebskosten, da jedes System eine eigene Hardware erfordert.
- Zugleich müssen die Systeme *getrennt* gewartet werden, so dass sich höhere Wartungskosten gegenüber einer einheitlichen Kommunikationsplattform ergeben.
- Hinzu kommt, dass die veralteten analogen Systeme weitaus störanfälliger sind und nicht ohne Erweiterungen die Anforderungen an eine moderne Kommunikationsumgebung erfüllen.
- Die proprietären analogen Systeme behindern schließlich die Interoperabilität des europäischen Schienenverkehrs.

Da auf diese Weise eine *einheitliche, standardisierte* Plattform für alle Kommunikationsdienste *mit geringerer Störanfälligkeit* geschaffen wird, ist ein Wechsel der Systeme zu einem digitalen Kommunikationsnetz auf Basis des erprobten GSM-Standards für Mobilfunknetze aus Sicht der Deutschen Bahn AG unausweichlich geworden.

GSM-R integriert einige Erweiterungen zum konventionellen GSM-Standard (vgl. Kapitel V), die speziell den Anforderungen der Bahn angepasst wurden. Neben betriebswirtschaftlichen Vorteilen bietet die Nutzung des digitalen Kommunikationssystems auch eine Reihe technischer Vorteile beim Einsatz im täglichen Betriebsablauf. Das digitale Netz bietet z. B. neue Möglichkeiten der Zugsteuerung und -überwachung sowie Notrufverbindungen. Beim Zugfunk ermöglicht GSM-R gegenüber dem analogen System eine direkte Kommunikation

mit dem Lokführer sowie für den Betrieb wichtige Sammel- und Gruppenruf-Funktionalitäten. Per Funk können Änderungen der Streckendaten für die elektronischen Buchfahrpläne<sup>91</sup> direkt an die Triebfahrzeuge übertragen werden, um auf eventuelle Störungen schnell reagieren zu können. Außerdem lassen sich auch Diagnosefunk- und Energiedaten aus den Zügen per GSM-R übertragen, was eine zentrale Wartungsüberwachung und -planung ermöglicht. Ebenso kann, wie oben angedeutet, in Kombination mit GPS eine genaue Standortbestimmung der einzelnen Züge erfolgen. Dies ermöglicht letztlich erst die gezielte Kundeninformation, den zweiten Hauptbestandteil der kundenorientierten Disposition.

Besonders wichtig ist der Einsatz von GSM-R für die Zugsteuerung und -sicherung, vornehmlich aufgrund einiger innovativer Anwendungsmöglichkeiten. So wird zukünftig die ab Geschwindigkeiten von 160 km/h notwendige Linienzugbeeinflussung<sup>92</sup> durch eine Funkzugbeeinflussung auf Basis des weiter unten erläuterten *European Train Control Systems* (ETCS) ersetzt werden können. Dadurch entfallen die Linienleiter<sup>93</sup> mit der Verkabelung entlang der Schienen. Auch ortsfeste Signalanlagen werden nicht mehr benötigt, denn die Daten für den Fahrweg werden per GSM-R direkt in den Führerstand der Züge übermittelt. Die Erstellung der Infrastruktur von GSM-R sollte nach Angaben der Deutschen Bahn AG 2004 weitestgehend abgeschlossen sein, der Ausbau dauert jedoch immer noch an (vgl. [DB 2005f]). In der ersten Ausbaustufe ist der Mobilfunk auf 24.500 km innerhalb des Streckennetzes verfügbar. Für eine lückenlose Kommunikation wurde dafür, je nach Topographie der Bahnstrecke, alle fünf bis zwölf Kilometer eine Basisstation errichtet. Im Bereich der sieben Betriebszentralen existiert jeweils ein *Mobile Switching Center*, welches über 63 *Base Station Controller* verfügt, die insgesamt ca. 2.800 Basisstationen steuern. Das Netzmanagement und die Überwachung werden dabei während des Regelbetriebs durch sieben *Operation and Maintenance Center*, die auch in die Betriebszentralen integriert sind, verwaltet. Außerhalb dieser Zeit ist ein *Network Management Center* für das Streckennetz innerhalb Deutschlands zuständig. Die Planung wurde dabei mit dem Ziel durchgeführt, dass die Funkversorgung innerhalb Deutschlands zu mindestens 95 % verfügbar ist. Zusätzlich wurde die Fahrzeugflotte auf MTRS (*Multi-Mode Train Radio System*) umgerüstet, um das GSM-R nutzen zu können.

#### II.4.4.2.2.2 *European Train Control System*

Das ETCS ist, neben GSM-R, die zweite Hauptkomponente des ERMTS. Aufgrund einer Vielzahl technischer Hürden und Inkompatibilitäten, die den europäischen Schienenverkehr behindern, soll mit der Einführung von ETCS ein einheitliches europäisches Zugsteuerungs-

---

<sup>91</sup> Ein Buchfahrplan ist der Fahrplan für das Zugpersonal. Darin sind technische Daten wie Fahrzeiten, zulässige Geschwindigkeiten und sonstige, betriebliche Besonderheiten für den Laufweg eines Zugs enthalten (vgl. [Pachl 2005] oder [Wikipedia 2005b]).

<sup>92</sup> Ein Sicherheitssystem, das vor allem bei Geschwindigkeiten über 160 km/h aufgrund der langen Bremswege (bzw. des hierfür nicht ausreichenden Abstands zwischen Haupt- und Vorsignalen) eingesetzt werden muss.

<sup>93</sup> Ein Linienleiter ist ein Hilfsmittel bei der Linienzugbeeinflussung, mit dem sich Züge selbst orten können.

und Zugsicherungssystem geschaffen werden. Ziele der ETCS-Spezifikation für alle beteiligten Betreibergesellschaften sind:

- Kostenreduzierung bei Investition, Instandhaltung und Betrieb
- Ersatz der nationalen Zugsicherungssysteme
- Interoperabilität der Schienennetze
- Leistungssteigerung der einzelnen Strecken

Die Fahrten der einzelnen Züge werden dabei auf der Grundlage sicherer Streckeninformation und Zugeigenschaften durch ETCS kontrolliert, was z. B. die Einhaltung der örtlich zulässigen Geschwindigkeit und der Höchstgeschwindigkeit des Zugs umfasst. Zudem erfolgt eine Überprüfung des für einen Zug freigegebenen Fahrweges inklusive Eignungsprüfung der Fahrzeuge und der Bewegungsrichtung. Die Einhaltung eventuell vorgegebener betrieblicher Verfahren, bspw. „Fahrt auf Sicht“, wird ebenfalls überwacht. Innovativ an ETCS ist, dass eine Vielzahl zur Fahrdurchführung notwendiger Entscheidungen nicht von einer Kontrollstelle ausgeführt wird, sondern durch die Fahrzeuge selbst erfolgt. In diesem Sinne wird ein Agentenkonzept (vgl. Abschnitte II.4.3.2 und III.1.1) implementiert.

Das ETCS besteht aus drei unterschiedlichen Betriebsebenen. Durch diese Klassifizierung können die einzelnen Eisenbahnbetreiber die Übergänge zwischen verschiedenen nationalen Zugsteuerungs- und -sicherungssystemen zu einem einheitlichen europäischen System besser planen. Die Bahnbetreiber können dabei den Level wählen, welcher ihren betrieblichen Anforderungen bzw. Möglichkeiten entspricht. Die drei einzelnen Levels von ETCS sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Anwendungsstufen des European Train Control System (nach [Wegener 2005])

Anwendungsstufe	Level 1	Level 2	Level 3
<b>Übertragungsmedium</b>	Eurobalisen	Eurobalisen + GSM-R	Eurobalisen +GSM-R
<b>Übertragungsart</b>	Punktförmig	Kontinuierlich	Kontinuierlich
<b>Freimeldeeinrichtungen erforderlich?</b>	Ja	Ja	Nein
<b>Streckensignale erforderlich?</b>	Ja	Nein	Nein
<b>Fester Blockabstand?</b>	Ja	Ja	Nein
<b>Zugintegritätsprüfung erforderlich?</b>	Nein	Nein	Ja

Für den interessierten Leser finden sich zu den verschiedenen Levels weitere Informationen im Anhang.

#### II.4.4.2.3 Dispositionenbeeinflussende organisatorische Neuerungen

Im Sinne der Kundenorientierung, Steigerung des Streckendurchsatzes und der Pünktlichkeit wurde von der DB Netz AG die Investitionsstrategie „Netz 21“ (vgl. z. B. [DB 2001] oder [Fricke 2001]) entwickelt. Diese Konzeption unterteilt das Streckennetz in die drei verschiedenen Bereiche „Vorrangnetz“, „Leistungsnetz“ und „Regionalnetz“. Durch diese Aufteilung sollen Konfliktmöglichkeiten minimiert und folglich Kosten gesenkt und Reisezeiten verkürzt werden. Das Vorrangnetz umfasst etwa 10.000 km Strecke zwischen den Ballungszentren mit 3.500 km für den schnell fahrenden, 4.500 km für den langsam fahrenden und 2.000 km für den S-Bahn-Verkehr. Das Leistungsnetz beinhaltet ca. 12.200 km für den regional und überregional gemischten Verkehr. Das Regionalnetz umfasst 14.500 km und kann von allen Zügen befahren werden. Diese Aufteilung zielt vorrangig darauf ab, im vorhandenen Netz sinnvoll zu investieren, wird aber langfristig auch Auswirkungen auf die Disposition haben, weil weniger Belegungskonflikte zwischen schnellen und langsamen Zügen auftreten dürften. Zusätzlich zu dieser Maßnahme existieren bei der Deutschen Bahn Standardprozeduren im Falle auftretender Konflikte: An speziellen Knotenpunkten stehen Ersatzcrews und -züge bereit, die im Notfall Dienste bzw. Fahrten übernehmen können.

Weitaus problematischer für den Verkehrsablauf sind Gleisblockaden durch das Liegenbleiben eines Zugs. In diesem Fall sind zeitnahe Dispositionsentscheidungen dringend erforderlich, um die Auswirkungen der Störung für den Verkehrsfluss und insbesondere für den Kunden gering zu halten. Solche Maßnahmen werden oft bereits vor Eintritt einer tatsächlichen Störung dieser Art geplant. Auch hier gilt es, einsatzbereite und mit Personal besetzte Reisezüge von bestimmten Knotenpunkten aus einzusetzen, um den ausgefallenen Zug zu ersetzen. Normalerweise fährt der neue Zug dann ab dem Folgebahnhof des ausgefallenen Zugs weiter. Daneben sind zusätzliche Dispositionsentscheidungen zu treffen, welche die Weiterbeförderung der sich im Zug befindenden Passagiere und das Räumen der Strecke für den nachfolgenden Verkehr beinhalten. Dafür liegen in den regionalen Betriebszentralen Ausweichpläne im Wortsinn „in der Schublade“. Auf diesen Plänen ist bspw. verzeichnet, welche lokale Busgesellschaft bei einer Streckensperrung ggf. anzurufen ist.

#### II.4.4.3 Unterstützung des Kunden bei der Planung und Durchführung von Reisen

Aus den bereits in Kapitel I eingeführten Kundenbindungsinstrumenten der Bahn sind für diese Arbeit die Informationsinstrumente von größter Relevanz.

Reisende verlangen in erster Linie einfache und genaue Informationen über Fahrpläne, Fahrplanänderungen, Verfügbarkeit von Sitzplätzen, Preise, Anschlüsse und Übergänge zu anderen Verkehrsträgern. Der Kunde eines Verkehrsunternehmens möchte jederzeit, d. h. *vor* und *während* seiner Reise informiert sein. Demzufolge erlangen kundenorientierte, dynamische Informationssysteme eine immer größere Bedeutung für die Attraktivität des Schienenverkehrs.

Relativ zum Zeitpunkt der Konsumption des Produkts „Bahnreise“ lassen sich dabei hauptsächlich drei Informationsarten unterscheiden:

1. *Pre-Trip-Information:* Vor der Fahrt können Reisende z. B. die elektronische Fahrplanauskunft und zahlreiche andere Services des EVU nutzen. Ein Kundenzugang kann über Touch-Screen-Systeme vor Ort, über das Internet auf dem heimischen PC oder über Mobilfunk durch das Handy erfolgen. In diesen zeitlichen Bereich fällt auch der Ticketerwerb, d. h. der Ankauf des Produkts.

Die Reiseplanung einschließlich des Ticketerwerbs sollte selbstverständlich so bequem wie möglich ablaufen. Die traditionelle und wohl persönlichste Anlaufstelle für den Fahrgast sind dabei nach wie vor die Reisezentren der Bahn, d. h. Schalterstellen mit individueller Beratung. Auch und gerade für ältere Menschen bieten die Planung und der Fahrkartenerwerb in Reisebüros eine weitere Alternative. Der innovativste Weg zur Reiseplanung ist wohl das internetbasierte Buchungssystem. Hier kann je nach individuellen Wünschen die Verbindung ausgesucht und eine Fahrkarte zum Ausdrucken erworben werden, neuerdings sogar mit Lastschriftverfahren.<sup>94</sup>

Nach der Planung der Reise ist der Informationsbedarf des Kunden jedoch keineswegs gedeckt. Er benötigt vielmehr oftmals *On-Trip-Informationen*, um seine Reise erfolgreich und vor allem zufrieden absolvieren zu können. Die Information während der Reise kann zum einen nach der Aktualisierbarkeit in statische und dynamische Information und zum anderen nach der Zielgruppe in spezifisch oder personalisiert oder unspezifisch, d. h. nicht personalisiert, kategorisiert werden. Dabei existieren für jeden sich ergebenden Typus schon jetzt unterstützende Informationsquellen (vgl. Tabelle 5):

2. *Statische On-Trip-Information:* Während der Fahrt können individualisierte Reisepläne, Aushangfahrpläne, Streckeninformationen in Zügen und Umgebungspläne an Bahnhöfen zur Information über den Sollzustand genutzt werden. Änderungen des geplanten Betriebsablaufes können natürlich auf diese Weise nicht erfasst werden, obschon der Kunde gerade dann möglichst umfassend informiert werden sollte.
3. *Dynamische On-Trip-Information:* Zusätzlich können aktualisierte Fahrplaninformationen über Lautsprecherdurchsagen und Anzeigeelemente in Bahnhöfen (Zugzielanzeiger, Informationstafeln, Info-Monitore, Displays, Touch-Screen-Systeme) und Zügen verbreitet werden. Diese berücksichtigen eventuelle Verspätungen und nennen ggf. auch Anschlusszüge. Weiterhin ist das Internetangebot der Reiseauskunft auch per WAP erreichbar. Neuerdings hat die Deutsche Bahn eine Verspätungshotline eingerichtet, bei der die Kunden vom Festnetz (!) aus kostenlos anrufen und sich über die Weiterreise informieren können. Eine *kostenlose* individualisierte Information ist bisher während der Reise demnach quasi nur durch den Zugbegleiter zu bekommen. Dieser kann jedoch naturgemäß nicht jeden Informationsbedarf decken: Selbst wenn er Zugriff auf die notwendige Datenbasis hat, könnte er keinesfalls in

---

<sup>94</sup> Damit ist prinzipiell sogar schon die Buchungsinfrastruktur vorhanden, die für ein System zur Reisendens-teuerung notwendig wäre; vgl. Kapitel V.

der notwendig kurzen Reaktionszeit alle Informationen adäquat weitergeben, zumindest nicht in vollbesetzten Zügen im Falle größerer Störungen im Netz.

Tabelle 5: Klassifizierung von On-Trip-Passagierinformationen

	nicht personalisiert	personalisiert
<b>statisch</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aushangfahrpläne</li> <li>• Wagenstandsanzeigen</li> <li>• Auslagen im Zug, Service Point oder Reisezentrum</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• „Ihr Fahrplan“-Verbindungsausdruck</li> </ul>
<b>Dynamisch</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fahrplantaafeln</li> <li>• Gleisanzeigen</li> <li>• Durchsagen und im Zug und Bahnhof</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schaffner/Kundeninformation</li> <li>• Telefon-Hotline</li> <li>• SMS-Dienste mit Re-Routing-Vorschlägen</li> </ul>

Bei beiden Informationskanälen bleibt also der Kunde in der Verantwortung; er muss aktiv nachfragen, wenn er informiert sein will.

Wünschenswert aus Sicht der Kunden und technisch möglich wäre also die Bereitstellung von aktuellen Informationen mittels seines mobilen Endgeräts, sobald sich eine relevante Änderung des geplanten Reiseverlaufs ergibt. Informationen zu kritischen Anschlusszügen, nach Ankunftszeiten am Zielort oder sogar alternative Routenvorschläge könnten bspw. ohne weiteres per SMS unterbreitet werden.

Ein in diese Richtung gehendes Beispiel stellt das Modellprojekt PIEPSER (Personalisierte Informationen exklusiv für Pendler des öffentlichen Verkehrs) dar. „Ziel des Projektes ist die Entwicklung und der Betrieb eines Informationsdienstes, der den ÖPNV-Fahrgast nur dann auf eine Verspätung oder Störung aufmerksam macht, wenn diese das pünktliche Erreichen einer Anschlussverbindung im fahrplangebundenen Regional- oder Fernverkehr gefährdet oder verhindert. [...] Zusätzlich zur Störungsmeldung sollen den betroffenen Fahrgästen noch multimodale Handlungsalternativen aufgezeigt werden, die unter den gegebenen Randbedingungen trotzdem noch das pünktliche Erreichen der Anschlussverbindung ermöglichen.“ ([Hoyer 2001], S. 2f.). Der Informationsdienst, der modellhaft im Großraum Magdeburg erprobt wird, wird Pendlern als Mehrwertdienst angeboten.

Ein ähnliches System zur Passagierinformation wurde bereits in den Jahren 2000 und 2001 am Decision Support & Operations Research Lab der Universität Paderborn in Zusammenarbeit mit der DB Systems, damals noch TLC AG entwickelt (vgl. Kapitel V). Hier wird es den Kunden ermöglicht, sich vor der Fahrt über Internet für eine Route „einzubuchen“. Falls bei einem oder mehreren Zügen im geplanten Reiseverlauf Störungen auftreten, wird der Kunde automatisch per SMS über erreichte bzw. verpasste Anschlüsse sowie über alternative Möglichkeiten zur Weiterreise informiert.

Theoretisch können zusätzlich *After-Trip-Informationen* unterschieden werden, die jedoch nicht allein durch die Disposition abgedeckt werden können und daher nicht weiter betrachtet werden sollen.

#### II.4.4.4 Grundsätze, Ziele und Regelungen der Disposition der Deutschen Bahn heute

Um verschiedene Dispositionsstrategien miteinander vergleichen zu können, ist zu klären, was genau das Ziel der Disposition ist, also die Frage zu beantworten, wie gut eine Dispositionsentscheidung ist. Der bisherige Prozess liefert dazu nur sehr wenige Anhaltspunkte. Die allgemeine Zielsetzung des jetzigen Dispositionsprozesses ist zwar in den Betriebsvorschriften der Deutschen Bahn festgehalten, aber doch sehr unspezifisch formuliert. Martin fasst in [Martin 1998], S. 313, Hervorhebungen hinzugefügt) zusammen:

„Die konkreten Ziele der Disposition sind in den diesbezüglichen Unterlagen der Eisenbahnunternehmen nur sehr ungenau umrissen und recht allgemein formuliert. In der Betriebsvorschrift DS420 [...] der Deutschen Bahn AG werden vier wesentliche Ziele der Disposition benannt:

Das *Bemühen um Pünktlichkeit* wird als das Hauptziel bezeichnet. Bei schwierigen Betriebsverhältnissen sollen jedoch *Maßnahmen zur Flüssighaltung von Strecken und Bahnhöfen* in den Vordergrund treten. Es wird weder erläutert, was genau ‚schwierige Betriebsverhältnisse‘ sind, noch welche Maßnahmen im Einzelnen wann angewendet werden sollen. Die *Aufwandsminimierung* und die *kurzfristige Anpassung des Verkehrsangebotes an die Nachfrage* sind weitere wesentliche Dispositionsziele.“<sup>95</sup>

Diese mangelnde Präzision der formulierten Ziele lässt dem Disponenten großen Entscheidungsspielraum. Zudem stehen die Ziele miteinander in Konflikt; es wird jedoch keine Angabe gemacht, wie die unterschiedlichen Ziele gegeneinander abgewogen werden können.

Konkreter formuliert die Richtlinie R420 (Betriebszentralen der Deutschen Bahn AG, [DB Netz 2002], Modul 0105). Dort werden folgende *Vorrangregelungen* festgeschrieben:

- „ a) Dringliche Hilfszüge haben Vorrang vor allen anderen Zügen.
- b) S-Bahnzüge auf S-Bahngleisen haben Vorrang vor allen anderen Zügen.
- c) In den übrigen Fällen haben die schnelleren Züge Vorrang vor den langsameren.
- d) Vom Grundsatz nach c) darf abgewichen werden:
  - Geringfügig, wenn dies der flüssigen Betriebsabwicklung insgesamt dienlich ist. Dabei ist den durchfahrenden Zügen vor den haltenden und den einfahrenden vor den ausfahrenden Zügen Vorrang zu gewähren.
  - Zur Sicherstellung von Anschlüssen im Reiseverkehr, wenn der schneller fahrende Zug nicht mehr als 5 Minuten (absolut) verspätet wird.“

---

<sup>95</sup> Martin nennt als Quelle der Richtlinie DS420 den unter [DB 1993] wiedergegebenen Beleg.

Diese Regelungen sind zwar genauer, versagen jedoch bei den hier vorrangig betrachteten Konfliktarten. Jacobs formuliert noch schärfer: „Insgesamt ist festzustellen, dass diese Handlungsanweisungen nur für spezielle Ausnahmefälle eine konkrete Aussage treffen; für die überwiegende Anzahl von Konflikten helfen sie dem Disponenten jedoch nicht weiter.“ ([Jacobs 2003], S. 28)

Während die Vorrangregelungen für alle möglichen Konflikte und deren Lösung durch dispositive Maßnahmen gelten, existieren in der Richtlinie R 420 für Anschlusskonflikte sog. *Wartezeitregelungen*, deren Einsatz von Disponenten der DB AG verifiziert wurden<sup>96</sup>.

In diesen Regeln wird vorgegeben, wie lange ein Zug einer bestimmten Zuggattung maximal auf einen Zug einer anderen Gattung warten darf, um den Anschluss sicherzustellen. Normalerweise warten niederrangige Züge bis zum Ablauf einer bestimmten Zeitspanne quasi selbsttätig auf höherrangige Züge. Ist der Zubringer nach Ablauf dieser Frist noch nicht erschienen, tritt ein durch einen menschlichen Disponenten zu regelnder Konflikt auf. Die Zeiten, die ein Zug warten soll, werden *Regelwartezeiten*, die Regeln, nach denen er zu warten hat, *Wartezeitregeln* genannt. Letztere umfassen auch die oben vorgestellten Mindestübergangszeiten von Reisenden, die als die Zeiten, die Reisende für den Umsteigevorgang mindestens benötigen, definiert sind. Die aktuellen Regelwartezeiten in Minuten sind in Tabelle 6 beschrieben.

Für einen Bahnhof kann es lokale Abweichungen von diesem Schema für bestimmte Züge geben, da in einigen Stationen die Gleisstränge viel weiter auseinander liegen, oder z. B. aus Erfahrung bekannt ist, dass aus bestimmten Zügen viele Passagiere in einen wartenden Abbringer umsteigen werden. Diese lokalen Abweichungen seien als  $müz_j^*$  bezeichnet. Dann lassen sich die globalen Wartezeitregeln wie folgt definieren:

Es gebe einen Zubringer  $i$  und einen diesem zugeordneten Abbringer  $j$  an einem gemeinsamen Treffpunkt-Bahnhof. Die Gattungen der beiden Züge seien  $g_i$  respektive  $g_j$ . Es seien weiter  $t_i$  die geplante Ankunft von  $i$  und  $t_j$  die geplante Abfahrt von  $j$ ,  $s_i$  bzw.  $s_j$  die jeweilige (ggf. prognostizierte) Verspätung und  $rwz_{g_i, g_j}^*$  das Element der Matrix  $RWZ$  in Zeile  $g_i$  und Spalte  $g_j$  der Matrix der Regelwartezeiten (Diese Matrix entspricht der Tabelle 6 ohne die Zeilen- und Spaltenbeschriftungen) unter Berücksichtigung lokaler Abweichungen („\*“). Dann gilt das folgende Regelwerk:

- 1) Ist  $t_i + s_i + müz_k^* \leq t_j + s_j$ , tue nichts.
- 2) Ist  $t_i + s_i + müz_k^* \leq t_j + rwz_{g_i, g_j}^*$ , dann muss  $rwz_{g_i, g_j}^*$  gewartet werden.
- 3) Ist  $t_i + s_i + müz_k^* > t_j + rwz_{g_i, g_j}^*$ , dann entsteht ein *Konflikt*, der durch einen Disponenten manuell zu behandeln ist.

---

<sup>96</sup> Während der Erstellung der Arbeit wurde die *tatsächliche* Anwendung von Mitarbeitern der Deutschen Bahn bisweilen angezweifelt. Trotzdem werden sie aufgrund der Existenz der entsprechenden Richtlinie für diese Arbeit als verbindlich angenommen.

Dabei ist zu beachten, dass ein großer Teil von Verspätungen bereits durch Regel 2) abgefangen wird, um die Arbeit für die Disponenten einzuschränken. Dieses Vorgehen ist demnach vergleichbar mit der Kategorisierung von Störungen in Abschnitt II.4.1.1.

Die Wartezeitregelungen gelten nicht, wenn innerhalb von 30 Minuten ein „annähernd gleichwertiger Anschluss“ ([Jacobs 2003], S. 29) existiert – ohne genaue Spezifikation der Bedeutung von „annähernd gleichwertig“.

Für Anschlusskonflikte von Reisenden gilt die Regelung, dass der Zugführer im verspäteten Zug bei der Fahrkartenkontrolle die Anschlusskonflikte aufnehmen und an die Betriebsleitstelle melden soll. Liegen dem Disponenten keine derartigen Meldungen vor, so geht er davon aus, dass keine Anschlusskonflikte vorliegen.

Tabelle 6: Regelwartezeiten der Deutschen Bahn AG, in Anlehnung an [Jacobs 2003], S. 29

	auf	ICE/EC/IC/IR Thalys,CIS, IRE/D	ICN, D	SB	übrige Züge
<b>Es warten</b>					
<b>ICE/EC/IC/IR Thalys,CIS, IRE/D</b>		5	--	--	--
<b>ICN, D</b>		10	10 bzw. 30 bei Kurswagen- übergang	--	5
<b>SB</b>		--	--	--	--
<b>übrige Züge</b>		5	5	--	5
Einige D-Züge werden wie IR behandelt.					

Alles in allem lässt sich feststellen, dass zwar eine Reihe grober Regelungen existiert, an denen sich Disponenten zu orientieren haben. Trotzdem existiert kein einheitlicher Bewertungsmaßstab für die Dispositionsgüte, der im Rahmen dieser Arbeit zur Anwendung kommen kann. Daher wird im Kapitel 4 eine sich an der Passagierwartezeit orientierte Bewertung gewählt.

#### II.4.4.5 Praxisbeispiel: Disposition bei einer Regionalbahngesellschaft

Grundsätzlich unterscheidet sich die Disposition einer Regionalbahngesellschaft von der des Fernverkehrs: Der Fernverkehr hat die Möglichkeit, „Brennpunkte“ weiträumig zu umfahren<sup>97</sup>, da die Haltepunkte großräumig auseinander liegen. Regionalbahnen haben dagegen ein engeres Netz von Haltepunkten, die alle bedient werden müssen. Prinzipiell sind jedoch die Vorgehensweisen von Fern- und Regionalbahn vergleichbar. Am Beispiel der Regio AG Nord in Hannover werden nachfolgend einige der aktuell eingesetzten Lösungsverfahren be-

<sup>97</sup> Dies ist nur möglich, falls eine geeignete, entsprechend ausgebaute Ersatzstrecke existiert.

schrieben. Die Ausführungen stützen sich auf vor Ort geführte Gespräche mit den dort beschäftigten Disponenten.

Die Regio AG Nord ist im nördlichen Bundesgebiet für ca. 2.000 Fahrten pro Tag sowie für den S-Bahn Betrieb im Großraum Hannover verantwortlich. Ihre Zentrale, neben diversen Niederlassungen, ist im Bahnzentrum der Netz AG in Hannover integriert. Die Regio AG Nord ist in erster Linie für die Einhaltung der Fahrpläne der Regionalbahnen zuständig. Ist dies nicht möglich, müssen auch hier die Fahrgäste über Verspätungen informiert und im schlimmsten Fall umgeleitet werden. Jede Abweichung ist mit der Netz AG abzustimmen; sei es die Verzögerung eines Zugs am Bahnhof, weil dieser den entsprechenden Streckenabschnitt länger als geplant blockiert, oder auch die außerplanmäßige Belegung eines Streckenabschnitts durch Zugverspätungen oder Einsetzen eines Sonderzugs. Oberstes Prinzip der Disposition bei der Regio AG Nord ist nach eigener Aussage die Zufriedenheit des Kunden.

Für eine erfolgreiche Disposition benötigt selbstverständlich auch die Regio AG Nord Daten über die aktuelle Gleisbelegung und den Zustand der Züge. Diese Daten haben unterschiedlichen Ursprung: Zum einem meldet das eigene Zug- und Bahnhofspersonal periodisch den aktuellen Stand und außerplanmäßige Vorkommnisse. Diese werden manuell in ein eigenes System eingespeist, auf welches die gesamte Regio AG Nord Zugriff hat. Von der Netz AG werden den Fahrdienstleitern durch ein separates System zusätzlich die RIS-Daten zur Verfügung gestellt.

Störungen sind nicht vorhersehbar und treten – wenn auch oft nur in unbedeutenden Größenordnungen – recht häufig auf. Theoretisch müsste, nach Aussage eines Disponenten, bei jeder Störungsmeldung neu disponiert werden, was aus Effizienzgründen und aufgrund der aufwändigen Abstimmung mit der Netz AG – und bisweilen auch mit der Reise & Touristik – jedoch abgelehnt wird und auch nicht sinnvoll durchgeführt werden könne. In der Praxis bedienen sich die Disponenten demnach gezwungenermaßen eines FIFO-Algorithmus (vgl. II.4.2.), ggf. ist – an ruhigen Tagen – aber auch ein GREEDY-Vorgehen möglich, weil keine offline-optimierenden Verfahren zur Neuplanung eingesetzt werden.

Stattdessen existiert ein mehrstufiges Regelwerk, welches kleinere Unregelmäßigkeiten abfängt und in „ausreichender Güte“ disponiert.<sup>98</sup> Bei Verspätungen eines Zubringers wird versucht, die Abbringer noch zu erreichen. Dabei kommt ein Zeitfenster von einer halben Stunde zur Anwendung, innerhalb der darüber zu entscheiden ist, ob ein Abbringer wartet oder abfährt. Sobald abzusehen ist, dass auch eine sehr große Verspätung des Abbringers aufgrund der Schwere der Störung nicht hilfreich sein würde, wird diese Spanne natürlich nicht ausgeschöpft. Bei Tagesrandfahrten wird dieses Fenster jedoch aufgrund der verminderten Taktung vergrößert. Für größere Verspätungen oder Störungen existieren Notfallpläne. In diesen wird versucht, ein möglichst großes Spektrum an Störungen abzudecken, um so schnell wie möglich auf diese reagieren zu können. Die Pläne bestehen aus drei Abschnitten:

---

<sup>98</sup> Es konnte nicht abschließend geklärt werden, ob es sich dabei *tatsächlich* um die oben beschriebenen Wartezeitregeln handelt. In der Tat erscheint das beschriebene Vorgehen zumindest sehr ähnlich.

Im ersten Abschnitt wird die Art der Störung beschrieben, z. B. eine Vollsperrung eines Streckenabschnittes. Der zweite Abschnitt enthält die zu treffenden Maßnahmen. Im Fall der Vollsperrung sind dies beispielsweise die Einrichtung eines Ersatzverkehrs mit örtlichen Busunternehmen sowie die Benachrichtigung der Passagiere und der betroffenen internen Stellen, also z. B. fahrenden Zügen oder dem Personal auf den Bahnhöfen. Zu diesem Zweck listet der letzte Abschnitt Kontaktadressen mit Ansprechpartnern auf, damit diese sofort zur Verfügung stehen.

Zusätzlich zu den vom eigenen Personal oder von der Netz AG gemeldeten Störungen findet noch eine eigene Zugüberwachung an speziellen Terminalplätzen statt, wie sie exemplarisch in Abbildung 16 gezeigt wird. Dort können Konflikte frühzeitig erkannt werden. Geschieht dies, wird zunächst versucht, den Konflikt *innerhalb der Regio AG Nord* mit der einfachen Wartezeitregelung oder den Notfallplänen zu lösen. In letzter Konsequenz lastet auch hier die Entscheidung über zu treffende Maßnahmen auf dem bearbeitenden Disponenten und seiner Erfahrung.



Abbildung 16: Arbeitsterminal eines Zugdisponenten bei der Regio AG Nord

Ist innerhalb der Regio AG Nord eine Entscheidung gefallen, muss diese mit der Netz AG validiert werden, da nur die Netz AG die vollständige Belegung der Gleise kennt. Konfligiert die Lösung mit der Disposition der Netz AG, weil z. B. ein benötigter Gleisabschnitt bereits anderweitig belegt ist, muss anders disponiert oder der entsprechende Abschnitt „freigekauft“ werden. Dieses Vorgehen ist bei allen Fahrdienstleitern anzutreffen. Sie kaufen Gleisabschnitte für bestimmte Zeitintervalle von der Netz AG. Kann diese ihren Verpflichtungen nicht nachkommen und Abschnitte nicht zur Verfügung stellen, muss die Netz AG eine Konventionalstrafe an das entsprechende EVU zahlen. Resultiert der Konflikt aus einer unplanmäßigen Benutzung des Gleisabschnitts durch ein anderes Unternehmen, gilt das Verursacherprinzip, und die Strafe wird an diesen weitergegeben.

## II.5 Fazit – Anforderungen an die kundenorientierte Disposition

Der Zielsetzung des ersten Teils der vorliegenden Arbeit folgend wurden in Kapitel II vor allem Aufbau- und Ablauforganisation der Disposition sowie des Umfelds, in welches die Disposition eingebettet ist, untersucht. Die Sicherstellung eines reibungsarmen Produktionsablaufs in einem Unternehmen wie der Deutschen Bahn AG zeigt sich dabei als eine vielschichtige Aufgabe, welche schon im Vorfeld schwierige Optimierungsprobleme beinhaltet und zudem diversen technologischen und organisatorischen Rahmenbedingungen genügen muss; ganz abgesehen von diversen Sicherheitsanforderungen während der Durchführung.

Es wurde ebenfalls gezeigt, dass die bisherige Unterstützung des Kunden während einer Reise lückenhaft ist, sodass die Qualität des eigentlichen Produkts der Bahn darunter leidet. Obwohl in der Literatur diverse Ansätze existieren, welche den Kunden durchaus berücksichtigen – sogar in der Disposition, gibt es keinen standardisierten Prozess, welcher den Kunden die durchaus vorhandene Information über den aktuellen Netzstatus in geeigneter Weise – nämlich individualisiert – mitteilt.

Da demnach alle bahnseitigen Voraussetzungen für ein System zur kundenorientierten Disposition erfüllt sind, können nun Anforderungen an und Restriktionen für ein solches System formuliert werden. Diese können unterteilt werden in Anforderungen an ein bahnseitiges Entscheidungsunterstützungssystem für Disponenten sowie Anforderungen an ein Informations- und Kommunikationssystem zur Kommunikation und Interaktion mit dem Kunden. Beide Komponenten müssen selbstverständlich innerhalb einer übergeordneten Architektur integriert werden.

Ebenfalls können Anforderungen an den gesamten Prozess der Disposition formuliert werden. Da es jedoch illusorisch erscheint, den realen Dispositionsprozess komplett zu reorganisieren, soll in der in Kapitel III folgenden konzeptuellen Modellierung immer darauf geachtet werden, den Istzustand eher sinnvoll zu ergänzen als ein vollständiges Re-Engineering durchzuführen.

### II.5.1 Schwachstellen und Potenziale im derzeitigen Dispositionsprozess

#### II.5.1.1 Schwachstellen

Letztlich lassen sich die für die kundenorientierte Disposition relevanten Schwachstellen des jetzigen Dispositionsprozesses auf einen kurzen Nenner bringen: Zum einen werden nicht alle benötigten Informationen erfasst, obwohl dies möglich und aus verschiedenen Gründen auch sinnvoll für die Bahn wäre. Zum anderen werden nicht alle zur Verfügung stehenden Daten in einer Art zugänglich gemacht, dass dem Kunden größtmöglicher Nutzen entsteht:

*Informationslücken:* Die größte Schwäche der jetzigen Disposition aus Kundensicht ist die mangelhafte Berücksichtigung und Verfügbarkeit von Passagierinformation, vornehmlich der Reiseabsicht, geäußert als Routenplan durch das Anschlussnetzwerk der Bahn. Deswegen muss z. B. Anschlusssicherung nach wie vor telefonisch bei der Betriebszentrale beantragt werden. Wären der Disposition Passagier Routen explizit bekannt, könnten diese automatisiert

berücksichtigt und Umsteigerzahlen sogar im Vorhinein berechnet werden. Eine gute Entscheidungsunterstützung in diesem Sinne wäre für einen Disponenten schon, wenn er Umsteigerzahlen und Gefährungsgrad eines Anschlusses angezeigt bekäme. Zudem könnten für von verpassten Anschlüssen betroffene Passagiere Alternativrouten auf dem dynamischen Fahrplan bestimmt werden.

*Mangelnde Informationsdistribution:* Die sehr wohl zur Verfügung stehenden Informationen werden nur nach dem Push-Prinzip unpersonalisiert über verschiedene Standardinformationskanäle verteilt. Vor der Reise fällt dieser Nachteil nicht ins Gewicht, weil ein Reisender genügend Zeit und komfortable Unterstützung, z. B. per Browser am heimischen PC, bei der Suche der für ihn relevanten Information hat. Während der Reise hat er diese Zeit nicht, weil es darum geht, u. U. sehr zeitnah auf Ereignisse zu reagieren. Zudem stehen ihm dann nur begrenzte Zugriffsmöglichkeiten zur Verfügung, z. B. an jedem Bahnhof nur Informationen über die (prognostizierten) Ereignisse genau dieses Bahnhofs. Bei der Suche nach Alternativrouten wird ihm dies kaum helfen. In diesem Fall kann momentan jedoch niemand eine valide Aussage für die weiteren Reisemöglichkeiten treffen, obwohl große Teile der Netzlage bekannt sind.

### II.5.1.2 Potenziale

Das größte Potenzial zur Hebung von Kundenzufriedenheit und zur Verbesserung der Dispositionsqualität liegt genau in dem eben beschriebenen Mangel. Mittels geschickter Nutzung bereits vorhandener Daten könnte dies nämlich ohne größeren organisatorischen und technischen Aufwand<sup>99</sup> geschehen.

Zudem können die bereits erfassten Daten der Netzlage mit den zu erfassenden Informationen über Passagiere weitaus wertvoller gemacht werden, weil nicht nur eine bessere Planungsgrundlage für die Disposition selbst, sondern zusätzlich eine weitaus bessere Grundlage für die der Disposition vorgelagerten Phasen der Produktionsplanung<sup>100</sup> vorliegt.

Aus diesem Grund ist es nicht nur zur Steigerung der Kundenzufriedenheit durch Addition eines monetär schwer zu bewertenden Kundennutzens sinnvoll, ein System zur kundenorientierten Disposition zu entwickeln, es sorgt zwangsläufig auch mittelfristig für bessere und stabilere Fahrpläne sowie langfristig sogar für eine präzisere Investitionsplanung und damit letztlich für eine qualitativ bessere Allokation von Steuergeldern.<sup>101</sup>

Die Behebung der Schwachstellen sowie die Hebung der genannten Potenziale müssen demnach Primärziel der konzeptuellen Modellierung in Kapitel III sein. Zusätzlich dazu ergeben sich aus den vorangegangenen Abschnitten die nachfolgend beschriebenen Anforderungen und Rahmenbedingungen.

---

<sup>99</sup> Im Schlusskapitel wird ein denkbares Vorgehen dafür aufgezeigt.

<sup>100</sup> Also Nachfrageprognose, Angebotsdefinition, Netzplanung, Linienplanung, Fahrplanung und Ressourcenplanung.

<sup>101</sup> Im Weiteren werden die Betrachtungen jedoch auf die reine Disposition beschränkt.

## II.5.2 Allgemeine Anforderungen an die kundenorientierte Disposition

Zunächst unterscheiden sich die Anforderungen an die kundenorientierte Disposition nicht von denen an die konventionelle Disposition. Die wichtigste Voraussetzung ist die Gewährleistung der *Sicherheit* des durch die Maßnahmen beeinflussten Fahrbetriebs. Die resultierenden Dispositionsfahrpläne müssen den gleichen Ansprüchen genügen, die auch in der Fahrplankonstruktion gelten. Dies umfasst unter anderem die Einhaltung der Sperrzeiten für die einzelnen Züge sowie eine Analyse des Dispositionsfahrplans bzgl. weiterer, *induzierter* Konflikte, die gerade durch die Änderung des (Soll-) Fahrplans entstehen.

Problematisch ist hierbei vor allem der zeitliche Aspekt: Spielt in der Fahrplankonstruktion die benötigte (Rechen-)Zeit eine eher untergeordnete Rolle, werden dispositive Maßnahmen dagegen unter Zeitdruck gefällt. Strategien zur Disposition müssen, auch im Hinblick auf die prinzipbedingte Suboptimalität aufgrund der Natur eines Online-Optimierungsproblems, eher in kurzer Zeit gute als in langer Zeit optimale Ergebnisse liefern. Deswegen werden in dieser Arbeit viele Heuristiken auf ihre Tauglichkeit hin untersucht.

Weiterhin spielt die *Umlaufplanung* der Züge und des eingesetzten Personals eine Rolle bei der Disposition. Häufig wird innerhalb relativ kurzer Zeit nach dem Ende eines Zuglaufes das Zugmaterial für eine neue Zugfahrt benötigt. Dies sollte in jedem Falle beachtet werden, um zu vermeiden, dass Züge bereits in ihrem Startbahnhof Verspätung haben. Diese praktische Anforderung wird in dieser Arbeit nicht explizit umgesetzt, was jedoch keine Einschränkung der Anwendbarkeit des vorgestellten Systems darstellt, weil zum einen ein weiterer Zuglauf auch als Erweiterung des Fahrplans dargestellt werden kann und zum anderen ohnehin keine anderen Ressourcen als Züge betrachtet werden.

Über diese grundlegenden Anforderungen hinaus gibt es jedoch immer noch einen erheblichen Entscheidungsspielraum für die zu treffenden dispositiven Maßnahmen. Im Sinne der Kundenorientierung sollte dieser Spielraum derart ausgenutzt werden, dass die Reisedauer der Fahrgäste möglichst gering gehalten wird. Verpasste Anschlüsse und daraus resultierende Fahrtzeitverlängerungen sowie große Wartezeiten an Bahnhöfen haben negative Auswirkungen auf die Kundenzufriedenheit. Oberstes Ziel sollte es daher sein, die Reisedauer der Kunden zu senken. Ein problematisches Moment bei diesem Ansatz ist selbstverständlich, dass dazu genaue Informationen über die Reiseverläufe der Kunden bzw. die Besetzung der Züge notwendig sind. Dabei sollten für jeden Kunden jedoch nicht nur der ursprüngliche Reiseplan, sondern auch mögliche alternative Züge berücksichtigt werden. Ein einfacher Ansatz für eine Zielfunktion dieses Problems wäre dabei, die Summen der Verspätungen aller Kunden zu minimieren.

Denkbar wäre jedoch auch eine etwas differenziertere Zielsetzung: Ausgehend von der Annahme, dass Verspätungen von geschäftlich Reisenden und Berufspendlern größere Nutzeneinbußen hervorrufen als im Freizeitverkehr, sollte man diesen Kundengruppen ein größeres Gewicht zuordnen als Gelegenheitsreisenden. Weiterhin ist davon auszugehen, dass die Frustrationsrate jeder zusätzlichen Warteminute mit wachsender Verspätung überproportional

steigt. Auch dieser Aspekt kann mit Hilfe einer entsprechenden Gewichtung in die Zielfunktion des Entscheidungsproblems aufgenommen werden.<sup>102</sup>

### II.5.2.1 Anforderungen an ein Softwaresystem zur kundenorientierten Disposition

Das System muss offensichtlich zwei Einsatzmodi unterstützen: Zum einen muss es *Entscheidungsunterstützung für Disponenten* im laufenden Betrieb bieten, indem es Pläne für die kundenorientierte Disposition berechnet und dem Disponenten zur Entscheidung vorlegt, zum anderen muss eine *automatisierte Disposition* unterstützt werden: Für Testläufe in einer Simulationsumgebung muss das System die Qualität dispositiver Maßnahmen bewerten sowie die besten Strategien auswählen und durchführen können.

Die zu entwickelnde Systemarchitektur sollte darüberhinaus folgende Eigenschaften aufweisen:

- *Skalierbarkeit*: Das System soll leicht auf Netzausschnitte verschiedener Größe angepasst werden können – u. U. auch auf Fahrpläne verschiedener Bahngesellschaften.
- *Echtzeitfähigkeit*: Das System sollte in deterministischer Laufzeit Antworten generieren können. Für den Disponenten ist dies essentiell bei der Entscheidung über dispositive Maßnahmen, für den Reisenden ist dies aus physikalischen Gründen nicht immer zu gewährleisten (z. B. wegen Funkloch). In jedem Fall müssen Antworten zeitnah erfolgen.
- *Flexibilität/Modularität/Erweiterbarkeit*: Zusätzliche Funktionalitäten müssen sowohl auf Disponentenseite (z. B. neue Strategie) als auch auf Kundenseite (neuer Service, bspw. Wegbeschreibung zum Hotel etc.) einfach zu integrieren sein.
- *Belastbarkeit*: Das System muss mehrere Millionen Passagiere und etwa 30.000 Züge derart handhaben können, dass eine (evtl. definiert eingeschränkte) Funktionstüchtigkeit auch bei komplizierten Berechnungen gegeben ist. Es muss demnach immer ein durchführbarer Plan geliefert bzw. die Antwort ausgegeben werden, dass kein solcher bestimmt werden konnte.
- *Sicherheit*: Kommunikationsabläufe und Transaktionen müssen abgesichert erfolgen.
- *Realisierbarkeit*: Das System muss ohne unrealistische Annahmen, bspw. Umstellung von Organisationsstrukturen und -abläufen, in die Systemlandschaft der Bahn integrierbar sein. Zudem sollte ein wirtschaftlicher Betrieb eines solchen Systems möglich sein. In diesen Kontext fällt auch der nächste Punkt:
- *Preiswertigkeit*: Das System muss kostengünstig zu implementieren sein.

---

<sup>102</sup> Vgl. Abschnitt IV.2 für mögliche Zielkriterien kundenorientierter Disposition.

- *Verteiltheit/Funktionsfähigkeit in verteilten Umgebungen*: Berechnungen zur Interaktion erfolgen zum Teil auf mobilen Prozessoren.

### II.5.2.2 Anforderungen an ein kundenorientiertes Dispositionssystem, Disponentenseite

Der „bahnseitige“ Bestandteil der kundenorientierten Simulation (vgl. Kapitel IV), nämlich das konkrete Entscheidungsunterstützungssystem für die Disponenten sowie die darin implementierten Dispositionsstrategien, sollte einigen Anforderungen genügen, die nachfolgend aufgezählt werden:

1. Das System muss einem Disponenten in übersichtlicher Weise alle von ihm benötigten Informationen bereitstellen.
2. Das System muss in Echtzeit verschiedene Dispositionsstrategien und entsprechende Empfehlungen für eine konkrete Konfliktsituation berechnen.
3. Es müssen beliebige Dispositionsstrategien integriert werden können.
4. Die Qualität von Dispositionsstrategien sollte erlernbar sein.

Zudem muss, wie bereits erwähnt, die Disposition automatisiert ablaufen können, um einen simulativen Gütetest verschiedener Dispositionsstrategien durchführen zu können. Die Dispositionsstrategien, die dazu verwendet werden, sollten folgende Eigenschaften aufweisen:

- *Vergleichbarkeit*: Die Ergebnisse verschiedener Dispositionsstrategien müssen vergleichbar (bewertbar) sein; es muss somit ein Bewertungsmaßstab für Dispositionsstrategien definiert werden. Dieser ist Grundlage für die nächste Eigenschaft:
- *Konfidenz*: Ebenfalls ist ein Maßstab für die Güte einer Dispositionsstrategie zu bestimmen, welcher den Erfolg einer solchen in der Vergangenheit kennzeichnet und der somit das System lernfähig macht.
- *Echtzeitfähigkeit*: Analog zu der gleichlautenden Anforderung an das System müssen einige Dispositionsstrategien deterministische Laufzeiten aufweisen, damit in jedem Fall ein Ergebnis zu bestimmen ist.

### II.5.2.3 Anforderungen an ein kundenorientiertes Dispositionssystem, Kundenseite

Die Abwicklung der Kommunikation mit Reisenden im Bahnnetz erfordert im Prinzip nur wenige grundsätzliche Regelungen:

- *Relevanz*: Ein Reisender darf Dispositionsinformation nur dann erhalten, wenn sie für ihn von tatsächlicher Bedeutung sind. Es ist demnach ein entsprechender Filtermechanismus zu realisieren, der eine Störung erst dann an einen Passagier weiterleitet, wenn eine gewisse Wahrscheinlichkeit besteht, dass sich sein Reiseplan ändert. Eng damit zusammen hängt die

- *Individualisierung*: Selbstverständlich müssen die Informationen, die ein Passagier bekommt, direkt auf ihn zugeschnitten sein. Dies gilt umso mehr, wenn er sie auf sein Mobiltelefon geschickt bekommt.
- *Echtzeitfähigkeit*: Nachrichten müssen schnellstmöglich versendet werden, wenn eine relevante Störung entdeckt wurde. In der Praxis ist dies ein Engpass des Systems: Wenn ein Zug spontan nicht erreichbar (Tunnel, Funkloch etc.) ist, wird der Empfang von Meldungen ebenfalls gestört. Dann muss das Senden solange wiederholt werden, bis der Kunde erreicht wurde oder die Zeitspanne der Gültigkeit der Meldung überschritten wurde.
- *Einfache Interaktion*: Sofern überhaupt eine Interaktion erfolgen kann – de facto genügend Zeit vorhanden ist – muss sie für alle Kunden in erster Linie einfach gestaltet sein. Via SMS ergeben sich daher bspw. nur sehr eingeschränkte Möglichkeiten. So könnte z. B. die Beantwortung der Frage nach dem Wahrnehmen einer Alternativverbindung nur mit „Ja“ oder „Nein“ beantwortet werden müssen, falls der Kunde entsprechendes vorhat. Will er die neue Verbindung nutzen, könnte auf diese Weise eine weitere Betreuung ermöglicht werden.
- *Verfügbarkeit*: Informationen müssen vorzugsweise auf Kundenendgeräten mit einfachem Zugriff (Mobiltelefone, PDAs) angezeigt werden.

### II.5.3 Systemabgrenzung

Das zu konzipierende System soll in der Modellierung *nicht* die gesamte Dispositionsaufbau- und -ablauforganisation des bisherigen Dispositionsprozesses der Bahn modellieren, es soll diese jedoch abbilden können und in sich erweiterbar sein. Es sei explizit darauf hingewiesen, dass menschliche Disponenten nicht ersetzt, sondern sinnvoll unterstützt werden sollen, um die wichtige Aufgabe, Züge im Sinne der Reisenden zu steuern, erfüllen zu können. Trotzdem muss die Disposition auch automatisiert ablaufen, um das Geschehen im Bahnnetz simulieren zu können, was wiederum essentiell für den Test des Dispositionssystems ist.

Nachfolgend wird zudem *nur der Personenverkehr* betrachtet. Ein eigentlich die gleichen Ressourcen nutzender Güterverkehr wird insofern nicht als Problem gesehen, als dass dieser zum größten Teil zu den Zeiten abgewickelt werden kann – und abgewickelt wird – in denen das Netz nicht so stark durch den Personenverkehr belegt ist. Die Erweiterung des Konzepts um die Betrachtung von Güterzügen ist andererseits unproblematisch.

Ebenso wird Sicherheitsaspekten und tatsächlicher Streckenbelegung eine nur untergeordnete Bedeutung beigemessen, als dass das Netz der Deutschen Bahn AG einer Betreibergesellschaft (DB Netz AG) unterliegt, die gleichsam als Black Box angesehen werden kann: Wenn es keine physikalische Route gibt oder diese nicht sicher ist, wird ein Zug warten *müssen*, selbst wenn ein „kundenorientierter“ Disponent bereits eine Abfahrt angeordnet hat. Eine derart induzierte Störung wird demnach als *exogen* induziert betrachtet. Oder anders gesagt: Das physikalische Netz wird zwar simuliert, Sicherheitsüberprüfungen werden aber nicht explizit durchgeführt.

In der prototypischen Implementierung werden schließlich einige der oben genannten Anforderungen ausgeblendet, sofern sie nicht direkt zur Untermauerung des vorgestellten Konzepts dienen. Ein Beispiel dafür ist die Kommunikationssicherheit.

### III Konzeptuelles Rahmenwerk für die computergestützte kundenorientierte Disposition

*Mens agitat molem.*

Vergil, Aeneis, 6, 727

Der Analyse der für die kundenorientierte Disposition wichtigsten Themenbereiche folgt nun die Synthese, d. h. die konzeptuelle Modellierung eines Informations- und Kommunikationssystems, welches die abgeleiteten Anforderungen erfüllen kann.

Im Anschluss wird das erste Hauptergebnis dieser Arbeit vorgestellt, die Systemarchitektur. Auf der Basis intelligenter Softwareagenten, deren Theorie in Abschnitt III.1.1 exkursiv erläutert wird, wird ein dezentrales, flexibles, modulares und skalierbares System zur (teil-) autonomen, verteilten kundenorientierten Disposition beschrieben. Die wichtigsten logischen Komponenten des Systems werden in den darauf folgenden Abschnitten erläutert: Dabei steht bahnseitig vor allem der Disponent<sup>103</sup>, der letztlich eine Abstraktion der in Kapitel II beschriebenen Dispositionsorganisation eines Bahnunternehmens darstellt, im Mittelpunkt, zum anderen diesen unterstützende Bestandteile. In der Hauptsache handelt es sich dabei um das Modul zum Re-Scheduling von Passagieren, dem „Passagierrouter“. Ebenfalls wird erläutert, auf welche Weise verschiedene Strategien zur Disposition in das Dispositionssystem integriert werden können, wobei die eigentlichen Dispositionsmethoden erst im Kapitel IV vorgestellt werden. Die hier vorgestellte Architektur findet ihren Ursprung in [Suhl/Mellouli 1999] und wurde [Suhl et al. 2001a] zum ersten Mal ausführlich vorgestellt und seitdem kontinuierlich erweitert. Zu den damals eingesetzten Dispositionsstrategien vgl. auch [Suhl et al. 2001b].

Das Kapitel schließt mit der Spezifikation des zum Test des Dispositionssystems notwendigen Simulationsumfelds, welches in diversen Projekten am Lehrstuhl DS & OR Lab der Universität Paderborn entwickelt wurde. Dieses System beruht zum großen Teil auf konzeptionellen Überlegungen aus dieser Arbeit und kann deshalb als weiteres, wichtiges Ergebnis angesehen werden.

#### III.1 Softwarearchitektur auf Basis intelligenter Agenten

Das Bahnsystem besteht aus einer Reihe *autonom handelnder, mobiler* Akteure, die *proaktiv* auf ein bestimmtes, gewünschtes Ziel zusteuern. Sie *reagieren* auf *wahrgenommene Reize* in ihrer Umwelt und *interagieren* bzw. kommunizieren mit dieser, indem sie Kontakt mit anderen Akteuren aufnehmen.

---

<sup>103</sup> In den folgenden Abschnitten ist „der Disponent“ die Bezeichnung für den Systembestandteil, der die Aufgaben realer, menschlicher Disponenten übernimmt und gleichzeitig im Sinne eines Expertensystems die Systemschnittstelle zu einem menschlichen Disponenten darstellt.

Vor einigen Jahren verbreitete sich in der Softwareentwicklung das neue Modellierungsparadigma der *intelligenten Softwareagenten*. Diese vereinen Ansätze aus mehreren Forschungsdisziplinen, von der Linguistik über die Sozialwissenschaften bis hin zur Informatik. Agenten wurden genau die oben genannten Eigenschaften und Fähigkeiten zugeschrieben, sodass sie als Modellierungsansatz für diese Arbeit besonders geeignet erscheinen, vgl. dazu auch [Biederbick/Suhl 2004], oder [Suhl/Biederbick 2002]. Daher werden nachfolgend zunächst die wichtigsten Begriffe im Zusammenhang mit intelligenten Softwareagenten erläutert, bevor die im System agierenden Komponenten – nachfolgend des Öfteren entsprechend als Agenten bezeichnet – und deren Interaktionen der Reihe nach beschrieben werden.

### III.1.1 Grundlagen intelligenter Softwareagenten

Die Verwendung agentenorientierter Ansätze zur Disposition liegt bereits aufgrund der Strukturierung der Disposition in der Praxis nahe und ist auch demzufolge keine ganz neue Idee, vgl. Abschnitt II.4.3, dennoch umfasst die Theorie agentenbasierter Systeme diverse weitere Konzepte, die in diese Arbeit Einzug genommen haben.

Nachfolgend wird daher ein kurzer Überblick über die wichtigsten theoretischen Ergebnisse der Forschung um intelligente Softwareagenten gegeben. Ziel ist es, die für diese Arbeit besonders relevanten Erkenntnisse herauszuarbeiten.

#### III.1.1.1 Ursprung der Agententechnologie

Nach Nwana (vgl. [Nwana 1996]) haben sich Softwareagenten aus dem Bereich der *Multiagentensysteme* (multi-agent systems) heraus entwickelt. Multiagentensysteme bilden einen der drei wichtigsten Gebiete im Forschungsfeld der *verteilten künstlichen Intelligenz* (distributed artificial intelligence)<sup>104</sup>. Softwareagenten erben dabei viele Konzepte aus diesem Bereich, z. B. Modularität, Geschwindigkeit durch Parallelität und Zuverlässigkeit durch Redundanz. Zusätzlich wird eine bessere Wartbarkeit bzw. Pflegemöglichkeit, Wiederverwendbarkeit und Plattformunabhängigkeit unterstellt<sup>105</sup>.

Nwana unterteilt die Agentenforschung in zwei verschiedene Stränge, die sich zeitlich parallel nebeneinander entwickelten. Die erste begann ungefähr 1977 und beschäftigte sich hauptsächlich mit beratenden Agenten. Deren Aufgabe war es, mittels Techniken der *symbolischen künstlichen Intelligenz*<sup>106</sup> für den Menschen klare und verständliche Schlussfolgerungen zu ziehen. Die Hauptthemen dieser Zeitperiode waren Interaktion von und Kommunikation zwischen Agenten, Verteilung von Aufgaben, Koordination und Kooperation von Agenten etc. mit dem Ziel, Systeme mit mehrfach zusammenarbeitenden Agenten zu spezifizieren, zu

---

<sup>104</sup> Bei den anderen handelt es sich um das *verteilte Problemlösen* (distributed problem solving) und die *parallele künstliche Intelligenz* (parallel artificial intelligence).

<sup>105</sup> Ob dies in der Praxis immer gelingt, ist nach Meinung des Autors fraglich.

<sup>106</sup> Die symbolische künstliche Intelligenz geht von der These aus, dass sich relevante Fakten und Abhängigkeiten der realen Welt in eine symbolische Ebene abbilden lassen. Mittels Methoden der mathematischen Logik sei es möglich, in dieser symbolischen Ebene neue Fakten und Abhängigkeiten zu erschließen.

analysieren, zu entwickeln und zu integrieren. Weiterhin beschäftigten sich Forscher wie Wooldridge und Jennings mit der Theorie, der Architektur und der Sprache von Agenten (vgl. [Wooldridge/Jennings 1995a], vgl. auch [Wooldridge/Jennings 1995b], vgl. weiter [Woo et al. 96]).

Die zweite Forschungsrichtung begann in etwa Anfang der neunziger Jahre. In dieser untersuchten Wooldridge, Jennings und auch Nwana die verschiedenen Agententypen, um sie klassifizieren zu können. Dies erschien notwendig, weil die Anzahl beobachtbarer Agenten stetig gestiegen war und die Agenten eine immer größere Bedeutung in den unterschiedlichsten Gebieten bekamen. In der Informatik wurde bspw. die agentenorientierte Programmierung als Erweiterung der Objektorientierung (vgl. [Petrie 1996]) thematisiert, Agenten wurden als intelligente Hilfssysteme in Anwendungssoftware eingesetzt<sup>107</sup> oder sollten die Arbeit und Informationsflut reduzieren helfen (vgl. [Maes 1994]).

### III.1.1.2 Definition

Die Definition des Agentenbegriffs in der Literatur ist nicht einheitlich. Prinzipiell wird dabei das allgemeine Verständnis, „jeder im Auftrag oder Interesse eines anderen Tätige“ [Meyer 1987] sei ein Agent, höchstens um bestimmte Eigenschaften erweitert. Nwana folgt diesem Verständnis, indem er einen Softwareagenten lediglich als ein Stück Programmcode, welches eine Aufgabe für jemanden zu erfüllen hat, in dem die Vorgaben genau eingehalten werden sollen (vgl. [Nwana 1996]), definiert. Danach wäre allerdings fast jede Software ein Agent.

Maes fordert in ihrer Definition weitreichender, dass Agenten *Bestandteile komplexer, dynamischer Systeme* sind, innerhalb derer sie *selbständig*, d. h. ohne Zutun des Menschen (inter-) agieren. Sie besitzen die Kontrolle über ihren eigenen Zustand, in dem sie sich bspw. selbständig starten und beenden können, um zielgerichtet einen bestimmten Zweck zu verfolgen: „Autonomous agents are computational systems that inhabit some complex dynamic environment, sense and act autonomously in this environment, and by doing so realize a set of goals or tasks for which they are designed“ ([Maes 1995], S. 108).

Dabei wird allgemein Kommunikation als wichtiges Hilfsmittel zur Zielerfüllung genannt; je nach Art des Agenten findet diese zwischen Menschen und Agenten statt oder zwischen Agenten untereinander. Dabei ist die Kommunikation mit Menschen aufgrund der reichhaltigen Semantik und der daher schwierigen Interpretation menschlicher Sprache kein leicht zu lösendes Problem, dem gemeinhin durch vereinfachende Formalismen begegnet wird, denen sich der Mensch zu unterwerfen hat. Die Kommunikation zwischen Agenten kann mittels

---

<sup>107</sup> Dazu zählen z. B. die Assistenten in Microsoft Windows oder Office, welche Standardabläufe vereinfachen und dem Benutzer adressatengerechte Kontexthilfen anbieten sollen. Anhand der Fähigkeiten des Microsoft Office-Assistenten kann nach Meinung des Autors sehr gut abgelesen werden, dass diese Aufgabe beileibe nicht trivial ist. Zudem ist zu beobachten, dass viele Benutzer eine „Bevormundung“ seitens des Computers als unangenehm empfinden; Akzeptanzprobleme sind damit in vielen Anwendungen buchstäblich vorprogrammiert.

Agentensprachen stattfinden, die innerhalb einer festgelegten Syntax eine eingeschränkte, meist eine dem Problem angepasste Semantik transportieren.

Die bisher genannten Eigenschaften entsprechen in etwa den wichtigsten von Woolridge und Jennings in [Wooldrige/Jennings 1995b], S. 4ff. genannten Anforderungen an intelligente Softwareagenten. Agenten zeichnen sich demnach aus durch

- *Autonomie* („*autonomy*“): Agenten bearbeiten selbständig ihre Aufgaben ohne Beeinflussung durch den Benutzer oder andere Systeme. Sie kontrollieren in gewisser Weise ihren eigenen Zustand und können Aktionen selbst planen.
- *Sozialfähigkeit* („*social ability*“): Mit Hilfe einer Agentensprache („agent communication language“) können Agenten mit anderen Agenten oder auch mit dem Benutzer kommunizieren.
- *Reaktivität* („*reactivity*“): Agenten nehmen Veränderungen in ihrer Umwelt wahr und reagieren entsprechend auf diese. Die Umwelt kann aus physischer Umwelt<sup>108</sup>, menschlichen Benutzern, anderen Agenten, dem Internet oder Kombinationen daraus bestehen.
- *Proaktivität* oder *Selbständigkeit* („*proactiveness*“): Agenten reagieren nicht ausschließlich auf äußere Reize, sondern können von sich aus aktiv werden, um ihre vorgegebenen Ziele zu erreichen.
- *Mobilität* („*mobility*“): Mobilität bezeichnet die Fähigkeit, innerhalb eines Netzwerkes von einem Host zu einem anderen zu migrieren. Im Gegensatz dazu sind *statische* oder *lokale* Agenten nur auf einem Rechner tätig.
- Weitere Eigenschaften, die im Kontext dieser Arbeit jedoch zweitrangig sind, sind *Wahrhaftigkeit* („*veracity*“) – ein Agent gibt nicht absichtlich falsche Informationen weiter –, *Gutmütigkeit* („*benevolence*“) – ein Agent verfolgt konfliktlose Ziele und ist entschlossen, die ihm zugeteilten Aufgaben zu erfüllen – sowie *rationales Verhalten* („*rationality*“). Der Agent unternimmt wissentlich keinen Schritt, der die Erreichung seines Ziels verhindert.

Eine besondere Eigenschaft von Agenten ist die *Intelligenz*, wobei jedoch, wie auch in der künstlichen Intelligenz – keine klare Abgrenzung existiert, wann ein Agent intelligent zu nennen ist und wann nicht. Verschiedene Autoren definieren Intelligenz und entwickeln dann Systeme, die nach ihrer Definition intelligent sind, die aber an anderen Definitionen sofort scheitern. Für diese Arbeit wird der Begriff daher mit einem anderen Klassifikationsmerkmal von Agenten, der

- *Deliberation*<sup>109</sup> synonymisiert. Deliberierende Agenten besitzen ein internes Modell ihrer Umgebung und sind so in der Lage, Entscheidungen für Planungen oder Verhandlungen mit anderen Agenten daraus abzuleiten. Sie begründen eines von zwei

<sup>108</sup> Z. B. bei einem Agenten zur Temperatursteuerung in einem Gebäude.

<sup>109</sup> Deliberation (lat. *deliberare*): Überlegung, Beratschlagung.

Agentenarchitekturextremen, die im nächsten Abschnitt erläutert werden.

### III.1.1.3 Kategorien von Softwareagenten

Mit den genannten Eigenschaften wurde eine Vielzahl möglicher Klassifikationen von Softwareagenten unternommen. Zusätzlich lassen sich aus der Literatur vereinfachend zwei extreme Architekturkategorien extrahieren: komplexe, *deliberative* Softwareagenten und einfache, *reaktive* Softwareagenten (vgl. [Mueller 1993], S. 12; vgl. auch [Sundermeyer 1993], S. 25 f.).

Der *deliberative* Softwareagent verfügt über mentale Zustände wie Wissen, Absichten und Ziele<sup>110</sup>. Als Wissensbasis steht ihm dabei ein Modell der Realität zur Verfügung. Die zur Lösung einer Aufgabe zu treffenden Entscheidungen werden auf Grundlage dieses Modells unter Verwendung von Methoden der künstlichen Intelligenz, wie Suche oder Logik, getroffen. Dadurch sollen sie für komplexe Aufgaben einen optimalen Plan berechnen (vgl. [Becker 2002], S. 52), was extrem aufwändig sein kann, insbesondere, wenn ein Modell exponentiell viele Zustände hat. Vertreter dieser Architektur sind Halpern und Moses (vgl. [Halpern/Moses 1990], S. 549-587) oder Shoham (vgl. [Shoham 1993], S. 51-92).

Reaktive Softwareagenten verfolgen im Gegensatz dazu den Ansatz, dass ohnehin nicht jeder Systemzustand a priori ableitbar ist, und verfügen deswegen über kein Modell der Realität. Stattdessen handeln sie nach einfachen Regeln, die einer wahrgenommenen Umweltkonstellation unmittelbar mittels eines Reiz/Antwort-Schemas eine Aktion folgen lassen. Reaktive Softwareagenten sind in diesem Sinne „weniger intelligent“ und können komplexe Problemstellungen nicht allein lösen. Ihre Wirksamkeit entfalten sie erst in einem *Multiagentensystem* (vgl. unten), in dem mehrere solcher Softwareagenten zusammenarbeiten, um gemeinsame Ziele zu verfolgen (vgl. [Becker 2002], S. 52). Dabei entsteht aus den einfachen Verhaltensregeln des einzelnen, gleichsam dem Zusammenwirken in einem Bienenstock, ein komplexes Systemverhalten, welches den meisten Zustandsänderungen der Umwelt gerecht werden soll. Beispielsweise besteht ein Roboteragent aus den Modulen Sensorik, Motorsteuerung und Berechnungen, wobei die Kommunikation unter den Modulen kurz und einfach gestaltet ist. Auch die Kommunikation unter den Agenten findet auf eine unkomplizierte Art und Weise statt.

Reaktive Agenten finden Anwendung in der Simulation künstlicher Welten, insbesondere in Computerspielen, in denen sich der Benutzer gegen einen oder mehrere sich entwickelnde Spielpartner behaupten muss. Ein weiteres Anwendungsbeispiel reaktiver Architekturen ist der Roboterfußball. Weiterführende Betrachtungen zu dieser Architekturkategorie finden sich u. a. in [Brooks 1991], S. 139-152, [Suchman 1987]) und [Kaebling 1990].

Beide Architekturextreme weisen spezifische Vor- und Nachteile auf, sodass letztlich schwer über den „besseren“ Ansatz zu entscheiden ist. Zwar klingt es sehr viel einfacher, eine reaktive Architektur zu verwirklichen, in der Praxis – bspw. beim Betrachten eines Roboter-

---

<sup>110</sup>Die hier aufgeführten mentalen Zustände entsprechen der für *deliberative* Softwareagenten oft verwendeten BDI-Architektur (BDI = Belief, Desire, Intention, vgl. [Rao/Georgeff 1995], S. 312ff.).

fußballspiels – zeigt sich aber, dass solche Architekturen schnell an ihre Grenzen stoßen, und dass Entwickler eben doch alle Spielsituationen antizipieren müssen, um sie mittels „einfacher“ Regeln adäquat beantworten zu können. Sie schaffen damit sozusagen ein externes Modell – welches u. U. nicht viel einfacher sein dürfte als das interne des deliberierenden Äquivalents.

Nach Meinung des Autors liegt die Wahrheit in der Mitte: Agenten dürfen natürlich nicht überfrachtet werden mit Aufgaben, und aus Gründen der Effizienz, Übersichtlichkeit, Modularität, Flexibilität und Skalierbarkeit sollten spezielle Aufgaben durch spezialisierte Aufgabenträger übernommen werden. Daher wird in dieser Arbeit ein pragmatischer Ansatz verfolgt, aus dem ein Multiagentensystem resultiert. Näheres zur Modellierungsprinzipien findet sich in der Einleitung zu Abschnitt III.1.2.

Nwana klassifiziert neben der Architektur nach den Eigenschaften: *Mobil/Statisch* und *Autonom/Lernfähig/Kooperativ*, wobei die Kombination der letzten drei Eigenschaften sowie eine Klassifizierung anhand der Aufgabe des Agenten zu insgesamt sieben Agententypen führt – unter der Annahme, dass diese die wichtigsten Eigenschaften abdecken<sup>111</sup>:

- Zusammenarbeitende Agenten – Multiagentensysteme<sup>112</sup> (kooperative, autonome Agenten)
- Interface-Agenten (autonome, lernfähige Agenten)
- Mobile Agenten
- Informationsagenten
- Reaktive Agenten
- Clevere Agenten (autonome, lernfähige, kooperative Agenten)
- Hybride Agenten

Dabei ist das Lernen eine Grundeigenschaft von Agenten, die im günstigsten Fall allen Agenten im zu entwerfenden System zueigen sein sollte. Ein lernender Agent soll selbständig in der Lage sein, Aufgaben zu analysieren und Aktionen auszuführen. Der Lernprozess von Agenten hat zwei Ziele: Erstens sollte ein Agent seine *Umgebung kennen lernen*, um in der Zukunft schneller und sicherer zu entscheiden. Weiterhin sollte der Agent *durch die Interaktionen* mit anderen Agenten *lernen*, indem er sich das Wissen und Erlernte anderer Agenten aneignet und so seine Lernleistung steigert. Er ist dabei in der Lage, sein Wissen entweder direkt und unverändert mit anderen Agenten zu teilen, oder es wird ein Kontrollagent eingerichtet, der das Wissen der Agenten in einem System entgegennimmt und weiterverteilt. Dieser Kontrollagent kann das Wissen ggf. vorher selektieren und nötigenfalls verändern. Als weitere Alternative kann auch eine zentrale Ablage eingerichtet werden, auf die jeder Agent

---

<sup>111</sup> Dabei bezweifelt Nwana die Existenz eines Agenten, der zusammenarbeitend und lernfähig, aber nicht autonom ist, sodass dieser Typ von ihm nicht in die Klassifizierung mit aufgenommen wurde.

<sup>112</sup> Im Original „Zusammenarbeitende Agenten“, deren Definition und Eigenschaften aber weitgehend mit der von Multiagentensystemen übereinstimmt.

bei Bedarf zugreifen und nach einer Lösung suchen kann. Der prinzipielle Aufbau lernender Agenten findet sich bspw. in [Russel/Norvig 1995].

Nachfolgend werden die für diese Arbeit wichtigen Archetypen nach Nwana etwas näher beleuchtet.

### III.1.1.3.1 Multiagentensysteme

Nwana subsumiert autonom handelnde, kooperative Agenten unter dem Begriff zusammenarbeitende Agenten. Andere Eigenschaften, wie Lern- und Verhandlungsfähigkeit, kommen, je nach Aufgabenstellung in mehr oder weniger stark ausgeprägter Form, hinzu. In der Literatur wird dieser Typus auch als Multiagentensystem bezeichnet, da naturgemäß ein einzelner kooperierender Agent keinen Sinn macht.

Die ersten Ansätze der Multiagententechnologie kamen mit der Erkenntnis, dass die Lösung komplexer Probleme besser in kleinere Teilaufgaben unterteilt werden sollte, als die Gesamtlösung zentral zu berechnen, in den achtziger Jahren des letzten Jahrhunderts auf.

Ein Multiagentensystem (MAS) ist, wie der Name andeutet, ein System interagierender Agenten. Ominici und Ossowski beschreiben MAS wie folgt (s. [Omicini/Ossowski 2003], S. 179):

„Multiagent systems [...] are software systems made up of multiple encapsulated computational entities, which are embedded in an environment and (inter-)act in an autonomous and intelligent fashion.”

Klügl hebt hervor, dass beim Übergang vom Einagentensystem zum Mehragentensystem mehr als nur die Eigenschaften der einzelnen Agenten zählen (vgl. [Klügl 2001], S. 17). Durch eine Zusammenführung mehrerer autonomer Agenten ergeben sich ihrer Meinung nach auch neue Eigenschaften. Jennings, Sycara und Wooldridge teilen diese Ansicht, sie nennen die folgenden vier Eigenschaften von Multiagentensystemen (vgl. [Jennings et al. 1998]):

- Jeder Agent besitzt nur unvollständige Informationen oder beschränkte Problemlösungsfähigkeiten. Daraus folgt eine beschränkte Sicht des einzelnen Agenten auf das Gesamtsystem.
- Damit ist eine dezentrale Datenhaltung verbunden: Jeder Agent verwaltet seine Daten lokal.
- Nicht nur Daten werden lokal gespeichert, auch die Berechnungen, die jeder Agent ausführt, sollten im Idealfall asynchron geschehen. Damit wird die Behandlung von Nebenläufigkeit als Eigenschaft wichtig, das heißt, die Berechnungen und die Ausführung der Aktionen verschiedener Agenten geschehen parallel, was bei der Konstruktion eines MAS zu beachten ist.
- Im Idealfall verfügen Multiagentensysteme über keine zentrale Kontrolle. Das ist eine direkte Folge aus dem notwendigen Maß an Kontrollautonomie für die einzelnen Agenten.

Diese Forderungen sind jedoch nicht immer vollständig realisierbar. So muss bspw. ein zentrales Zeitmanagement in einem Gesamtsystem bereits als eine einfache Form zentral ausgeübter Kontrolle angesehen werden. Es existieren jedoch viele Anwendungsbereiche, in denen ein Verzicht auf eine global einheitliche Instanz undenkbar ist, bspw. zur Vermeidung von Dateninkonsistenzen wie im Reisendeninformationssystem der Bahn.

MAS divergieren in Bezug auf die Anzahl und die Granularität der verwendeten Agenten stark. Das Spektrum reicht von Systemen mit einer geringen Anzahl hoch komplexer Agenten bis hin zu Anwendungen mit Hunderttausenden von Agenten mit vergleichsweise trivialen Verhaltensmustern. Jennings beschreibt beispielsweise ein System, in dem sieben ARCHON-Agenten ein gesamtes Elektrizitätsnetz steuern. In einem anderen von ihm beschriebenen System kontrollieren zwei kooperierende Expertensysteme einen Teilchenbeschleuniger (vgl. [Jennings 1994]). Auf der anderen Seite werden insbesondere bei Simulationsanwendungen Systeme verwendet, in denen eine Großzahl sehr einfacher Agenten eingesetzt wird. Hogeweg bezeichnet dieses Vorgehen als Voraussetzung für eine erfolgreiche Modellierung sozioinformatischer Prozesse (vgl. [Hogeweg/Hesper 1985]).

Das Konzept der Verteilung eines Problems auf verschiedene Teilaufgaben greift bspw., wenn ein Bedarf an stark differenzierten Problemlösungsfähigkeiten, wie sie bei einem einzelnen Akteur i. d. R. nicht vorhanden sind, besteht. Auch die räumliche Verteilung von Wissen, die eine zentrale Problemlösung erschwert, oder die Flexibilität und schnelle Reaktionszeit sprechen für ein derart modular aufgebautes System: Lokal lösbare Aufgaben müssen nicht aufwändig propagiert werden. Hinzu kommen Synergieeffekte zwischen Agenten, welche ggf. die Lösung von Problemen ermöglichen, die ein einzelner Agent nicht bearbeiten kann. Ein grundsätzlicher Vorteil von MAS ist, dass sie inhärent parallel arbeiten, sodass komplexere Aufgaben schneller lösbar werden.

Nwana nennt zusätzlich einige weitere Vorteile von Multiagentensystemen (vgl. [Nwana 1996]):

- Vereinfachte Integration von Systemen oder Einrichtungen
- Komplexitätsreduktion durch Modularisierung
- Zuverlässigkeit durch Redundanz
- Wiederverwendbarkeit

Multiagentensysteme lassen sich in *kooperierende* und *kompetitive* Systeme unterscheiden. In kooperierenden Systemen kommunizieren Softwareagenten miteinander, wobei ein Agent auch mehrere andere koordinieren und für sich arbeiten lassen kann, um ein gemeinsames Ziel zu erreichen. Ein Praxisbeispiel für zusammenarbeitende Agenten ist die Steuerung von Klimaanlageanlagen, welches im Xerox Palo Alto Research Center (Xerox PARC) entwickelt wurde (vgl. [Siegle 1997]). In kompetitiven Systemen hingegen verfolgt jeder Softwareagent zur eigenen Gewinnmaximierung individuelle Ziele (vgl. [Baumgärtel 1999], S. 32).

### III.1.1.3.2 Interface-Agenten

Nach Maes [Maes 1994] sollte durch den Einsatz von Interface-Agenten eine neue Art von Benutzungsschnittstelle entstehen. Nicht mehr durch direkte Manipulation, sondern durch Delegation und Kooperation sollte das Verhältnis zwischen Mensch und Maschine bestimmt werden. Dazu stellt Maes zwei Kernprobleme von Interface Agenten heraus: Erstens ist zu klären, wie viel *Kompetenz* der Agent zum Erlangen der benötigten Informationen bekommen muss, um dem Benutzer helfen zu können. Zweitens benötigt der Agent das *Vertrauen* des Benutzers, falls der Agent für ihn Aufgaben ausführen oder Ratschläge erteilen soll. Die Lösung besteht laut Maes in einer selbständig lernenden Architektur, bei der die Interface Agenten neben der direkten Beobachtung in der Lage sind, direkt vom Benutzer aufgetragene Aufgaben auszuführen und gegebenenfalls andere Agenten um Rat zu fragen, wenn sie in einer bestimmten Situation Hilfe benötigen. Sie lernen durch das positive bzw. negative Feedback des Benutzers auf die vorgeschlagenen Vereinfachungen oder durch explizite Steuerung durch den Anwender, sodass der Agent sukzessive die notwendige Kompetenz erlangt (vgl. Abbildung 17).

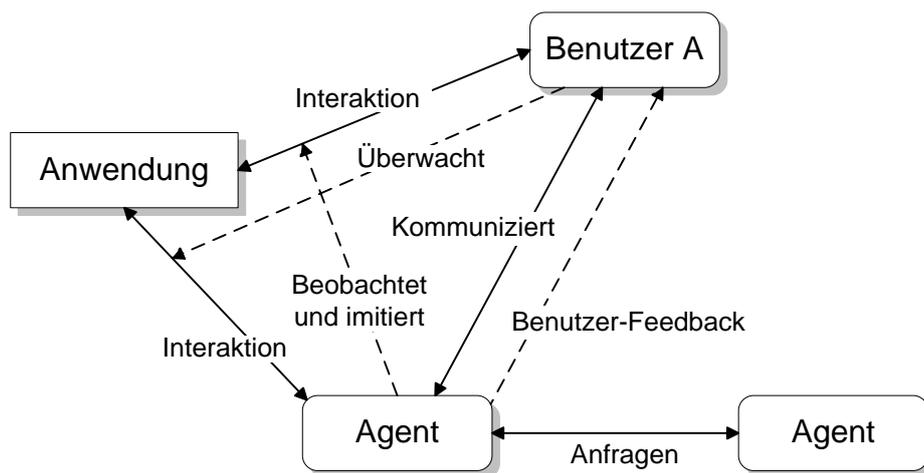


Abbildung 17: Arbeitsweise von Interface Agenten nach ([Maes 1994], S. 33)

Vertrauen gegenüber dem Benutzer bekommt er hingegen nur, indem er dem Benutzer langsam immer mehr Aufgaben auf eine transparente Art und Weise abnimmt. Der Benutzer ist somit in der Lage, genau zu verfolgen, was der Agent macht; zusätzlich kann er Erklärungen von ihm verlangen und ihm verbieten, in der Zukunft bestimmte Tätigkeiten auszuführen.

In der Theorie wurden Interface Agenten diverse Vorteile zugesprochen; sie sollten dem Benutzer Arbeit und Zeit per Übernahme von Routineaufgaben ersparen und diese Fähigkeiten aufgrund des Lernmechanismus nach und nach ausbauen. Durch Kommunikation mit anderen Agenten können Benutzerprofile miteinander verglichen und damit Wissen und Kompetenz erweitert werden.

In der Praxis hat dieser Typus die hohen Erwartungen kaum erfüllt: Beispiele solcher Ansätze finden sich in den automatisch angepassten Menüs von Microsoft Office oder auch in

den Office-Assistenten, die das Verhalten von Benutzern beobachten und gelegentlich mehr oder weniger erwünschte Tipps geben. Eine durchaus verbreitete Anwendung sind personalisierte Spam-Filter zur Erkennung unerwünschter E-Mails.

Alle diese Assistenten agieren bislang nicht sehr intelligent, sodass noch sehr viel Entwicklungsarbeit zu leisten ist. Tatsächlich ist nach Meinung des Autors sogar eine gewisse Stagnation zu verzeichnen; es scheint allgemein weniger aufwändig zu sein, die Softwarebenutzung zu vereinfachen als durch immer komplexere Hilfesysteme dem Benutzer das notwendige Wissen zu vermitteln.

Trotzdem sind selbstverständliche intelligente und vereinfachende Schnittstellen sowie Systeme, die das (Reise-) Verhalten ihres Benutzers interpretieren, eine Notwendigkeit im Kontext des in dieser Arbeit zu entwickelnden Systems, insbesondere, wenn es darum geht, Schnittstellen zu realen Passagieren und sonstigen Akteuren im System zu entwickeln.

### III.1.1.3.3 Mobile Agenten

Mobile Agenten bewegen sich durch ein Computernetz von einem Rechner – einer sog. *Agentur* – zum nächsten. Dabei kommunizieren sie mit Servern und eventuell mit anderen Agenten und erledigen auf diese Art und Weise ihre Aufgaben für den Benutzer, zu dem sie anschließend zurückkehren.

Mobile Agenten sind autonom, da sie auf dem entfernten Rechner ohne die explizite Unterstützung des Benutzers die vorgegebene Aufgabe erledigen. Weiterhin sind sie kooperativ, obwohl die Kooperation hier nicht dieselbe sein muss, wie die bei den zusammenarbeitenden Agenten. Vielmehr kann sie auf einem Informationsaustausch zwischen den Agenten beruhen, wobei der Agent nur bei Bedarf mit anderen Agenten kommuniziert. Er muss nicht notwendigerweise alle Informationen preisgeben, die er besitzt.

Einige Gründe für den Einsatz mobiler Agenten im Allgemeinen und innerhalb der kundenorientierten Disposition im Besonderen (vgl. [Nwana 1996]) sind:

- *Reduzierung der Kommunikationskosten:* Mobile Agenten verarbeiten Daten im Auftrag des Benutzers auf der Serverseite und bringen anschließend nur die relevanten Daten zurück. Im Bahnbeispiel bedeutet das: Auf einem zentralen Server verhandeln Zugagenten (oder ggf. Passagieragenten) über eventuelle Anschlusssicherung und bringen die Warte- oder Abfahrtscheidung mit. Während der Agent seine Aufgaben erledigt, muss er nicht ständig mit dem eigentlichen Zug und den Passagieren in Verbindung stehen, was bei der unsicheren Kommunikation im Bahnnetz von Vorteil ist.
- *Beschränkte lokale Ressourcen:* Auf Seiten eines Server-Rechners können u. U. größere Ressourcen, z. B. für das Suchen einer lokal optimalen Lösung der anliegenden Entscheidungen vorhanden sein. Die in dieser Arbeit zur Passagierlenkung verwendeten Mobilgeräte sind bspw. (noch) nicht geeignet, umfangreiche notwendige Berechnungen selbst vorzunehmen, wohl aber, die Ergebnisse zu visualisieren.

- *Asynchrones Arbeiten*: Nach Versand der mobilen Agenten können bis zum Eintreffen der Ergebnisse weitere Berechnungen vorgenommen werden. So kann dezentral nach evtl. notwendigen Umleitungen für die beteiligten Passagiere gesucht werden.
- *Flexibler Ansatz für verteilte Systeme*: Neue Agenten können sowohl als Dienstanbieter als auch Nachfrager einfach hinzugefügt werden, ohne das Gesamtsystem zu beeinträchtigen. Es macht demzufolge konzeptionell keinen Unterschied, wie viele Agenten verschiedener Typen tatsächlich im System agieren.

Mobile Agenten sind nach Meinung des Autors daher geradezu prädestiniert zur Abbildung von Passagieren innerhalb des Bahnnetzes, zumal eine weitere angenehme Eigenschaft von Agentensystemen die einfach zu realisierende Lastverteilung ist: Im Falle zu vieler Zugriffe auf Agenten würden sich diese im Netzwerk klonen, indem sie auf andere Computer migrieren, sich dort mit allen notwendigen Parametern und Daten initialisieren, und ihren Dienst anbieten<sup>113</sup>. Umgekehrt können sich Agenten bei zu geringer Auslastung beenden.

Es existieren zwei verschiedene Migrationsarten für Agenten zwischen verschiedenen Rechnern, die *starke* und die *schwache Migration*. Bei starker Migration wird der vollständige Agentenzustand (Daten, Code, Ausführungszustand) zum Zielsystem übertragen. Auf dem Zielsystem wird dann der „alte“ Zustand des Agenten wiederhergestellt und der Prozess weiter ausgeführt. Dies ist zwar leichter zu implementieren, kann aber eine sehr kommunikationsintensive Operation sein. Bei der schwachen Migration werden nur der Datenzustand und eine Startmethode zum Wiedereinstieg übertragen. Diese Art spart demnach Kommunikationsaufwand und wird, obwohl schwieriger zu implementieren, in der Konzeption dieser Arbeit bevorzugt.

Ein Kritikpunkt an der Verwendung mobiler Agenten könnte sein, dass sie gegenüber dem „herkömmlichen“ Client-Server-Prinzip keinen echten Vorteil innerhalb der Dispositionsarchitektur bieten. Nach Meinung des Autors muss es jedoch oberstes Gebot sein, die Anzahl notwendiger Kommunikationsvorgänge zu minimieren, sodass die Gefahr, aufgrund von Störungen im Funkverkehr Zeit zu verlieren, möglichst gering wird. Dieser Vorteil mobiler Agenten wird bei Betrachtung des grundlegenden Unterschieds zwischen dem Client-Server-Prinzip verteilter Anwendungen und dem Agenten-Ansatz offensichtlich (vgl. Abbildung 18).

Ausgeführt werden mobile Agenten generell nur in den Agenturen, also von Rechnern, die die notwendige Infrastruktur dafür besitzen. Eine physische Agentur kann aus mehreren logischen Orten bestehen. Agenturen stellen alle Dienste zur Verfügung, die ein Agent zur Ausführung seiner Aufgaben benötigt. Außerdem koordinieren sie den Ablauf der Agenten und deren Kommunikation untereinander und mit dem zugrunde liegenden System. Eine weitere Funktion der Agentur ist der Schutz des Systems vor unerlaubten Zugriffen der Agenten, der

---

<sup>113</sup> Zu diesem Zweck wird der steuernde Disponent nur darüber informiert, dass ein zusätzlicher Dienst dieser Art angeboten wurde. Der Disponent verteilt dann die Anfragen.

aber in unserem Kontext irrelevant ist, da von Gutmütigkeit und Wahrhaftigkeit der beteiligten Agenten ausgegangen werden kann. Weitergehende Betrachtungen zu Sicherheitsaspekten finden sich z. B. in [Farmer et al. 1996].

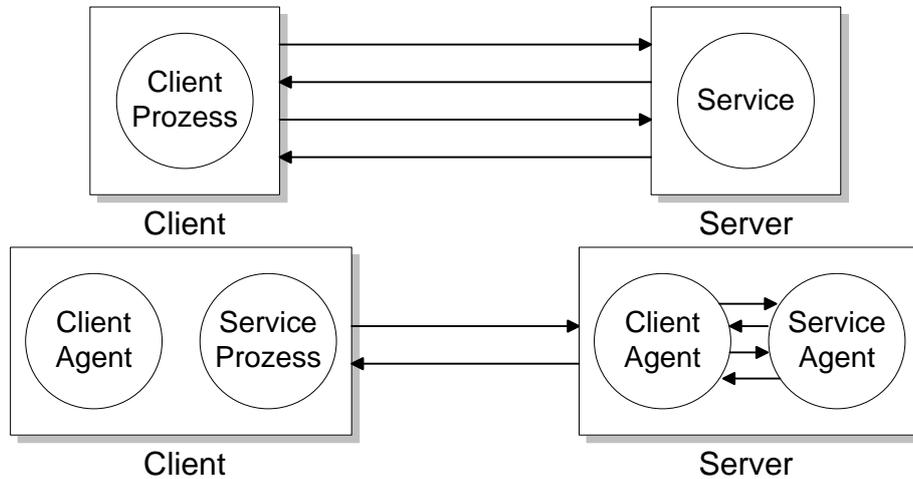


Abbildung 18: Client-Server und Mobile Agenten nach [White 1996]

#### III.1.1.3.4 Informationsagenten

Informationsagenten ähneln in ihrer Architektur sehr den Expertensystemen. An dieser Stelle wird nicht weiter auf sie eingegangen, weil sie hier nur insofern interessant sind, als dass der in Abschnitt III.1.6 vorgestellte Dispositionsagent eine Erweiterung des Informationsagenten bzgl. der Architektur darstellt. Letztere wird ebenda detailliert vorgestellt.

#### III.1.1.3.5 Hybride Agenten

Hybride Agenten schließlich generalisieren mehrere Agententypen. Dabei sollen möglichst die Schwächen der einzelnen Typen minimiert und die Stärken maximiert werden. Ein Vorteil eines hybriden Agenten, der z. B. die Eigenschaften eines zusammenarbeitenden und eines reaktiven Agenten vereint, ist, dass er ein gezieltes Verhaltensmuster besitzt, um seine Aufgaben zu erfüllen (zusammenarbeitender Agent), gleichzeitig aber auch auf neue, ihm nicht bekannte Situationen reagieren kann (reaktiver Agent).

Zusätzliche Agententypen sind *glaubwürdige (believable)* Agenten, die so natürlich wie möglich agieren, und sich somit in möglichst wenigen Eigenschaften vom Verhalten des Menschen unterscheiden sollen. Nützlich ist dies bspw. innerhalb von Pilotentrainings oder sonstigen Simulationen. U. a. Emotionen (vgl. [Bates 1994]) spielen bei den glaubwürdigen Agenten eine sehr wichtige Rolle, da Agenten durch Emotionen Menschen etwas näher gebracht werden können.

### III.1.2 Agentenbasierte Architektur eines Systems für die kundenorientierte Disposition

Nachfolgend werden die einzelnen Agenten des Dispositionssystems auf konzeptueller Ebene vorgestellt; anschließend wird deren Zusammenwirken erörtert. Dabei werden die für

die kundenorientierte Disposition wichtigsten Agenten zuerst betrachtet, die Disponenten und seine Hilfsagenten; Züge und Passagiere werden erst im Anschluss betrachtet da ihre Aufgaben und Fähigkeiten vergleichsweise gering sind.

Mit dem Ziel einer leichteren Übertragbarkeit auf die Praxis wurden bei der Modellierung auf konzeptueller Ebene einige Grundsätze beachtet, die nachfolgend skizziert werden. Innerhalb der in dieser Arbeit vorgestellten Umsetzung des Systems musste aus Performanzgründen teilweise anders vorgegangen werden; so sind z. B. Passagiere im System keine Agenten im eigentlichen Sinn.

1) Weil die agentenbasierte Modellierung ein extrem niedriges Abstraktionsniveau erlaubt, kann in erster Näherung jeder Systembestandteil, der in der Realität die oben definierten Agenteneigenschaften aufweist, auch als Agent bezeichnet werden. Agenten im System sind folglich *Disponent*, *Zug*, *Passagier*, *Station/Bahnhof*, wobei ein Zug aufgeteilt werden kann in *Zugführer*, der sich um den Zuglauf bemüht, und *Zugchef*, der sich um Reisenden bemüht<sup>114</sup>. Weniger offensichtlich sind *Passagierrouter*, *Netzadministrator* oder andere Hilfsagenten (s. u.). All diese Agenten erben jedoch einige der im vorigen Abschnitt definierten Eigenschaften von Agentenarchetypen: So sind Dispositionsagenten sicherlich als autonom, lernfähig und kooperierend zu betrachten, und können ggf. auch mobil sein. Züge und Passagiere sind natürlicherweise als mobile Agenten zu konzipieren, wobei Passagieragenten zusätzlich sicher Interface-Agenten für Ihre jeweiligen Auftraggeber darstellen sollten; ebenso der Disponent und der Zugagent bzw. (Zugführer und Zugchef). Dabei wäre sozusagen die Benutzeroberfläche des Entscheidungsunterstützungssystems identisch mit der Schnittstelle des Disponenten. Ein Bahnhofsagent schließlich kann ebenfalls als autonomer und lernfähiger Agent betrachtet werden. Ob es letztlich sinnvoll ist, einem Agenten eine spezielle Eigenschaft zu verleihen, sollte im konkreten Anwendungsfall entschieden werden.

2) Wann immer möglich, werden Entscheidungen dezentral getroffen, um Berechnungslast von höher hierarchisierten Systembestandteilen zu entfernen. Dabei ist es theoretisch möglich, komplett ohne Disponent zu disponieren, indem Züge untereinander verhandeln, ob sie aufeinander warten. Dieser Ansatz wird nicht weiter verfolgt, da er nur sehr einfache, lokale Dispositionsstrategien zulässt, trotzdem aber Abstimmung mit einer zentralen Instanz und somit im Angesicht der nötig werdenden großen Zahl von Zugverhandlungen enormen Kommunikationsaufwand erfordert. Stattdessen wird immer ein Disponent einen Satz Dispositionsmaßnahmen berechnen und dann Züge entsprechend steuern. Dabei wird der Grad der Dezentralität – im Sinne einer maximal möglichen Größe von Regionen – von der *Produktivität des Dispositionsagenten* vorgegeben: Kann ein Agent aufgrund mangelnder Kapazitäten nicht alle Dispositionsentscheidungen treffen, ist deren Zahl im Sinne eines Load Balancing zu verringern, indem z. B. einfachere Berechnungsvorschriften oder eine kleinere Region gewählt werden.

---

<sup>114</sup> Dies geschieht zunächst aufgrund der Aufgabenteilung in der Realität. In der Implementierung in dieser Arbeit wird diese Trennung aufgehoben, weil sie höheren Rechenaufwand verursacht.

3) Um *Skalierbarkeit* zu gewährleisten, werden schließlich alle rechenintensiven Komponenten, z. B. einige der Dispositionsstrategien, ebenfalls als „Agenten“ konzipiert. Im Falle zu vieler Zugriffe auf einen Agenten würden sich diese im Netzwerk wie im letzten Abschnitt beschrieben klonen. Umgekehrt können sich Hilfsagenten bei zu geringer Auslastung beenden.

### III.1.3 Logische Gesamtsystemarchitektur

Da das Dispositionsproblem nicht in allen Instanzen auf einem einzigen Rechner zu lösen sein ist, wird eine Verteilung auf verschiedene Rechner durch Aufteilung des Netzes in *Regionen* vorgenommen, welche durch die Agentenbasierung vereinfacht wird. Zudem entspricht dieses Vorgehen dem in der Realität gewählten Ansatz der Verteilung der Disposition auf mehrere Betriebszentralen. Dabei wird die Menge  $B$  der Stellen des Bahnnetzes einfach in  $R$  disjunkte Teilmengen  $B_r \subseteq B$  aufgeteilt. In diesen Regionen existieren zentrale Dispositionsagenten als steuernde Experten, die durch verschiedene „Kollegen“ für Spezialaufgaben – (lokale) Assistenten – unterstützt werden. Eine technische und konzeptionelle Notwendigkeit bedingt globale Dienstleister für Infrastrukturdaten und Störungsmeldungen. Diese müssen zu jedem Zeitpunkt im kompletten System konsistent sein, wobei Laufzeitverzögerungen bei der Datenübertragung hier nicht berücksichtigt werden.

Die Größe der Region ist immer so zu wählen, dass die Anzahl der Konflikte, die in dieser Region pro Zeiteinheit auftreten, kleiner als die Produktivität des Disponenten ist. Da erstere Größe stochastischen Einflüssen unterliegt, muss sichergestellt werden, dass bei Überlast eines Disponenten in einer Region diese Region beispielsweise in zwei Teilregionen aufgeteilt und die Dispositionsarchitektur in beiden Regionen neu initialisiert wird.<sup>115</sup> Trotzdem sollte eine Dispositionsregion möglichst groß sein, um für die effiziente Berechnung von Strategien größere Spielräume zu haben.

Technische Kriterien bei der Aufteilung eines Bahnnetzwerks in verschiedene Regionen sind *Lastverteilung* und *Kopplung*. Disponenten – und die Computer, auf denen sie ausgeführt werden – sollten gleichmäßig ausgelastet sein. Zusätzlich sollte die Kommunikationslast, d. h., die Zahl der Züge, welche die Regionen wechseln, minimiert werden. Aus diesen Anforderungen lässt sich ein Optimierungsmodell erstellen, mit dem eine pseudooptimale Verteilung der Stellen auf Regionen bestimmt werden kann. „Pseudooptimal“ deswegen, weil die Anzahl auftretender Störungen und damit die *tatsächliche* Rechenlast a priori unbekannt ist.

Zwischen den Regionen werden dann nur noch Verspätungsmeldungen sowie prognostizierte Verspätungen sowie Züge ausgetauscht. Die Verantwortung dafür hat der „betreuende“ Disponent. Umgekehrt kann ein wartender Disponent den verantwortlichen Disponenten über die aktuelle und die prognostizierte Lage eines Zugs befragen, falls z. B. nah an der Grenze einer

---

<sup>115</sup> Im realen Betrieb wird dies eher schwierig zu gewährleisten sein, sodass ein Dispositionssystem dann ausreichend Reserven haben sollte. Dabei ist die maximale Anzahl zu treffender Entscheidungen insgesamt oder pro Region beschränkt durch die Zahl der möglichen Anschlüsse im kompletten, durch den (Teil-) Fahrplan aufgepannten Anschlussnetz.

Region ein Anschlussierungskonflikt vorliegt und ein Zubringer aus der benachbarten Region noch nicht eingetroffen ist. Alles andere regelt ein Disponent unter Zuhilfenahme seiner lokalen Assistenten.

Abbildung 19 zeigt die logische Architektur des kompletten Dispositionssystems.

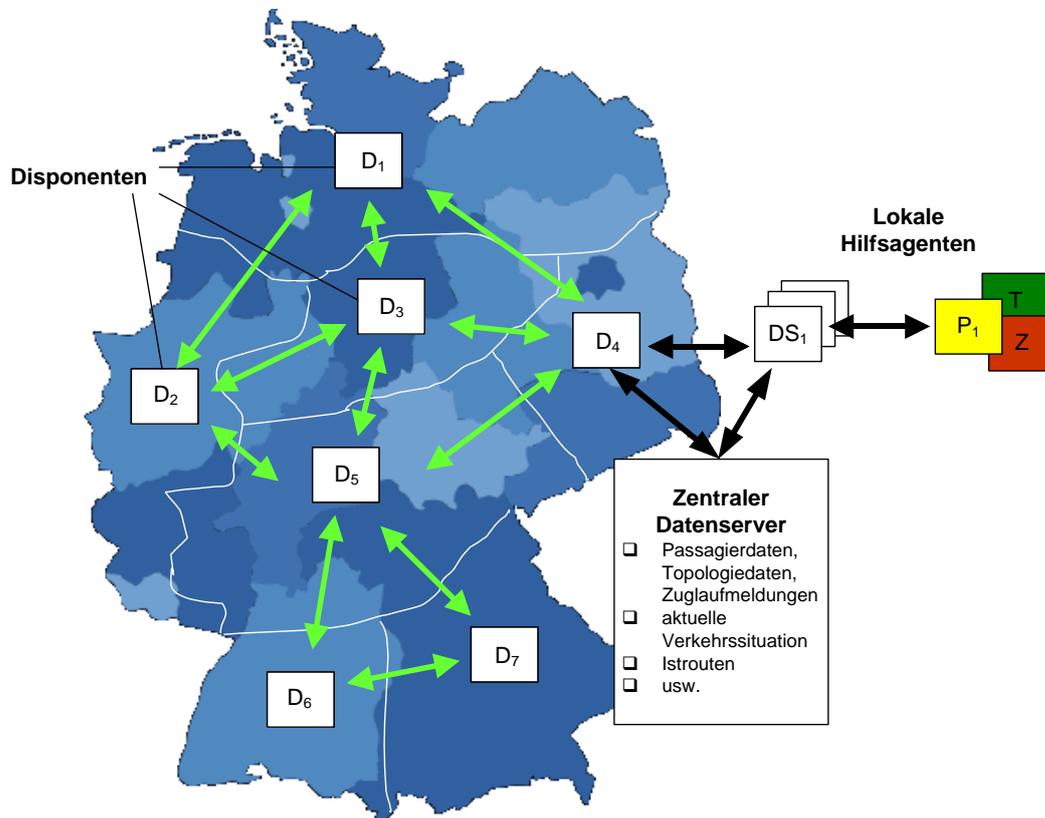


Abbildung 19: Globale, logische Dispositionsarchitektur

### III.1.4 Disposition innerhalb einer Region

Innerhalb einer Region steuert als zentrale Komponente der *Dispositionsent* oder *Dispositionent* die Disposition. Dieser greift zurück auf zahlreiche Dienstagenten, bzw. seine lokalen „Assistenten“. Zu diesen zählt insbesondere der *Passagierrouter*, der sowohl für die Berechnung von Dispositionsstrategien (What-If) als auch zur Berechnung neuer Routen für Passagiere im Falle verpasster Anschlüsse verwendet wird. Zusätzlich ist der *Netzwerkadministrator* zu nennen, der die physikalische Machbarkeit einer Dispositionsmaßnahme bestimmen kann und z. B. Sicherheitsabstände überprüft, physikalische Routen zuweist und das Netz überwacht. Jede Dispositionsstrategie, die komplexere Berechnungen anbietet, ist auch als Agent zu konzipieren, um den Lastverteilungsmechanismus des Dispositionssystems nutzen zu können. Zusätzliche existieren Auswertungsagenten für alle anfallenden Daten, die bspw. den Erfolg einer Strategie in statischem Sinne analysieren und ggf. den Erfolg einer jeweiligen Strategie oder einfach nur die Zahl verpasster Anschlüsse protokollieren usw. Die Systemarchitektur innerhalb einer Region ist in Abbildung 20 dargestellt.

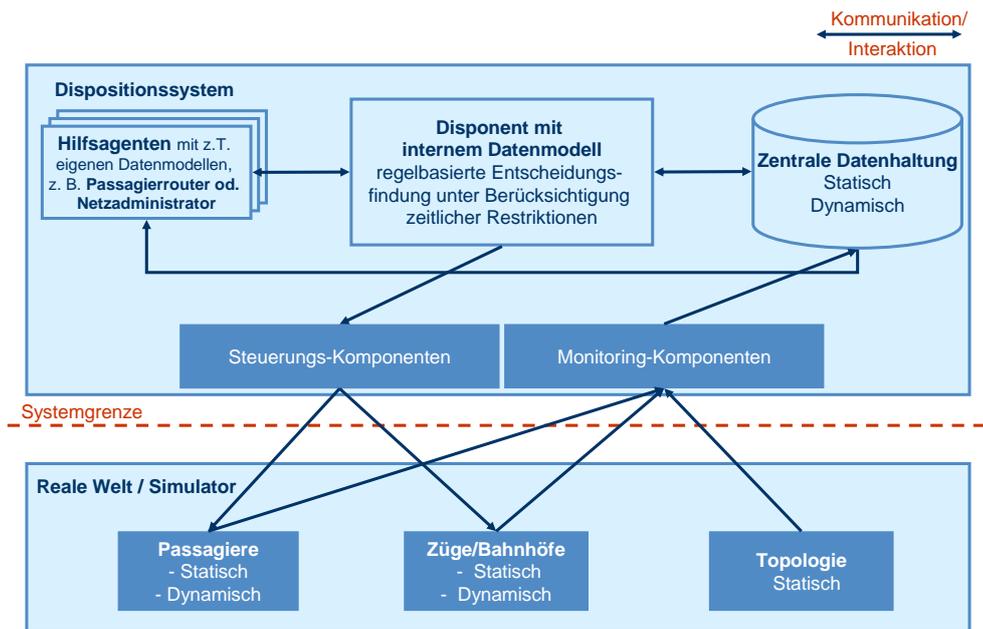


Abbildung 20: Systemarchitektur innerhalb einer Region

Zusammengenommen bilden alle Agenten, denen ein reales Abbild gegenübersteht, das im Rahmen dieser Arbeit verwendete *Modell der Disposition*. Dieses Modell spiegelt direkt die relevanten Aspekte des Umsystems, also der realen Bahn sowie der Passagiere wieder. Alle diese Agenten dienen gleichzeitig als Interface-Agenten, jeweils natürlich zu ihren realen Entsprechungen, und stellen damit gleichsam die Benutzungsoberfläche dar. Die Sensor- und Aktorkomponenten dieser Agenten kapseln damit die Erfassungs- und Steuerungssysteme der realen Welt. Diese Abstraktion ist z. B. notwendig, um problemlos neue Technologien zur Kommunikation in das System integrieren zu können. Ein anderer Vorteil dieser Vorgehensweise ist die daraus resultierende einfache Abkopplung des Dispositionssystems vom Real-system und Anbindung an ein Surrogatsystem für Testzwecke. In dieser Arbeit handelt es sich dabei um ein am Lehrstuhl DS & OR Lab der Universität Paderborn entwickeltes Simulationssystem für den Bahnverkehr. Dieses simuliert z. B. den Betriebsablauf und streut Störungen ein (vgl. Abschnitt III.2.2). Jegliche Experimentation mit dem Dispositionssystem wurde mithilfe des umgebenden Simulationssystems durchgeführt. Dies impliziert natürlich, dass das Dispositionssystem für alle Tests ein internes Modell eines Simulationsmodells der realen Welt aufbaut. Dabei bestehen zwei Gefahren: Zum einen könnten die Ergebnisse irrelevant sein, weil Dispositionsmodell und/oder Simulationsmodell nicht isomorph bzgl. ihrer Referenzsysteme sind, zum anderen könnten Ergebnisse dadurch verfälscht werden, dass Dispositionsstrategien unter Ausnutzung spezieller Kenntnisse der Vorgänge im Simulationsmodell bessere Ergebnisse erzielen, als sie es in der Realität können. Der ersten Gefahr kann durch sorgfältige Validierung (vgl. Abschnitt III.2.1.5) begegnet werden. Aufgrund der zweiten

werden in der Arbeit meist qualitative Aussagen statt quantitativer Aussagen getroffen<sup>116</sup>. Im letzten Abschnitt dieses Kapitels wird die Simulationstestumgebung genauer erörtert.

Die Datenhaltung im System ist zentral, sofern es sich um statische und dynamische Bestandteile des Bahnsystems handelt. Dieses Vorgehen ist äquivalent zur Strategie bei der Deutschen Bahn AG (vgl. Abschnitt II.4.4.2.1). Die statischen Passagierdaten werden ebenfalls zentral, Passagiere zur Laufzeit werden dezentral gespeichert.

### III.1.5 Zusammenwirken der Dispositionsbestandteile

Die Gestaltung des Systems geschieht mit dem Ziel, den Kommunikationsaufwand gering zu halten. Es resultieren folgende, hauptsächliche Kommunikationsbeziehungen:

- Züge teilen Störungen<sup>117</sup> (direkt oder indirekt über die Erfassungssysteme) einem zentralen Datenserver mit. Diesen kann der Disponent im Bedarfsfall, wenn er z. B. eine Warteentscheidung treffen will, befragen.
- Züge fragen vor dem Losfahren „ihren“ Disponenten, ob sie das auch dürfen. Dies geschieht ebenfalls indirekt über die Meldung bzw. Terminierung der Abfahrbereitschaft – der Disponent fragt regelmäßig die abfahrbereiten Züge im System ab.
- Der Disponent trifft unter Verwendung verschiedener lokaler Assistenten eine Dispositionsentscheidung. Dabei befragt er z. B. den Passagierrouter, ob bestimmte Passagiere alternative Routenmöglichkeiten haben, und den Netzadministrator, ob ein Zug technisch abfahrbereit ist, oder ob er z. B. ohnehin noch warten muss.
- Resultierende Steuerungsanweisungen werden den beteiligten Entitäten, d. h. in erster Linie den Zügen, übermittelt, die den berechneten Plan ausführen.
- Passagiere werden vom System in die „Passagierverwaltung“ – oder, in Agentennotation, eine Agentur – des ersten Zugs ihrer Reise gesetzt, wenn sie starten. Anschließend werden sie in Agenturen in den verschiedenen Stationen ihrer Reise transferiert. Falls sie ihren Anschluss verpassen, werden sie aktiv und fragen selbsttätig nach neuen Routen<sup>118</sup>.

---

<sup>116</sup> Zum Vorgehen und Problemen in Simulationsstudien vgl. Abschnitt III.2.1.

<sup>117</sup> Diese Störungen werden vom umgebenden Simulationssystem stochastisch generiert, vgl. Abschnitt III.2.2.

<sup>118</sup> Die Implementierung in dieser Arbeit wurde aus Effizienzgründen anders gestaltet. Passagiere werden darin komplett gesteuert, sind also im eigentlichen Sinn keine Agenten. Dies ist möglich, weil einige vereinfachende Annahmen über das Passagierverhalten getroffen wurden (vgl. Abschnitt III.2.2.1.1). In einer realen Implementierung sollte jeder Passagier durch einen dedizierten Agenten repräsentiert werden.

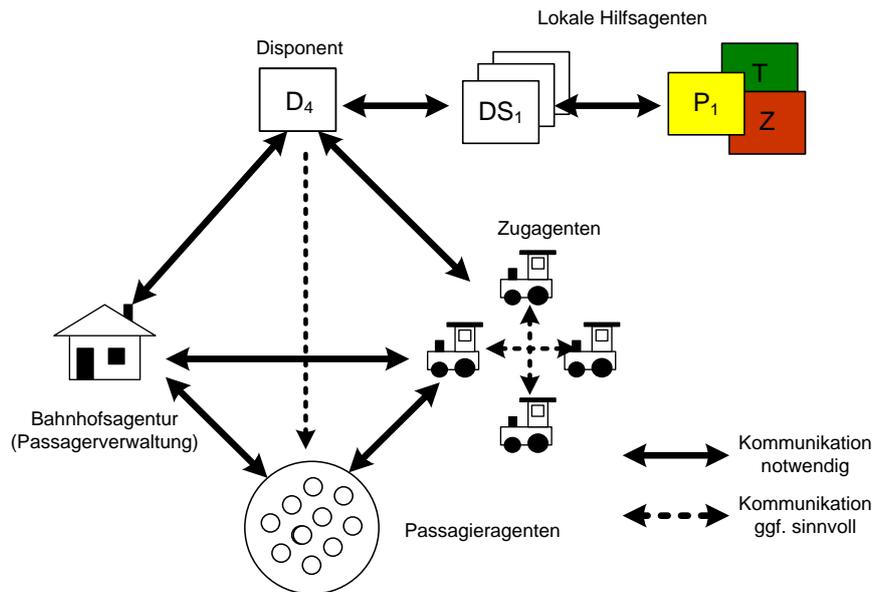


Abbildung 21: Kommunikationsbeziehungen zwischen Dispositionsbestandteilen

In Abbildung 21 sind die Kommunikationsbeziehungen zwischen den Bestandteilen der Disposition innerhalb einer Region etwas vereinfacht dargestellt. Dabei sind modellierungsabhängige Kommunikationsflüsse gestrichelt: Es ist, je nach Implementierung und nach Systemumfeld (z. B. Verfügbarkeit des Kommunikationsnetzes), nötig, die Zahl der Kommunikationsvorgänge zu minimieren, sodass es ineffizient wäre, Züge untereinander verhandeln oder Passagiere, die sich in einem Zug befinden, selbständig einen Passagierrouter oder den Disponenten befragen zu lassen. Stattdessen würde dann eine Sammelanfrage von genau diesem Zug für alle seine Passagiere, sinnvoll sein. In einem Bahnhof dagegen kann von einer ständigen Verfügbarkeit eines Kommunikationsnetzes ausgegangen werden, sodass jeder einzeln fragen kann.

### III.1.6 Der Dispositionsagent als Kernkomponente

Der Dispositionsagent oder Disponent stellt die Kernkomponente des Systems dar. Der interne Aufbau des Dispositionsagenten ist in erster Linie vergleichbar mit dem Aufbau eines klassischen Entscheidungsunterstützungssystems, angereichert um einige spezielle Aspekte von Expertensystemen. Aus Sicht der Agententheorie handelt es sich um einen deliberierenden Informations-Agenten (vgl. Abschnitt III.1.1), der die Disposition für eine bestimmte Region abwickelt.

Unter dem Aspekt der Entscheidungsunterstützung wurde das hier vorgestellte System in [Biederbick/Suhl 2005] betrachtet, eine kurze Einführung zum Thema findet sich im nächsten Abschnitt. Im Anschluss werden interner Aufbau und Funktionsweise des Disponenten – der Dispositionsalgorithmus – erläutert.

### III.1.6.1 Grundlagen von Entscheidungsunterstützungs- und Expertensystem

Der Begriff Decision Support System (DSS) wurde 1978 erstmals von Keen verwendet (vgl. [Finlay 1989], S. 40f.) und beschreibt das Konzept der *Entscheidungsunterstützungssysteme* (EUS)<sup>119</sup>. Dieses Konzept basiert auf Überlegungen von Gorry und Scott Morton aus 1971. Beide verstanden DSS als interaktive, computerbasierte Systeme zur Lösung unstrukturierter Probleme mit dem Ziel, Entscheidungsträger bei dem Einsatz von Daten und Modellen zu unterstützen. (vgl. [Gorry/Scott Morton 1971]). Keen und Scott Morton gaben 1978 eine weitere klassische Definition von EUS: „DSS verbinden die intellektuellen Ressourcen des Menschen mit den Fähigkeiten der Computer zur Verbesserung der Qualität von Entscheidungen. Es handelt sich um computerbasierte Unterstützungssysteme für Entscheidungsträger im Management, die mit semistrukturierten Problemen umgehen müssen“ (zitiert nach [Turban/Aronson 1998], S. 13; eigene Übersetzung); ähnlich definiert Back (s. [Back 2002], S. 369).

Diese Fähigkeit zur Behandlung unstrukturierter Entscheidungssituationen ist nach Meinung von Verfechtern der DSS einer der wichtigsten Vorteile dieser Technologie gegenüber anderen Methoden aus den Forschungsbereichen Operations Research (OR) und Management Science (MS), welche oft auf die Lösung strukturierter Probleme beschränkt sind (vgl. [Vazsonyi 2001], S. 202).

In der Literatur wird immer wieder darauf hingewiesen, dass sich EUS ständig in der Weiterentwicklung befinden, da mit ihrer Hilfe häufig spezielle Einzelfall-Entscheidungen getroffen werden sollen. Für die Entwicklung von EUS stehen leistungsfähige Softwareentwicklungswerkzeuge, sog. Expertensystem-Shells, bereit, die eine flexible Modellbildung und damit die Fortentwicklung von EUS unterstützen. Im Umfeld von EUS wurden, je nach verfolgter Zielsetzung, diverse Spezialisierungen entwickelt. Zu diesen Untertypen vgl z. B. [Turban/Aronson 1998]). Zu diesen zählen auch *Expertensysteme*. Mittels Expertensystemen wird versucht, das Verhalten menschlicher Experten nachzuahmen. Expertensysteme werden üblicherweise für einen speziellen und gewöhnlich sehr engen Problembereich realisiert (vgl. [Turban/Aronson 1998], S. 17.).

Expertensysteme stammen ursprünglich aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz (KI), wobei die Übersetzung „Künstliche Intelligenz“ für „Artificial Intelligence“ nicht unbedingt die wahre Bedeutung trifft. Eine bessere Übersetzung ist nach [Kredel 1988] „künstliche Information“ bzw. „Informationsgewinnung“.

Hennings definiert: „Expertensysteme sind Systeme, die nicht auf algorithmischen Prozessen unter Verwendung von Daten und Programmen operieren, sondern auch Wissen und Erfahrung nutzen, welches von menschlichen Experten u. U. Computer-unterstützt gewonnen (akquiriert), artikuliert (repräsentiert), verarbeitet (manipuliert) und bewertet (evaluiert) werden kann“ (s. [Hennings 1989], S. 15).

---

<sup>119</sup> Nachfolgend werden die deutsche und englische Bezeichnung für Entscheidungsunterstützungssysteme gleichermaßen und gleichbedeutend verwendet. Außerdem werden Abkürzungen wie EUS oder DSS sowohl im Singular als auch im Plural verwendet.

Mit Expertensystemen soll demnach existentes Erfahrungswissen genutzt und mit einer aktuellen Situation verknüpft werden, um daraus neue Schlüsse zu ziehen. Es wird versucht, dass Wissen von Experten in einem Computersystem abzubilden, vornehmlich, um dadurch Experten in vielen Bereichen von Routineaufgaben zu entlasten – oder sie sogar ganz einzusparen<sup>120</sup>. Puppe schränkt dies in [Puppe 1991] allerdings ein: „Expertensysteme sind Programme, mit denen das Spezialwissen und die Schlussfolgerungsfähigkeit qualifizierter Fachleute auf eng begrenzten Aufgabengebieten nachgebildet werden soll.“ Dies stimmt mit den heute auftretenden Ausprägungen von Expertensystemen überein: Z. B. werden in Call Centern häufig vorgegebene Regelbäume von Interviewern abgearbeitet, sodass auf den Einsatz (teurer) Experten ganz verzichtet werden kann. Bei anspruchsvolleren Aufgabenstellungen wie der Disposition im Schienenverkehr ist dies aber weder möglich – konkret auftretende Störungen sind extrem vielfältig – noch sinnvoll: Fehler in Wissensbasen können im wahrsten Sinne des Wortes zu Katastrophen führen.

Selbstverständlich darf Expertenwissen nicht als unfehlbar missverstanden werden, da es keinesfalls immer präzise formuliert und korrekt ist, sondern sehr oft auf Erfahrungswerten oder Daumenregeln beruht. Dieses Wissen kann mit einer gewissen Unsicherheit behaftet sein. Im Normalfall kann ein Experte jedoch relevante, unnütze und unsichere Informationen voneinander unterscheiden. All dies muss im Expertensystem Berücksichtigung finden. Nicht zu unterschätzen ist auch der Aspekt der mangelnden Explizierbarkeit des Wissens: Experten haben oftmals selber Schwierigkeiten damit, ihr Erfahrungswissen zu formulieren oder gar zu formalisieren. Diese Art des Wissens wird zuweilen auch *tacit knowledge* genannt.<sup>121</sup>

Expertensysteme erheben daher i. Allg. nicht in erster Linie Anspruch auf die Optimalität einer Lösung; in der Praxis reichen vielmehr suboptimale Ergebnisse aus. „Da bei komplexen Problemen typischerweise keine exakte Lösung angestrebt werden kann, sondern mit näherungsweise oder suboptimalen Lösungen gearbeitet wird, spielt die Einbeziehung heuristischer Elemente in die Problemlösung bei vielen technischen Aufgabenstellungen eine entscheidende Rolle“ (vgl. [Lunze 1994], S. 33). Dies kann mittels Expertensystemen geschehen.

Expertensysteme bieten also interessante Ansatzpunkte für das Design eines Systems für die kundenorientierte Disposition: Das Expertenwissen von Disponenten kann und sollte z. B. innerhalb einer Komponente für die zugweise Fahrplanung nach der Reoptimierung im Störfall, für die Kontrolle sicherheitsrelevanter Aspekte eines neuen Plans oder auch zur Steuerung des Einsatzes von Dispositionsstrategien genutzt werden.

---

<sup>120</sup> Nach der Erfahrung des Autors wird der Versuch, einen menschlichen Experten komplett zu ersetzen, für nichttriviale Aufgabenstellungen scheitern. Daher ist das vorliegende Dispositionssystem auch als Entscheidungsunterstützungssystem konzipiert.

<sup>121</sup> Nach Ansicht des Autors ist dieses „tacit knowledge“ die Hauptschwierigkeit bei der Modellierung fast aller praxisrelevanten Problemstellungen.

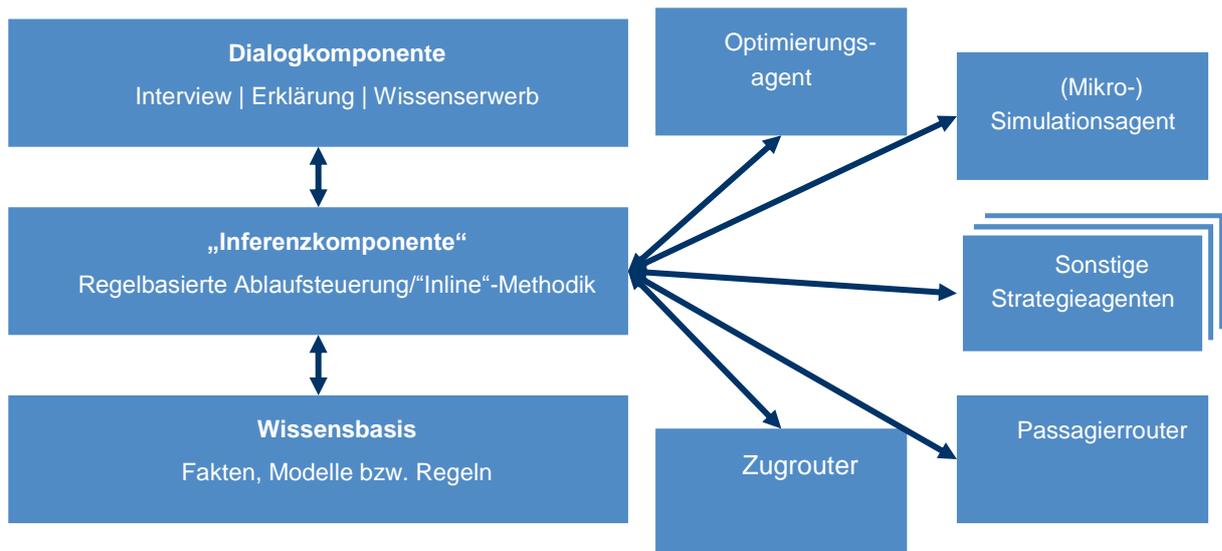


Abbildung 22: Schematischer Aufbau eines Expertensystems am Beispiel des Disponenten

### III.1.6.2 Interner Aufbau

Die Abbildung 22 zeigt schematisch den Aufbau des Disponenten. Dieser ist stark am Aufbau eines klassischen Expertensystems orientiert. Die einzelnen Komponenten werden im nächsten Abschnitt sowie in den darauf folgenden Unterkapiteln im Detail erklärt<sup>122</sup>.

#### III.1.6.2.1 Dialogkomponente/Benutzungsschnittstelle

Die *Dialogkomponente* ist die Schnittstelle zwischen Benutzer und Disponent. Für den Aufbau dieser Komponente gelten dieselben Richtlinien wie für jedes Programm mit Benutzerinteraktion. Dazu gehören leichte Erlernbarkeit, was sich in einer geringen Einarbeitungszeit bemerkbar macht, eine hohe Interaktionsgeschwindigkeit, was die Antwortzeiten des Systems angeht, sowie eine angemessene Fehlertoleranz bei der Eingabe der Daten. Allgemeine Richtlinien zur Gestaltung von Oberflächen für verschiedene Plattformen finden sich bspw. unter [IBM 1991] für SAA, [KDE 2005] für KDE, [Apple 2005] für Macintosh oder [Microsoft 2004] für Microsoft Windows. Die Dialogkomponente ist ihrerseits aufgeteilt in eine Interview-, eine Erklärungs- und eine Wissenserwerbskomponente.

- *Interviewkomponente*: Allgemein können Interviewkomponenten nach Art der Benutzerinteraktion und nach der Integration des Expertensystems in das umgebende Gesamtsystem kategorisiert werden. Nach der Benutzerinteraktion werden *Steuerung per Batchlauf* (vorgegebene Fragen werden a priori beantwortet) und *Interaktion* (Fragen des Systems ergeben sich aus den vorher gegebenen Antworten des Anwenders) unterschieden. Obwohl dadurch der Lösungsweg des Systems für den Anwender transparenter wird, ist Interaktion während der Disposition sicher nicht zu empfehlen. Bei der *Art der Integration des Systems* wird zwischen *Offline-* und *eingebetteten (embedded)* Systemen unterschieden. Bei Offline-Verfahren werden alle benötigten Eingaben vom Benutzer getätigt; bei eingebetteten Systemen ist das Expertensystem di-

<sup>122</sup> Zur speziellen Terminologie bei Expertensystemen vgl. [Puppe 1991], S. 11ff. und [Hennings 1989].

rekt mit dem Realsystem oder aber einer Simulation verbunden und akquiriert benötigte Daten automatisch. Maßnahmen können direkt oder nach Benutzerfreigabe in das System getroffen werden.

- *Erklärungskomponente*: Die Erklärungskomponente ist ein nicht zu unterschätzender Bestandteil des Systems, von deren Nachvollziehbarkeit die Akzeptanz eines Expertensystems entscheidend abhängt (vgl. [Puppe 1991]). Dabei soll vor allem die Frage beantwortet werden, wie eine Lösung zustande kam und warum eine bestimmte Lösung präferiert wird. Die jeweilige Antwort kann auch ein Fehlverhalten des Systems aufdecken und bei der Fehlerbehebung hilfreich sein. Für den Dispositionsagenten bedeutet dies, dass gefundene Lösungen mittels geeigneter graphischer oder textueller Ausgaben erläutert werden sollten, bspw. über die Aufbereitung bestimmter Kennzahlen für verschiedene Entscheidungsalternativen.
- *Wissenserwerbskomponente*: Mit Hilfe der Wissenserwerbskomponente geben Experten Wissen in das System ein. Die bevorzugte Art der Wissensrepräsentation in Expertensystemen sind Regelwerke, da sie das Einpflegen neuen Wissens erleichtern. Diese Regelbasen werden jedoch mit zunehmender Größe unhandlich, was leicht zu Inkonsistenzen führen kann. Durch den Resolutionsalgorithmus können neue Regeln abgeleitet und dadurch die Wissensbasis erweitert werden.

Zur initialisierenden Eingabe speziellen Wissens – im Dispositionskontext bspw. lokale Ausnahmen globaler Vorschriften – fordern Entscheidungsunterstützungssysteme, und damit auch Expertensysteme, spezielle Interview- und Wissenserwerbskomponenten. Für ein derart komplexes System wie die Bahn ist eine Vermischung des Batchverfahrens und der interaktiven Eingabe von Regeln in die Interview- und auch die Wissenserwerbskomponente denkbar. Bspw. sollten lokale Regeln wie angepasste Mindestübergangszeiten, sofern sie elektronisch auswertbar vorliegen, zur Initialisierung automatisiert eingelesen werden. Danach können Entscheidungen eines Disponenten im laufenden Betrieb „gelernt“ werden. In der Terminologie der Expertensysteme stellt der Disponent mit seiner Anbindung an automatische Erfassungssysteme ein *eingebettetes System* dar.

Bei der Gestaltung der Oberfläche ist neben den genannten allgemeinen Entwurfskriterien für Benutzungsschnittstellen insbesondere zu berücksichtigen, dass es sich bei den Anwendern des Dispositionssystems um Spezialisten in der Domäne „Bahn“ handelt: Für einen realen Disponenten ist es unerlässlich, vertraute Benutzungsschnittstellen, die ihm die Situation schnell und einfach darlegen, in das System zu integrieren. In dieser Arbeit wurde dies durch Anbindung grafischer Oberflächen aus zuvor entwickelten Entscheidungsunterstützungssystemen für die Disposition verwirklicht (vgl. [Goecke 1996]). Prinzipiell können und sollen dazu später auch und gerade die bahneigenen Visualisierungssysteme (vgl. Abbildung 10 bis Abbildung 12) verwendet werden, weswegen auf die neuerliche Implementierung einer grafischen Oberfläche in dieser Arbeit verzichtet werden konnte. Ein anderes, modernes GUI-System, welches ohne großen Aufwand anzubinden wäre, wird in [Makkinga 2004] vorgesch-

tellt. Beispiele für eine textuelle (XML<sup>123</sup>-basierte) Ausgabe von Informationen aus dem in dieser Arbeit entwickelten System finden sich in Abbildung 23. Diese Daten können ohne großen Aufwand in beliebige Daten- bzw. Informationsmodelle transformiert werden. Ein solches, durchaus geeignet erscheinendes Modell wird bspw. in [Fernández et al. 2004] vorgestellt. Nash et al. stellen darüber hinaus ein Austauschformat bahnspezifischer Informationen vor. Dabei handelt es sich um ein XML-Subset, das sog. RailML, welches die Kommunikation und den Datentransfer zwischen verschiedenen Modellen und Programmen erleichtern soll, vgl. [Nash et al. 2004].



Abbildung 23: Anzeige von Zugverspätungen für einen ICE sowie ein Umsteigerprotokoll mit Anschlusskonflikten.

Im Sinne der Agentenbasierung sollte jeder Agent ebenfalls als Schnittstelle zwischen dem Prinzipal (hier: dem menschlichen Agenten) dienen. Konkret sollte ein Dispositionsagent in jedem Zweifelsfall seinen Prinzipal aufmerksam machen und hinsichtlich einer Lösung „interviewen“.

### III.1.6.2.2 Wissensbasis

Die Wissensbasis setzt sich im herkömmlichen Sinn zusammen aus dem Expertenwissen, welches meist in Fakten und Regeln („Wenn A dann B“ als einfachste Form) hinterlegt ist. Fakten sind entweder fallspezifisch oder generell gültig. Lernfähige Expertensysteme können Fakten aus spezifischen Fällen dauerhaft in die Wissensbasis integrieren.

<sup>123</sup> XML (*Extensible Markup Language*) „ist ein Standard zur Erstellung maschinen- und menschenlesbarer Dokumente in Form einer Baumstruktur. XML definiert dabei die Regeln für den Aufbau solcher Dokumente. Für einen konkreten Anwendungsfall („XML-Anwendung“) müssen die Details der jeweiligen Dokumente spezifiziert werden. Dies betrifft insbesondere die Festlegung der Strukturelemente und ihre Anordnung innerhalb des Dokumentenbaums. XML ist damit ein Standard zur Definition von beliebigen, in ihrer Grundstruktur jedoch stark verwandten Auszeichnungssprachen“ (s. [Wikipedia 2005c])

Im Dispositionsagenten wird diese (konventionell so definierte) Wissensbasis erweitert durch alle Modelle und Informationen, die ein Disponent über das Realsystem hat bzw. kennt und die Grundlage für die eingesetzten Dispositionsstrategien sind.

### III.1.6.2.3 Inferenzkomponente

Das „Inferenzsystem“ repräsentiert eine wichtige Komponente des Dispositionsagenten, da es die eigentliche Lösung herleitet, weshalb es auch „Problemlösungskomponente“ genannt wird. Regeln werden mit den Fakten verknüpft, indem nach Regeln gesucht wird, deren Vorbedingungen durch die aktuelle Faktenlage erfüllt sind. Diese Regeln werden dann zur Ausführung gebracht. Auf diese Weise können bspw. in der Disposition spezielle, bestimmte Bahnhöfe, Bahnhofsklassen, Züge, Zugattungen, Linien, Relationen oder Szenarios betreffende Heuristiken selektiert werden. Anschließend können die gefundenen Methoden angewendet werden.

### III.1.6.3 Der Dispositionsalgorithmus

Bzgl. des zeitlichen Verhältnisses zwischen einem auftretenden Konflikt und der Anwendung einer Dispositionsstrategie bzw. dem Eingriff eines Disponenten können prinzipiell zwei Vorgehensweisen unterschieden werden: die zurückschauende, retrospektive, und die vorausschauende, antizipierende, Disposition. Naturgemäß ist es sinnvoll, möglichst früh auf einen drohenden Konflikt zu reagieren, also vorausschauend zu planen. Dies hat seine Grenzen nur in der Vorhersehbarkeit der Verkehrssituation zu einem bestimmten Zeitpunkt: bei unsicheren Prognosen der Verkehrslage ist es nicht sinnvoll, komplizierte Berechnungen zur Auflösung potenzieller Konflikte durchzuführen, während es dagegen sehr hilfreich sein kann, bei sicher auftretenden Konflikten frühzeitig Gegenmaßnahmen einzuleiten. Sobald bspw. bekannt ist, dass eine Besatzung nicht zur Verfügung stehen wird, kann ein Disponent dafür sorgen, dass zum richtigen Zeitpunkt Ersatzpersonal bereitsteht. Auch für die in dieser Arbeit hauptsächlich betrachteten Anschlusskonflikte wird die Qualität der Disposition durch das frühzeitige Einleiten von Gegenmaßnahmen erhöht, und sei es nur, weil er sich die für die Berechnung von Dispositionsstrategien zur Verfügung stehende Zeitspanne erhöht.

Es ergibt sich der folgende sehr einfache Ablauf für die Disposition:

1. Aktualisiere den Systemzustand  $Z$ .

Alle Entitäten im internen Modell, insbesondere auch die Passagiere, werden, falls sich ihr Zustand geändert hat, aktualisiert.

2. Erkenne Konfliktmenge  $K$  ( $K$  kann auch potenzielle, d. h. in der Zukunft liegende oder bereits vorliegende, aber noch nicht gelöste Konflikte beinhalten).

Dabei wird auch die Menge der von einem Konflikt betroffenen Passagiere bestimmt.

3. Bestimme zur Konfliktlösung verfügbare Zeit  $D$ .

Je nach dem, ob die Planung vorausschauend, oder ob ein Konflikt bereits aufgetreten ist, wird bestimmt, wie viel Zeit für Berechnungen zur Verfügung steht. Dabei sollte immer ein evtl. benötigter Zeitpuffer berücksichtigt werden.

4. Für alle anwendbaren Dispositionsstrategien  $DS$ : berechne  $DS(Z, K, D)$ .

Dabei werden regelbasiert diejenigen Dispositionsstrategien ausgefiltert, die für die betreffende Situation unter Berücksichtigung der Gesamtsystemauslastung keine sinnvollen Ergebnisse liefern beziehungsweise zu rechenintensiv sein würden. Dabei kann zur Berechnung auch hier schon der Passagierrouter (s. u.) eingesetzt werden.

5. Warte  $D$  und sortiere währenddessen eintreffende Pläne nach ihrem Ergebnis (vgl. Kapitel IV).

Dies ist das Vorgehen bei einer automatisierten Disposition. An dieser Stelle könnte jedoch durchaus ein menschlicher Disponent mit einer eigenen Auswahlstrategie eine eigene Sortierung oder etwas vollkommen anderes als die vorgeschlagenen Pläne wählen.

6. Solange (kein Plan gefunden) und (Menge berechneter Pläne nicht leer)
  - a. Wähle besten Plan aus der Menge der gefundenen Pläne aus.
  - b. Überprüfe physikalische Ausführbarkeit des Plans.

Dafür wird der Disponent den Netzadministrator befragen. Wenn dieser für alle beteiligten Züge eine sichere Route ohne weitere Konflikte bestimmen kann, ist der Plan durchführbar. Es besteht die Möglichkeit, dass eine Dispositionsstrategie selbst die Berechnung der physikalischen Durchführbarkeit einer Fahrt durchführt (vgl. Abschnitt IV.6). In diesem Fall kann dieser Schritt übergangen werden.

An dieser Stelle werden Passagiere nicht in die Bestimmung der Ausführbarkeit einbezogen, weil von der Bereitschaft, ggf. einer anderen Route folgen zu wollen, ohnehin auszugehen ist – ein Passagier, der dies nicht will, wird demnach per Annahme von der kundenorientierten Simulation ausgeschlossen.

- c. Falls Plan durchführbar, gehe zu Schritt 7, sonst entferne Plan aus Menge der Pläne.
7. Falls kein Plan gefunden: Stoppe Ausführung und erfrage Plan von menschlichen Disponenten.

Dieser Fall ist für eine automatisierte Disposition in der Praxis zunächst kaum vermeidbar, weil sich immer wieder vollkommen neue Problemsituationen ergeben werden, die zuvor nicht bedacht wurden, bzw. aufgrund derer kein gültiger Plan mehr bestimmt werden *kann*. In der Realität würden menschliche Disponenten in einem solchen Fall komplett neue Lösungen erarbeiten.<sup>124</sup>

8. Bestimme die durch den Plan betroffenen Entitäten.
9. Gebe entsprechende Anweisungen an die betroffenen Entitäten im System zur Durch-

---

<sup>124</sup> In der Implementierung des vorgestellten Systems (vgl. Abschnitt III.2.2) wird dieser Fall durch die Beschränkung auf die Klasse der Anschlusskonflikte umgangen. Dies ist nicht nur notwendig, um Simulationsläufe ohne Unterbrechungen durchführen zu können, sondern auch sinnvoll hinsichtlich des gedachten Einsatzes des vorgestellten Systems als Entscheidungshilfe für menschliche Disponenten: „Standardkonflikte“ würden dann vom System aufgelöst, besondere Konflikte von einem menschlichen Disponenten.

führung des Plans. Insbesondere: Falls Passagiere betroffen sind, rufe für sie den Passagierrouter auf und bestimme alternative Routen. Ggf. können die unter 4. berechneten Routen benutzt werden, falls  $Z$  noch unverändert ist.

Offensichtlich umfasst dieser Algorithmus die Möglichkeit, jede der Möglichkeiten FIFO, GREEDY, REPLAN und IGNORE umzusetzen, weil es dem Disponenten möglich ist, auf eine bestimmte Anzahl eintreffender Konflikte zu warten, bevor er tätig wird, oder nach jedem erkannten Konflikt eine Neuplanung vorzunehmen. In der Praxis wird aufgrund der Natur des Problems eine Neuplanung nach jedem erkannten Konflikt sinnvoll sein: Je nach Konfliktart ist eine sofortige Entscheidung unumgänglich, bspw. bei allen die Sicherheit beeinflussenden Konflikten. Allerdings ist nicht auszuschließen, dass mehrere Konflikte innerhalb einer kurzen Zeitspanne auftreten; diese würden dann gleichsam zusammen abgearbeitet, da in eine Entscheidung immer die aktuelle Netzsituation einfließt<sup>125</sup>. Die Menge der Strategien kann dabei beliebig erweitert werden, wie im nächsten Abschnitt beschrieben wird.

#### III.1.6.4 Strategieintegration

Eine der wichtigsten Anforderungen an den Disponenten ist, beliebige Strategien zur Auflösung von Dispositionskonflikten und zur Steuerung von Passagieren durch das Bahnnetz integrieren zu können. Dies geschieht im System auf zwei Arten:

1. *Einfache* Dispositionsstrategien mit deterministischer Laufzeit werden im Disponenten aus Effizienzgründen *inline* implementiert, um bei jeder Netzlage schnellstmöglich einen Plan bestimmen zu können.
2. *Komplexe* Dispositionsstrategien, deren Laufzeit höher bzw. nicht deterministisch ist, werden als *Strategieagenten* implementiert. Auf diese Weise kann sichergestellt werden, dass auch bei häufigen Störungsmeldungen aus dem Netz keine Überlastungszustände. Ein überlasteter Strategieagent würde sich entweder klonen, oder, falls dies nicht möglich ist, weil bspw. kein weiterer Prozessor zur Verfügung steht, seinem zugehörigen Disponenten dies mitteilen, sodass dieser ihn per geringerer Zuteilung entlasten kann.

Auf diese Weise wird der Disponent in die Lage versetzt, die ihm zur Verfügung stehende Prozessorleistung bestmöglich einzusetzen, indem er die Arten und die Anzahl ihm zur Verfügung stehender Strategieagenten variiert: beispielsweise könnte er bei einer hohen Auslastung einfache Strategien bevorzugen, während er bei niedriger Beanspruchung kompliziertere Berechnungsmethoden einsetzt.<sup>126</sup>

Diese Art der Integration sorgt zudem für eine leichte Erweiterbarkeit des Systems. Dieses ist besonders wichtig, da die in dieser Arbeit erarbeiteten und getesteten Dispositionsstrate-

<sup>125</sup> In der Implementierung eines Simulationsmodells können durch die Wahl des Zeitmanagements im Übrigen implizit sowohl REPLAN als auch IGNORE umgesetzt werden, vgl. Abschnitt II.4.2.

<sup>126</sup> Das nicht zu vermeidende Dilemma der Disposition besteht darin, dass immer dann, wenn besonders gut geplant werden müsste, keine Zeit dafür zur Verfügung steht, nämlich immer genau dann, wenn viele Konflikte auftreten.

gien für die kundenorientierte Disposition aus theoretischer Sicht keinen Anspruch auf Optimalität erheben können (s. Abschnitt III.2.1): In der Praxis wird es notwendig sein, Strategien solange zu verbessern, bis Ergebnisse auch auf den realen Daten ausreichend gut erscheinen.

### III.1.7 Ein Agent zum Online Re-Scheduling von Passagieren: Der Passagierrouter

Eine zentrale Rolle in der Disposition spielt, wie zuvor erläutert, der *Passagierrouter*, der nachfolgend kurz erläutert wird. Er wurde in gemeinsamen Forschungsarbeiten mit T. Mellouli (vgl. [Mellouli 2003]) und J. Goecke sowie der DB Systems, der IT-Tochter der Deutschen Bahn AG, konzipiert und entwickelt. An dieser Stelle wird zunächst die Grobkonzeption abgehandelt.

Der Passagierrouter berechnet auf dem dynamischen Verbindungsnetzwerk, welches sich aus dem ursprünglichen Fahrplannetzwerk durch ständige Aktualisierung mit allen Verspätungen ergibt, Routen für Passagiere. Diese trivial klingende Aufgabe erweist sich in der Praxis als schwierig<sup>127</sup>:

- Zum einen müssen zusätzlich zur Speicherung aller relevanten Zuglauf- und Passagierinformationen ständig eingehende Aktualisierungen schnell bzw. effizient in die Netzwerkstruktur integriert werden können, zum anderen müssen auf dieser Struktur höchst effizient Wege bestimmt werden. Beides ist bei einer Netzwerkgröße von ungefähr 700.000 Knoten nicht einfach, da im laufenden Betrieb – insbes. bei vielen Störungen im Netz – sehr viele Anfragen beantwortet werden müssen.
- Zusätzlich sollten Antwortzeiten im Bereich von Sekundenbruchteilen liegen, selbst wenn im Netz viele Passagierrouter zur Verfügung stehen<sup>128</sup>. Dieses liegt vor allem darin begründet, dass in der kundenorientierten Disposition der Passagierrouter a) zur Berechnung von Dispositionsstrategien (ex ante) und b) zum Online-Re-Routing von Passagieren (ex post, *nach* einer Dispositionsentscheidung) verwendet wird:
  - a) Eine Dispositionsentscheidung betrifft im (Anschluss-) Konfliktfall immer sowohl einige Passagiere im Zubringer als auch einige im Abbringer. Wartet der Abbringer nicht, werden Passagiere im Zubringer ihren Anschluss verpassen; dafür werden diejenigen im Abbringer mit höherer Wahrscheinlichkeit ihre Anschlüsse bekommen. Wartet er hingegen, werden zwar alle Passagiere im Zubringer diesen Anschluss bekommen, aber u. U. einige im Abbringer dieses später nicht schaffen. Für beide Gruppen kann der Passagierrouter alternative Routenvorschläge bestimmen, die in der Dispositionsstrategie berücksichtigt werden können, z. B., indem die induzierten Gesamtverzögerungen beider Gruppen gegeneinander abgewogen werden.

---

<sup>127</sup> Zur Beurteilung der Schwierigkeit der Berechnung von Routen unter mehrfacher Zielsetzung vgl. [Müller-Hannemann/Schnee 2005].

<sup>128</sup> Zum Vergleich kann sehr gut die Abfrage des statischen Fahrplans auf den Webseiten der DB AG herangezogen werden: Die Berechnung einer Route kann in Zeiten hoher Serverlast durchaus einige Sekunden in Anspruch nehmen.

- b) Hat eine Dispositionsentscheidung einen verpassten Anschluss zur Folge, kann der Passagierrouter ohnehin für alle betroffenen Passagiere neue Routen berechnen, die er dann den Kommunikationsagenten im System zur Weitergabe an die Reisenden übergibt.

Unabhängig von diesem Einsatz kann der Passagierrouter auch für all diejenigen Reisenden aktuelle Routen ermitteln, deren Reise von Störungen betroffen sein wird. So kann bereits vor Reiseantritt eine andere Route berechnet und mitgeteilt werden, falls es z. B. zu Streckensperrungen gekommen ist, die im statischen Fahrplan naturgemäß nicht berücksichtigt sind. Selbst wenn die Reise auf der gleichen Route stattfindet, kann der Router zur Pre-Trip-Information sinnvoll sein: Ein Passagier weiß im Einzelfall, dass der erste (und, unter Umständen, einzige) Zug seiner Reise verspätet ist, sodass er zur tatsächlichen Abfahrtszeit am Bahnhof erscheinen kann<sup>129</sup>.

Eine interessante weitere Anwendung des Passagierrouters ist die Berechnung von Routen simulierter Passagiere auf dem statischen Fahrplan als Datenbasis für die Experimentation. Näheres dazu findet sich in Abschnitt III.2.2; ebenso wird die Funktionsweise dieses Routers dort näher erläutert.

### III.1.8 Weitere Agenten im System

Weitere wichtige Agenten im System sind der Netzadministrator, die Strategieagenten, Züge und Passagiere.

#### III.1.8.1 Netzadministrator

Der Netzadministrator sorgt für einen reibungslosen Ablauf im Bahnnetzwerk; er nimmt im Dispositionssystem quasi die Stelle der DB Netz AG ein. In diesem Sinne ist seine einzige Aufgabe die Berechnung von validen Routen durch das (physikalische) Bahnnetz. Er ist im eigentlichen Sinne kein Bestandteil des kundenorientierten Simulationssystems und wird deswegen hier nicht ausführlicher behandelt. Seine Rolle im weiter unten beschriebenen Simulationssystem *TrainSim* wird durch den *Zugrouter* übernommen. Dabei soll der Unterschied in der Terminologie darauf hinweisen, dass der in der Realität Netzadministrator weitaus mehr Fähigkeiten aufweisen muss als die Komponente, die hier nur den reibungslosen Ablauf der Simulation sicherstellen soll.

#### III.1.8.2 Strategieagenten

Strategieagenten bekommen einen Systemzustand, eine Konfliktmenge und eine obere Zeitschranke  $D$  der Berechnungsdauer und berechnen entweder einen Plan und geben diesen zurück oder teilen nach  $D$  mit, dass sie kein Ergebnis haben. Ansonsten berechnen sie eine der Kapitel IV vorgestellten (oder beliebige andere) Dispositionsstrategien.

---

<sup>129</sup> Diese Anwendung wurde bereits im Praxiseinsatz durch die Deutsche Bahn AG getestet. Die Kommunikation mit den Reisenden fand dabei per SMS statt.

### III.1.8.3 Züge

Züge haben im Modell die Aufgabe, pünktlich und sicher an ihre Endstation zu gelangen und dabei ebenfalls auf die Pünktlichkeit der sich jeweils in ihnen befindlichen Passagiere zu achten. Dafür können sie mit Disponenten – auch aus verschiedenen Regionen – Verhandlungen aufnehmen, bspw. können sie selbst Anschlusssicherung oder Strecken beantragen, Sicherheitsabstände einhalten oder Verspätungen aufholen, falls dies physikalisch möglich und erlaubt ist. Innerhalb des in dieser Arbeit erstellten Systems wurde jedoch aus Performanzgründen darauf verzichtet, Züge proaktiv zu implementieren<sup>130</sup>. Stattdessen wurde ein weitaus effizienterer Ansatz mit mehr Kontroll- und Steuerungsmechanismen verwirklicht (vgl. Abschnitt III.2.2). Züge sind nach der Definition aus Abschnitt III.1.1 damit keine Agenten im eigentlichen Sinne, da ihnen die Eigenschaft der Proaktivität fehlt.

### III.1.8.4 Passagiere

Die oberste Priorität eines Passagiers ist die pünktliche Erreichung seines Ziels unter Einhaltung seiner *globalen* und *spezifischen* Eigenschaften bzw. Reisepräferenzen.

Zu den globalen Eigenschaften zählen bspw. Alter, eventuelle Mobilitätseinschränkungen Vorlieben für Zuggattungen, Wagenkategorien usw., Kontaktdaten (Adresse, Telefonnummern – insbes. Mobil – etc.) und ggf. unterstützte Kommunikationswege und -arten. Letzteres umfasst bspw. die Fähigkeiten des mobilen Endgeräts des Kunden oder auch Zeitpunkte an denen und Züge über die ein Kunde informiert werden will. Generell sollte ein Passagier schnellstmöglich über notwendig werdende Änderungen seines Reisplans informiert werden, ebenfalls sollte das auf eine Art geschehen, die dem Passagier keine lästigen Zusatz Tätigkeiten aufbürdet. Während eine SMS z. B. quasi unmittelbar empfangen werden kann, würde die Notwendigkeit, einen Laptop starten zu müssen, um informiert zu sein, kontraproduktiv wirken: ein Passagier verlore Zeit, die er u. U. schon nicht mehr hat, wenn er auf eine Alternativroute gesetzt wurde.

Ebenso können und sollten – die Zustimmung des Kunden vorausgesetzt – selbstredend alle anderen Kundendaten in dieses Stammdatenmodell integriert werden, bspw. Teilnahme am Bonusmeilenprogramm und aktueller Stand, Reisehistorie, ID-Nummern von Bahn- oder Kreditkarten usw. Langfristig kann auf diese Weise das *tatsächliche* Reiseverhalten aller Kunden am genauesten erfasst werden.

Spezielle Eigenschaften betreffen dann eine einzelne Reise. Dazu zählen Art und Menge des Gepäcks<sup>131</sup>, Reisetyp (Einzelreise für Urlaub oder Geschäft, Pendelreise), gebuchte Zusatzservices (Parkplatz, Hotel, Taxi-Transfers, Busanschlüsse usw.), Reservierungen auf der

---

<sup>130</sup> Versuche innerhalb eines Agentenframeworks (IBM Aglets, vgl. [IBM 2002]), alle Züge als Agenten zu modellieren, scheiterten an dem enormen Ressourcenverbrauch des Frameworks zum damaligen Zeitpunkt.

<sup>131</sup> Bspw. ist die Fahrradmitnahme nicht in allen Zügen möglich. Ebenfalls kann viel Gepäck die Beweglichkeit des Kunden stark einschränken. Ist dies bekannt, können Anschlüsse mit sehr kurzen Übergangszeiten vermieden werden; ebenso kann rechtzeitig Information über eine benötigte Hilfestellung im Zielbahnhof oder während Umsteigehalten erfolgen.

Reise und so weiter. Auch der Reisepreis bzw. die zugelassenen Zugkategorien sollten hier gespeichert werden. Günstigstenfalls wird jede Reise, d. h. jegliche Zugbenutzung während dieser, protokolliert.

Geleistet werden kann dies mittels der im System vorgesehenen Passagieragenten. Diese bilden nach außen eine einheitliche Kommunikationsschnittstelle mit dem Reisenden, und nach innen vertreten sie dessen Interessen dergestalt, dass sie für eine Routenneuberechnung bspw. auf Einhaltung der notwendigen Reiseeigenschaften achten oder auch im System direkt Umbuchungen und – durch Anmeldung bei den Zugagenten – ggf. neue Reservierungen vornehmen. Mit geeigneten Endgeräten (vgl. Abschnitt V.1.4) kann der Passagier sogar während der Reise seine Präferenzen angeben und somit in den Dispositionsprozess aktiv eingreifen.

Benutzungsschnittstellen (bzw. grafische Oberflächen) zur Interaktion mit den realen Passagieren, also dem jeweiligen Auftraggeber oder *Prinzipal* des Agenten, sollten an die derzeit gängigen Standards angelehnt sein. In Kapitel V werden dazu Gestaltungsvorschläge gemacht.

Dieses Passagiermodell ermöglicht, nach Meinung des Autors, die in Abbildung 1 dargestellte Interaktion mit Reisenden.

Für das Simulationsmodell in dieser Arbeit konnten Passagiere bei weitem nicht so detailliert dargestellt werden. So ist z. B. statt detaillierter Reiseinformationen nur eine persönliche Übergangszeit vorgesehen, welche die Fähigkeiten des Passagiers bzgl. seiner Umsteigegewindigkeit subsummiert, um das System auf wenigen PCs simulieren zu können. Für den tatsächlichen Einsatz ist jedoch die Umsetzung des gesamten Modells anzustreben, auch und gerade, um gezielt und proaktiv Passagiere im Falle von Verspätungen oder sonstigem Ungemach entschädigen zu können.<sup>132</sup>

## III.2 Simulation als Testumfeld für die kundenorientierte Disposition

Das eben beschriebene Dispositionssystem kann nicht funktionieren, ohne dass eine geeignete Systemumgebung existiert, welche das Bahnsystem abbildet, es also entweder simuliert oder kapselt.

Die Simulation als Werkzeug hat, insbesondere im Bahnbereich eine lange Tradition. Es existieren, wie bereits in Kapitel II an mehreren Stellen angedeutet, diverse Systeme, die zur Fahrplanung oder zum Test eines Fahrplans verwendet werden. So wird in [Gröger 2004] das Simulationssystem *BABSI* zur hierarchischen (asynchronen) Fahrplanung herangezogen, die dänische Staatsbahn nutzt das System *Strax/TPS* zur detailgetreuen Simulation und zur Fahrplanung, vgl. [Kaas/Goossman 2004], [Radtke/Hauptmann 2004] setzen das Simulationssystem *RailSys* ebenfalls zur Fahrplanung ein (vgl. auch [Hauptmann 2000]), und in [Vromans et al. 2004] wird mittels des Simulationssystems *SIMONE* die Fahrplanstabilität untersucht. Ebenso benutzt Barter Simulation, um die Robustheit von Fahrplänen zu untersuchen und

---

<sup>132</sup> Umgekehrt könnte natürlich auf diese Weise auch ungerechtfertigten Ersatzforderungen vorgebeugt werden.

vorherzusagen, vgl. [Barter 2004]. Ein ausgereiftes, auf Objektorientierung basierendes Simulationssystem ist schließlich das in Zürich entwickelte *OpenTrack*, vgl. [Nash/Huerlimann 2004]. Neben diesen Systemen zur Ablaufsimulation existieren diverse Systeme zur Simulation technischer Vorgänge, bspw. das System *SIMSPOG* (vgl. [Bauersfeld et al. 2004]).

In dieser Arbeit wird ein weiteres, z. T. speziell für den Test der Dispositionskomponente entwickeltes, agentenbasiertes System zur mikroskopischen Simulation der Zug- und Passagierbewegungen im Bahnnetz vorgestellt. Zunächst werden jedoch allgemeine Grundlagen der Simulation erörtert, um ein besseres Verständnis dieser Methodik und damit der Vorgehensweise in dieser Arbeit zu vermitteln. Simulationserfahrenen Lesern sei empfohlen, diesen, gleichsam als Kompendium für die diskrete, ereignisorientierte Simulation zu verstehen, Abschnitt zu übergehen.

### III.2.1 Grundlagen diskreter, ereignisorientierter Simulation

Simulation ist bereits seit Jahrzehnten ein anerkanntes, in fast allen wissenschaftlichen Disziplinen zur Analyse komplexer Systeme eingesetztes, wirkungsvolles Vorgehen. So hat beispielsweise das Militär seit Ende der 40-er Jahre großes Interesse an der Simulation, sei es in Form mathematischer Modelle zur Analyse von Atombombenversuchen oder für die Ausbildung von Piloten in physikalischen Modellen, den Flugsimulatoren.

In der Literatur existieren unterschiedliche Definitionen des Begriffs „Simulation“, je nach Autor werden andere Aspekte betont. Der Begriff „Simulation“ stammt vom lateinischen Wort „simulare“ (nachbilden, nachahmen, vortäuschen, heucheln). Allgemein definiert Witte entsprechend Simulation als einen „Vorgang, der Realität nachahmt“ ([Witte et al. 1994], S. 17). Den Akt der Modellbildung stellt Colella in den Mittelpunkt: „Simulation is the act of representing some aspects of the real world by numbers or symbols which may be easily manipulated to facilitate their study“ ([Colella 1974], S. 1).

Der Verein deutscher Ingenieure (VDI) legt in der Richtlinie VDI 3633 den Begriff Simulation als die Nachbildung „eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind“ (s. [Hille 1998], S. 41), fest.

Einen „Boom“ erlebte die Simulation mit der Verbreitung preiswerter Mikrocomputersysteme, die für relativ wenig Geld große Rechenkapazitäten bieten. Diverse Computerspiele, bspw. für das Nachspielen von Autorennen, sind Glanzbeispiele angewandter Simulation. Weniger aufwändig sind Anwendungen der Simulation im Küchenstudio, beim Autokauf oder beim Frisör, die zur Planung bzw. zu What-If-Analysen eingesetzt werden. Die weitaus meisten Simulationsmodelle entspringen jedoch wissenschaftlichen und betriebswirtschaftlichen Überlegungen. Immer dann, wenn Experimente und Messungen in der Realität zu langsam (Bevölkerungsentwicklungen), schnell (Explosionsverhalten), gefährlich (Crashtests), unmöglich (Urknall) oder teuer (Fabrikplanung) wären, empfiehlt sich der Einsatz von Simulation, da bei komplexen Realsystemen die Grenzen analytischer Methoden und Beschreibungen schnell erreicht sind. Simulation dagegen kann, eine geeignete Modellierung vorausgesetzt,

auch sehr umfangreiche Systeme handhaben und dem Anwender die Zusammenhänge der einzelnen Systemvariablen deutlich machen (vgl. [Kuhn et al. 1993], S. 1ff.). Mit Simulationsexperimenten wird das zeitliche Ablaufverhalten von Systemen abgebildet; zusätzlich kann es protokolliert, reproduziert, analysiert und interpretiert werden.

Ein Hauptziel beim Einsatz von Simulation ist die *Effizienzsteigerung des Ressourceneinsatzes*. Dabei ist Simulation bspw. in der Planung von Fertigungssystemen und Materialflüssen ein kostengünstiges Instrument (vgl. [ASIM 1988], S. 12ff.). Bei der Inbetriebnahme von Produktionsanlagen kann der Rückgriff auf die Erkenntnisse von Simulationsexperimenten die Inbetriebnahmekosten um bis zu 50 % senken (vgl. [Hille 1998]). So werden z. B. Produktionsprozesse sehr oft vor ihrer physischen Implementierung simuliert, um bspw. Pufferlager korrekt zu dimensionieren oder Ausfallraten abzuschätzen. Der Bau einer neuen Pressenstraße ohne vorherige detaillierte Simulation kann schnell zum finanziellen Fiasko werden; daher waren und sind die Automobilbauer oftmals Technologievorreiter in der Simulation. Weitere Beispiele aus der *Betriebswirtschaftslehre* sind Simulationsmodelle für Unternehmensplanspiele, Produktions- und Verkehrsplanung, Planung organisatorischer Abläufe, z. B. bei Schaltersystemen in Tankstellen, Supermärkten etc., Auslegung flexibler Fertigungs- oder Lagerhaltungssysteme oder zur Personalplanung.

Weitere Einsatzziele der Simulation liegen in der *Planungsunterstützung* und der *Prozessführung*: Qualitatives Ziel der Planungsunterstützung ist die Funktionsüberprüfung des betrachteten Systems, egal ob dieses neu zu erstellen ist oder optimiert werden soll. Die Erreichung dieses Ziels ist notwendige Voraussetzung für eine weitere Betrachtung des Realsystems: Nur für ein in sich schlüssiges, logisch konstruiertes System lassen sich valide quantitative Aussagen, (z. B. Dimensionierung von Maschinen, Transportsystemen und Personal) treffen. Zur Bestimmung geeigneter Steuerungsstrategien werden auch im Rahmen dieser Arbeit qualitative Aussagen herangezogen.

Für die Prozessführung bietet Simulation ein gutes Instrument zur Prozessverfolgung, so dass mittels Soll-/Ist-Vergleichen Störungen und Abweichungen erkannt und bewertet werden können. Weiterhin können Steuerungsstrategien zur Laufzeit angepasst und verbessert werden, was durch die Möglichkeit der Simulation unterschiedlicher Szenarien, die sich durch Variation von Variablen und Parametern ergeben, unterstützt wird. Dies erlaubt auch Sensitivitätsanalysen.

Zu guter Letzt bietet Simulation ganz allgemein Möglichkeiten zur *Systemvisualisierung*, sei in Form von Graphen, die den Verlauf von Modelloutputs darstellen, oder indem sie direkt das Systemverhalten, z. B. als Animation, demonstrieren. Dies erleichtert die Analyse komplexer Zusammenhänge ungemein und erlaubt den Einsatz von Simulationsmodellen als Schulungsinstrument.

Neben diesen Vorteilen hat Simulation auch einige Nachteile:

- Die zur Gewinnung valider Erkenntnisse über das Realsystem notwendige Isomorphie zwischen dem System und dem zu bildenden Modell ist schwer zu gewährleisten.

- Eine schlechte Datenbasis kann die Ergebnisse dramatisch verfälschen, was allerdings kein simulationsspezifischer Nachteil ist.
- Simulationsstudien sind aufwändig und damit teuer, führen aber nicht zwangsweise zum Erfolg. Zudem sind echte Simulationsexperten nicht einfach zu finden.
- Simulation wird oft als Wundermittel zur Systemverbesserung oder gar zur Optimierung missverstanden. In Wahrheit liefert Simulation jedoch im besten Fall ein Optimum unter den getroffenen Annahmen. Sind diese falsch, kann ein Modell schnell scheitern.

Es lässt sich leicht abschätzen, dass sich der Einsatz von Simulationstechniken in Zukunft mit der Verfügbarkeit schnellerer Rechner und immer leichter bedienbarer Werkzeuge weiter verstärken wird. Eine Grenze der Möglichkeiten der Simulation ist prinzipiell nicht in Sicht.

Für die vorliegende Arbeit ist die Simulation in zweierlei Hinsicht von maßgeblicher Bedeutung: erstens ist sie eine mögliche Technik zur Berechnung der Konsequenzen von Dispositionsentscheidungen, zweitens liefert sie den Methodenrahmen für die Erschaffung eines Testsystems für die kundenorientierte Disposition.

### III.2.1.1 System und Modell

Der Begriff *System* wird in den unterschiedlichsten Bereichen verwendet, wobei ein System zumeist durch seine Ziele, die enthaltenen Elemente sowie deren Beziehungen untereinander und zur Umwelt definiert wird. Systeme können wie folgt kategorisiert werden:

*Offen* sind Systeme, falls exogene Einflussgrößen existieren, *geschlossen* sind Systeme, wenn solche Einflüsse fehlen oder nicht betrachtet werden. Dabei kann unter Umständen nicht immer eindeutig determiniert werden, ob eine Einflussgröße rein exogen ist, oder ob sie nicht doch endogen steuerbar ist, wie z. B. die Einflüsse der Globalisierung auf eine Volkswirtschaft.

*Statische* Systeme zeichnen sich durch ihr zumindest temporär stabiles Verhalten aus. Sie verändern im Gegensatz zu *dynamischen* Systemen nicht die Beziehungen zwischen den einzelnen Elementen während des Betrachtungszeitraums.

Hat das Output-Verhalten eines Systems Auswirkungen auf das Input- und das interne Verhalten, existiert eine Rückkopplung. Dieses ist ein wesentliches Merkmal *kybernetischer* Systeme. Das System „Produktionsbetrieb“ ist demnach aufgrund der Rückkopplung des Vertriebs, der die Produktion über den Messwert „Absatz“ beeinflusst und steuert, kybernetisch (vgl. [Krüger 1974], S. 12ff.). Bei der Produktionsplanung und –steuerung eines fahrplangebundenen Verkehrssystems handelt es sich demnach um ein offenes, dynamisches und kybernetisches System.

Fast jedes Realsystem ist in irgendeiner Form problembehaftet (vgl. [Liebl 1995], S. 113ff.), sodass die Modellierung der problemrelevanten Bestandteile und Eigenschaften zu wünschenswerten Verbesserungen führen könnte. Die Modellierung eines Systems unterliegt jedoch verschiedenen Einflüssen, die u. U. zu einer verzerrten Darstellung führen. Diese treten bei der *Problemdiagnose*, der *Informationsbeschaffung* und der *Datenaufbereitung* auf.

Verschiedene Interessenlagen und kognitive Vorgaben<sup>133</sup> beeinflussen diese Aufgabe maßgeblich. Während der Informationsbeschaffung zur weiteren Analyse des Realsystems werden die Aussagen der einzelnen Befragten durch die folgenden Faktoren gelenkt:

- *Quantifizierungsfalle*: Bewusste Betonung nicht gesicherter Daten.
- *Antizipation der Lösung*: Eine bereits entwickelte eigene Lösung wird durch einen Anwendungsexperten propagiert; er beeinflusst den Lösungsprozess dahingehend und will letztlich nur eine Bestätigung seines Plans bekommen.
- *Exkulpation*: Negation der Probleme, da Systemteilnehmer negative Folgen für die Stellung in der Organisation befürchten.
- *Egozentrik*: Verzerrte Wahrnehmung des Systembilds; Personen vereinnahmen Probleme für sich, da sie der Auffassung sind, ihr Ressort wäre das wichtigste.

Ein Modell besitzt im Gegensatz zum Realsystem lediglich eine definierte Menge an Variablen, die das prinzipielle Verhalten eines Systems abbilden (vgl. [Smith 1968], S. 1). Dabei werden nur die relevanten Parameter und Einflussgrößen berücksichtigt. Košturiak und Gregor definieren den Begriff Modell als „ein physikalisches oder formales System, das die problemrelevanten Merkmale eines zu untersuchenden Systems beschreibt“ (s. [Košturiak/Gregor 1995], S. 6). Ein Modell soll das reale System abstrahieren und auf die Fragestellung schnell eine aussagekräftige Antwort geben. Bei der Modellerstellung darf nie das Ziel der Untersuchung aus den Augen gelassen werden; ein Modell allein besitzt keine Existenzberechtigung.

Modelle lassen sich wie folgt klassifizieren:

- *Deterministisch/stochastisch*: Wenn der Eintritt einer Zustandsänderung mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit behaftet ist, heißt ein Modell *stochastisch*. Dabei werden verschiedene Wahrscheinlichkeitsverteilungen empirischer oder theoretischer Art verwendet, um das reale Verhalten möglichst gut nachzuahmen. Störungen in Produktionsabläufen treten z. B. erfahrungsgemäß oft exponentialverteilt auf, ebenso Bearbeitungszeiten, z. B. von Telefonanrufen. Diese Verteilung wird im unten beschriebenen Simulationsmodell zur Abbildungen der Verspätungen im Bahnsystem benutzt.
- *Diskret/kontinuierlich*: Ändern sich Systemvariablen und –zustände diskret, heißt ein Modell diskret, ansonsten kontinuierlich (vgl. [Liebl 1995], S. 9). Kontinuierliche Simulationsmodelle werden oft in der Volkswirtschaftslehre (Bestimmung von Gleichgewichtszuständen) oder auch bei der Entwicklung von Hardware-Komponenten (Abbildung thermischer Prozesse) verwendet. In diskreten Modellen besitzen Systemvariable fest definierte Zustände, zwischen denen sie wechseln können. Diese unterschiedlichen Zustände beschreiben das Verhalten der Elemente in den Ausprägungen *Frei*, *In Arbeit*, *Blockiert*, *Wartend* und *Unterbrochen*. Neben der strikten Trennung von diskreter und kontinuierlicher Simulation existiert auch

---

<sup>133</sup> Dazu zählen Grundhaltung, Werte, Vorurteile und Erwartungen der betroffenen Person.

die Möglichkeit, beide Typen zu kombinieren. So unterscheidet Pidd ein Simulationsmodell in vier Kategorien (kontinuierlich oder diskret, jeweils zu jedem Zeitpunkt oder nur zu diskreten Zeitpunkten (vgl. [Pidd 1998], S. 21).

- *Fixe oder variable Zeitinkremente:* Die Zeitsteuerung während einer Simulation kann mittels fixer oder variabler Zeitintervalle geschehen. Für die diskrete Simulation von Systemen hat sich i. d. R. die variable Zeiteinteilung als vorteilhaft herausgestellt. Dabei wird die Simulationszeit mit den Eintrittszeitpunkten aufgetretener Ereignisse inkrementiert. Die Alternative besteht darin, jeweils um ein festes Zeitintervall (z. B. eine Minute) zu inkrementieren, und dann alle eingetretenen Zustandsänderungen und deren Abhängigkeiten zu bestimmen. Die letztere Art der Zeitsteuerung ist leichter zu implementieren. Probleme treten jedoch auf, wenn viele Ereignisse unterschiedlich große Abstände haben. Dann wird durch „Totzeiten“ (vgl. [Mehl 1994], S. 3 oder [Schmerler 1998], S. 6f.) oder durch eine aufwändige, aber notwendige *Sequenzialisierung* und *Synchronisation* (s. u.) der aufgetretenen Ereignisse, welche die Ausführbarkeit auf Einprozessormaschinen bzw. die Kausalität<sup>134</sup> sicherstellen, Rechenzeit verschwendet<sup>135</sup>. Für die Bahnsimulation wurden trotzdem fixe Zeitinkremente von einer Minute gewählt, da die Minute die Basis-einheit des Fahrplans darstellt. Für die Realisierung einer variablen Zeitsteuerung existieren verschiedene Ansätze, die hier nicht weiter betrachtet werden sollen, vgl. dazu [Liebl 1995], S. 90ff.
- *Stationär/nicht stationär:* Stationäre Modelle werden i. Allg. nach einer Einschwingphase in einen gleichgewichtigen Zustand eintreten. In diesem sind Outputvariable nicht mehr trendbehaftet, wobei sie jedoch durchaus eine hohe Varianz aufweisen können. Die Einschwingphase kann die Outputgrößen positiv oder negativ verzerren, sodass sie ggf. entfernt werden muss. Sie resultiert aus dem Anfangszustand des Modells, in dem alle Warteschlangen und Bearbeitungsstationen noch ungefüllt sind, also noch nicht die Auslastungsquoten des stationären Zustands aufweisen. Stationäre Modelle haben prinzipiell einen unendlichen Zeithorizont, im Gegensatz zu den nicht stationären. Diese weisen oftmals Strukturbrüche während ihres Ablaufs auf (z. B. variierende Ankunftsraten) oder haben ein natürliches Ende, welches den Eintritt des stationären Zustands verhindert. Ob ein Modell als stationär oder nicht stationär simuliert wird, hängt stark vom jeweiligen Untersuchungszweck ab. Es kann durchaus sinnvoll sein, ein nicht stationäres System, z. B.

---

<sup>134</sup> „Ein Ereignis  $e_2$  heißt kausal von  $e_1$  (daten-) abhängig (geschrieben:  $e_1 \rightarrow e_2$ ), wenn der Zeitstempel von  $e_1$  kleiner als der von  $e_2$  ist und  $e_1$  eine Zustandsvariable verändert, die von  $e_2$  gelesen wird,  $e_1$  eine Zustandsvariable liest, die von  $e_2$  verändert wird,  $e_1$  eine Zustandsvariable verändert, die auch von  $e_2$  verändert wird, oder es ein Ereignis  $e_x$  gibt, derart dass  $e_1 \rightarrow e_x$  und  $e_x \rightarrow e_2$  (Transitivität) vorliegt.

Gilt  $e_1 \rightarrow e_2$ , dann muss  $e_1$  vor  $e_2$  ausgeführt werden. Die Ausführung in umgekehrter Reihenfolge  $e_2e_1$  würde i. a. ein anderes Ergebnis liefern.“ (s. [Mehl 1994], S. 17)

<sup>135</sup> Abhilfe kann lediglich durch die Verkleinerung des Zeitinkrements auf das kürzestmögliche Intervall zwischen zwei Ereignissen erzielt werden, was den Rechenaufwand aber noch stärker wachsen lässt.

ein Kommunikationsnetz, mittels stationärer Simulation auf das Verhalten während Lastspitzen zu untersuchen.

### III.2.1.2 Ablauflogik diskreter, ereignisorientierter Simulation

In Abbildung 24 ist der prinzipielle Ablauf eines Simulationsprogramms für die diskrete, ereignisorientierte Simulation nach Law und Kelton wiedergegeben (vgl. [Law/Kelton 2000]). Nach der Initialisierung des Systems und aller Zählvariablen werden sukzessive die Subroutinen für die auftretenden Ereignisse aufgerufen. Dabei ist es unerheblich, welche Art der Zeitsteuerung gewählt wurde. Innerhalb dieses Ablaufs wird auf die benötigten Zusatzfunktionen, bspw. zum Warteschlangenmanagement oder zur Generierung von (Pseudo-) Zufallszahlen, zurückgegriffen.

Sind alle Ereignisse abgearbeitet und/oder eine Endbedingung erfüllt, werden statistische Auswertungen vorgenommen und Reports generiert, die zusätzlich beliebig graphisch aufbereitet werden können. Die Endbedingung kann bspw. durch ein natürliches Endereignis (z. B. Schalterschluss) erfüllt werden oder wird durch das Erreichen einer bestimmten Länge des Simulationslaufs wahr. Letzteres ist sehr oft bei stationären Simulationsmodellen der Fall, bspw., wenn eine bestimmte Schätzgenauigkeit für einen Parameter erreicht wurde.

Das in Abschnitt III.2.2 vorgestellte Simulationsmodell funktioniert auf eben diese Art und Weise.

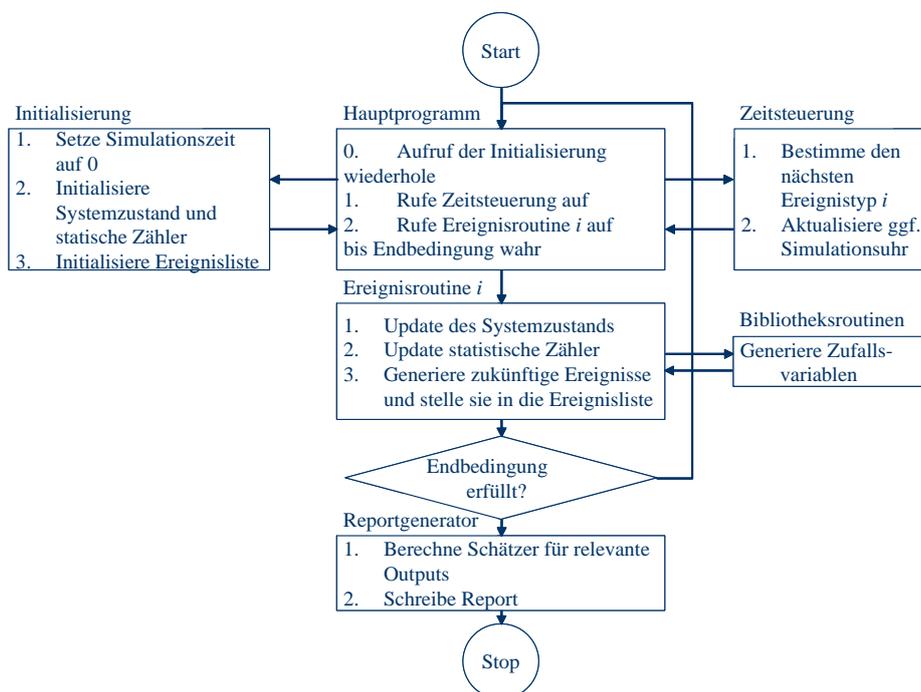


Abbildung 24: Ablauf eines diskreten, ereignisorientierten Simulationsmodells (vgl. [Law/Kelton 2000])

### III.2.1.3 Parallele und verteilte Simulation

Wie viele andere rechenintensive Aufgaben auch, können große Simulationsmodelle durch eine geeignete Parallelisierung bzw. Verteilung auf verschiedene Prozessoren in ihrer Laufzeit

verkürzt werden; außerdem steht auf diese Weise mehr Hauptspeicher zur Verfügung (vgl. [Banks et al. 1996], [Fishwick 1995], [Liebl 1995] oder [Page 1991]).

Die „parallele und verteilte Simulation“ (vgl. [Fujimoto 2000]) kann dabei auf verschiedene Arten genutzt werden, um einen Simulationslauf zu beschleunigen:

Eine bloße Verteilung häufig benötigter Routinen (Generierung von Pseudozufallszahlen, statistische Berechnungen, usw.) auf andere Prozessoren (vgl. [Mehl 1994], S. 7) kann bereits sequenzielle Simulationsmodelle ohne Auswirkungen auf die Modellierung beschleunigen. Weitere Geschwindigkeitssteigerungen sind darüber hinaus nur zu erzielen, wenn das Modell selbst verteilt wird, also verschiedene Ereignisse desselben Laufs auf unterschiedlichen Prozessoren berechnet werden. Die so entstehenden Submodelle werden jeweils von einem eigenen ereignisgesteuerten Simulator ausgeführt und als *logische Prozesse* (LP) bezeichnet.

Damit die Simulation tatsächlich beschleunigt wird, ist folgendes zu beachten (vgl. [Mehl 1994], S. 9ff.):

- *Wenig Kommunikation* zwischen logischen Prozessen sollte Modellierungsziel sein. Die jeweilige Modellierung ist stark vom betrachteten Problembereich abhängig, allgemeine Regeln zum Vorgehen bei der Parallelisierung existieren nicht. Im unten beschriebenen Bahnmodell wird daher eine parallele Abarbeitung unterschiedlicher Regionen gewählt.
- Das *Mapping* zwischen zur Verfügung stehenden Prozessoren und den logischen Prozessen ist zu optimieren. So kann es sinnvoll sein, zwei stark kommunizierende Prozesse demselben Prozessor zuzuordnen, wenn kein genügend schnelles Netzwerk zur Verfügung steht. Das Mapping kann dabei statisch sein (vor Beginn wird eine Zuordnung festgelegt) oder dynamisch zur Laufzeit erfolgen, sodass logische Prozesse im Netz migrieren können, falls ein Prozessor überlastet ist.
- Bedient ein Prozessor mehrere logische Prozesse, ist ein *Scheduling* der Einzelprozesse erforderlich. Auch dieses kann statisch (zu Beginn vorgegebene Strategie) oder dynamisch (unter Berücksichtigung des Systemverhaltens) erfolgen.
- Die schwierigste Aufgabe der parallelen Simulation ist es, eine geeignete Synchronisation verteilt ausgeführter Ereignisse sicherzustellen, also die Kausalität der Ereignisse zu erhalten. Ein überbordender Synchronisationsaufwand kann offensichtlich Parallelisierungsgewinne kompensieren. Verfahren zur Synchronisation lassen sich unterteilen in *konservative*, *optimistische* und *hybride* Methoden.

#### III.2.1.3.1 Konservative Synchronisationsmethoden

Konservative Synchronisationsmethoden (vgl. [Ferscha 1996], [Mehl 1994], S. 16ff. oder [Fujimoto 2000], S. 51ff.) vermeiden Kausalitätsverletzungen apriorisch. Dies geschieht, indem nur solche Ereignisse ausgeführt werden, für die sicher bekannt ist, dass der ausführende Prozess keine Ereignisse mit früherem Zeitstempel mehr bekommt.

Bei diesem Vorgehen kann es zu Deadlocks kommen, nämlich dann, wenn kein logischer Prozess mehr sichere Ereignisse ausführen kann.

Diese Deadlocks gilt es entweder zu vermeiden, oder zu erkennen und aufzulösen. *Deadlock-vermeidende Synchronisationsverfahren* verwenden dazu (ggf. nur gegen Anforderung gesendete) Nullnachrichten zum Austausch der jeweiligen Zeitstempel (vgl. [Fujimoto 2000], S. 54ff.). Dieses kann – bei vielen notwendigen Nullnachrichten – sehr kommunikationsaufwändig sein.

Bei *Deadlock-erkennenden und –behebenden Synchronisationsverfahren* läuft das System solange, bis alle logischen Prozesse zum Stillstand gekommen sind (vgl. [Fujimoto 2000], S. 60ff.). Anschließend wird versucht, den Deadlock zu beheben. Dieses Verfahren wurde von Chandy und Misra in [Chandy/Misra 1981] vorgeschlagen. Das Erkennen des Deadlocks ist dabei nicht trivial. Eine Möglichkeit dazu ist das tokenbasierte *Farbenspiel* (vgl. [Misra 1986]). Nachdem ein Deadlock erkannt wurde, kann das Ereignis mit dem kleinsten Zeitstempel gesucht und ausgeführt werden. Unter Umständen reicht dies nicht aus, um das komplette System „wiederzubeleben“, sodass weitere kausal unabhängige Ereignisse gesucht und ausgeführt werden müssen.

#### III.2.1.3.2 Optimistische Synchronisationsverfahren

Optimistische Synchronisationsmethoden (vgl. [Fujimoto 1990], S. 40ff.; [Mehl 1994], S. 45ff. oder [Ferscha 1996], S. 1015ff.) lassen im Gegensatz zu den konservativen Synchronisationsmethoden mögliche Verletzungen der Kausalität zunächst zu und beheben diese gegebenenfalls später. Nach Erkennen einer Verletzung werden diese durch einen Zeitsprung (*Timewarp* oder *Rollback*, vgl. [Jefferson 1985]; [Jefferson/Sowizral 1982] oder [Leivent/Watro 1993]) in die Simulationsvergangenheit aufgelöst. Auf diese Weise wird kein Prozess unnötig blockiert, weil kein Deadlock auftreten kann. Der Zeitsprung scheint theoretisch nicht trivial durchführbar, jedoch konnte empirisch belegt werden, dass das Timewarp-Verfahren oft effizienter als die konservative Synchronisation ist (vgl. [Fujimoto 1990]). Da es jedoch komplizierter zu implementieren ist, einen u. U. sehr hohen Speicherbedarf hat und zudem im Worst Case sehr ineffizient ist, wurde das unten vorgestellte Simulationsmodell mit einem konservativen Verfahren implementiert.

#### III.2.1.3.3 Hybride Synchronisationsverfahren

Hybride Synchronisationsmethoden sind letztlich eine Kombination aus konservativen und optimistischen Verfahren. Dabei sollen die Vorteile beider Ansätze erhalten und die jeweiligen Nachteile vermieden werden (vgl. [Mehl 1994], S. 97ff.; [Lubachevsky et al. 1991] oder [Rajaei et al. 1993]). Es können horizontal und vertikal hybride Systeme unterschieden werden, auf die jedoch hier nicht weiter eingegangen werden soll.

#### III.2.1.4 Softwaresysteme zur Simulation

Simulationswerkzeuge dienen in erster Linie der Unterstützung der Durchführung von Simulationsstudien. Prinzipiell kann zwischen allgemeinen und speziellen Werkzeugen unterschieden werden.

Zu allgemeinen Werkzeugen ist jede Programmiersprache (z. B. Fortran, C, C++, C#, Pascal, Delphi, JAVA etc.) zu zählen. Je nach Komplexität des Systems und spezieller Anforder-

rungen an z. B. Geschwindigkeit oder Speichereffizienz kann es notwendig werden, ein Simulationsmodell direkt in einer dieser Sprachen zu erstellen. Für die meisten Programmiersprachen liegen mittlerweile leistungsstarke Funktions- bzw. Klassenbibliotheken vor, die die Implementierung von Simulationssystemen erheblich erleichtern. Auch viele spezielle Simulationssysteme basieren auf „normalen“ objektorientierten Programmiersprachen, so dass sie mittels Hinzufügen eigener Klassen erweitert werden können.

Zusätzlich gibt es spezielle Werkzeuge zur Erstellung von Simulationsprogrammen. Dies sind zum einen für die besonderen Anforderungen der Simulation konzipierte Simulationssprachen, z. B. Simscript, GPSS, Simula oder MODSIM. Zusätzlich existieren visuelle Systeme, die mit grafischen Elementen die Erzeugung von Simulationsprogrammen unterstützen (z. B. Simprocess, eM-Plant [ehemals Simple++], Arena etc.). Bei diesen Systemen wird das Simulationsmodell per Drag and Drop aus Bausteinen zusammengesetzt. Die Abgrenzungen zwischen den einzelnen Kategorien verschwimmen insofern, als dass bspw. in Arena auch eigene, in einer konventionellen Programmiersprache erstellte, Module integriert werden können.

Jede Simulationsumgebung sollte bestimmte Grundfunktionalitäten zur Verfügung stellen. Zu diesen zählen Generierung von Zufallszahlen unterschiedlichster Verteilungen, Management der Simulationszeit (diskret/kontinuierlich), Ereignishandling, Warteschlangenmanagement, Datensammlung, Datenanalyse und Reportgenerierung. Weitere Qualitätsaspekte, die einen entscheidenden Einfluss auf die Handhabbarkeit haben, sind Portierbarkeit sowie Art und Qualität der Dokumentation.

Im Allgemeinen gilt ein in einer Programmiersprache direkt umgesetztes Modell aufgrund der niedrigeren Abstraktion als viel zeit- und ressourcenaufwändiger in der Entwicklung, aber auch weitaus performanter als ein (visuelles) Simulationstool. Dies wurde auch durch die Erfahrungen in der vorliegenden Arbeit bestätigt: Erste Versuche, das Bahnsystem mittels eines kommerziellen Werkzeugs zu simulieren, scheiterten am enormen Rechenzeitbedarf. Daher wurde entschieden, das System komplett in JAVA zu entwickeln, aber eben unter Zuhilfenahme einer Simulationsbibliothek. Sehr rechenintensive Module wurden in C++ implementiert.

### III.2.1.5 Vorgehensmodelle für Simulationsstudien

Eine Simulationsstudie kann durchaus wie ein „normales“ Projekt betrachtet werden. Die Anwendung eines strukturierten Vorgehens ist folglich ebenso wichtig wie in jedem anderen Projekt. Von Anfang an müssen dabei Fehler im Projektablauf vermieden und gemeinsam mit dem Auftraggeber abgestimmte Zielsetzungen konsequent verfolgt werden.

Law und Kelton haben ein Modell zur Durchführung einer Simulationsstudie vorgeschlagen, anhand dessen nachfolgend einige grundlegende Begrifflichkeiten erläutert werden sollen (vgl. [Law/Kelton 2000]).

In Abbildung 25 werden die zehn Schritte des Vorgehensmodells und die definierten Rückkopplungen zwischen diesen dargestellt.

1. *Vorstudie*: Zunächst muss eine genaue Problemdefinition durch und mit dem Auftraggeber erfolgen. Es wird ein Kickoff-Meeting mit Projektleiter, Simulations- und Anwendungsexperten initiiert, in dem die Ziele und spezifische Fragestellungen der Studie, relevante Kennzahlen, der Umfang des Modells, die zu modellierenden Systemkonfigurationen, der Zeitplan und die zur Verfügung stehenden Ressourcen inkl. Der zu benutzenden Simulationsumgebung<sup>136</sup> festgelegt werden.
2. *Konzeptuelle Modellierung und Datensammlung*: Informationen über die Systemstruktur und –abläufe müssen unter Zuhilfenahme diverser Erhebungstechniken gesammelt werden. Ebenfalls sehr früh sollten repräsentative Input-Daten erhoben werden, weil mit deren Vorhandensein die Studie steht und fällt. Die gesammelten Informationen sollten in einem „Annahmen-Dokument“ festgeschrieben werden, welches Law und Kelton als *konzeptuelles Modell* bezeichnen. Die Modellgenauigkeit wird dabei von Projektzielen, Leistungskennzahlen, Datenverfügbarkeit, Meinungen der Anwendungsexperten, Zeit und Geld etc. beeinflusst. Zu diesem Zeitpunkt sollte noch nicht zu sehr ins Detail gegangen werden, vielmehr sollte die Information aussagekräftig und für alle verständlich sein. Reguläre Besprechungen mit dem Auftraggeber fördern das Verständnis für die Simulation als Methodik.
3. *Validierung*: In dieser Phase wird die Frage nach der Gültigkeit des konzeptuellen Modells gestellt. Dies kann bspw. mittels strukturierter Modellüberprüfungen, welche von den beteiligten Experten gemeinsam durchgeführt wird, erfolgen. Dabei sollte der Auftraggeber für das Modell mitverantwortlich gemacht werden, noch bevor die eigentliche Programmierung stattfindet. Ist das Modell nicht valide, wird zu Schritt 2 zurückgesprungen.
4. *Implementierung*: Das Modell wird in der gewählten Entwicklungsumgebung umgesetzt. Das entstehende Programm muss anschließend verifiziert werden, um zu garantieren, dass das Simulationsprogramm (technisch) korrekt läuft.
5. *Testläufe*: Das Simulationssystem wird mit echten Daten getestet, die bspw. aus existenten, vergleichbaren Systemen stammen oder plausibel generiert wurden. Dieser Schritt dient hauptsächlich zur Vorbereitung des nächsten Schritts.
6. *Validierung des implementierten Modells*: Nochmals betonen Law und Kelton die Feststellung, dass das Simulationssystem die Realität korrekt abbildet. Techniken der Validierung können differenziert werden in
  - a. *funktionsbezogene Validierung*: Die Reaktionsweise des Modells wird mit unterschiedlichen Parameterwerten und Umwelteinflüssen getestet. Validität ist dann letztlich misslungene Falsifizierung des Modells.

---

<sup>136</sup> Nach Meinung des Autors sollte diese Auswahl eher später in der Studie erfolgen. Sie erleichtert zwar ein Rapid Prototyping, schränkt aber u. U. Entwicklungsmöglichkeiten ein.

- b. *ergebnisbezogene Validierung*: Ergebnisse des Simulationssystems werden mit den Leistungskennziffern des Realsystems mittels statistischer Methoden verglichen, falls dieses existiert. Wenn nicht, bleibt die
- c. *theoriebezogene Validierung*: Die Simulationsergebnisse werden mit den theoretisch zu erwartenden Resultaten verglichen.

In jedem Fall sollten Anwendungs- und Simulationsexperten auf die Korrektheit achten. Es gibt nach Law und Kelton zum einen keinen „richtigen Weg“, ein noch nicht existentes System zu validieren, zum anderen gebe es nur sehr wenige „echte“ Validierungstechniken. Sinnvoll seien in jedem Fall Expertengespräche und eine gute Dokumentation. Kein nichttriviales Modell kann jemals total validiert werden.

Durch gezieltes Verändern der Inputdaten kann außerdem eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden, um die wirklich relevanten Inputfaktoren zu determinieren und damit die nachfolgende Experimentation zu verkürzen.

Auch nach der erneuten Validierung ist ein Rücksprung vorgesehen, falls das Modell nicht standhält.

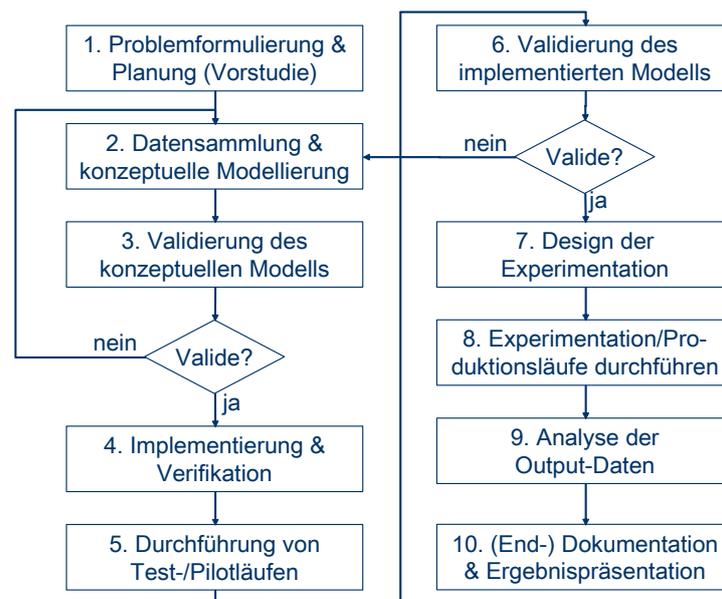


Abbildung 25: „Steps of a sound simulation study“ (vgl. [Law/Kelton 2000], S. 84)

- 7. *Experimentationsdesign*: Für jede zu untersuchende Systemkonfiguration werden die Länge des Simulationslaufes und der Anlaufphase sowie die Anzahl der unabhängigen Laufwiederholungen (Replikationen) spezifiziert. Dabei kann die Zahl der Replikationen durch die Kombinatorik bei vielen zu untersuchenden Einflussgrößen leicht prohibitiv groß werden, um in der geplanten Zeit zu den gewünschten Ergebnissen zu gelangen. Ein gutes Design ist also für den Erfolg der Studie von zentraler Bedeutung.
- 8. *Produktionsläufe durchführen*: Die Produktionsläufe sollten sorgfältig protokolliert werden, um anschließend die gewünschten Analysen durchführen zu können.

9. *Outputanalyse*: Hauptziele sind oft die Bestimmung absoluter Leistungskennzahlen von Systemen, der Vergleich verschiedener Konfigurationen oder die Optimierung des Vektors der Inputfaktoren. Letzteres ist das weitaus schwierigste Ziel, wird aber mittlerweile durch einige Softwarepakete unterstützt, welche mittels Optimierungsalgorithmen die Inputfaktoren derart variieren, dass die Outputzielgröße iterativ verbessert wird.
10. *Dokumentation, Ergebnispräsentation*: Die Dokumentation sollte eigentlich studienbegleitend durchgeführt werden. Alle Annahmen, das entwickelte Simulationssystem sowie die Ergebnisse müssen sehr gut dokumentiert und dem Auftraggeber präsentiert werden. Die Ergebnisse müssen dabei sowohl valide als auch glaubwürdig sein.

Anschließend gilt es, die gewonnenen Erkenntnisse auf das Realsystem zu übertragen. Neben der Dokumentation muss es selbstverständlich weitere übergreifende Tätigkeiten geben, die jedoch nicht im Ursprungsmodell genannt sind, bspw. ein Projektmanagement.

### III.2.2 Das Simulationstestbed „TrainSim“

Die nachfolgend vorgestellte Testumgebung des Systems zur kundenorientierten Disposition, ein Simulationssystem für den fahrplanbasierten Personenverkehr, wurde in Vor- und Parallelarbeiten am Dispositionsstrategie & OR Lab der Universität Paderborn in Zusammenarbeit mit J. Goecke entwickelt. Die dabei zu lösenden Probleme waren beträchtlich, bspw. mussten vielfach plausible Annahmen zur Generierung geeigneter Passagierdaten getroffen werden, da zum einen keine vollständige OD-Matrix (vgl. Abschnitt II.3) zur Verfügung stand und diese zum anderen auch für eine Mikrosimulation, d. h. die Simulation jedes Individuums, nicht genügend Information geliefert hätte. Obwohl dies impliziert, dass die in den Experimentationsergebnissen in Kapitel 4 getroffenen quantitativen Aussagen letztlich nicht per se auf das reale deutsche Bahnsystem übertragen werden können, bleiben die qualitativen Ergebnisse aufgrund der Generierung der einzelnen Passagierinformation erhalten.

Zugrunde liegt ein diskretes, ereignisorientiertes Simulationsmodell, wobei sich Zustandsänderungen im Modell durch die verschiedenen Fahrplanereignisse ergeben. Wie im Realsystem können zu diesen Zeitpunkten Züge in die Bahnhöfe ein- und ausfahren und Passagiere in Züge einsteigen oder diese verlassen<sup>137</sup>. Zusätzlich existieren Ereignisse, die das Fahren eines Zugs von einem Streckenabschnitt zum nächsten modellieren. Diese werden je nach Route des Zugs generiert.

Nachfolgend werden die Modellbestandteile und diese betreffende Annahmen, soweit sie von den oben beschriebenen Entitäten des konzeptuellen Modells signifikant abweichen, beschrieben. Im Anschluss werden relevante Details zum Simulationsablauf, zur Verteilung des Modells und schließlich zu dessen Abweichungen vom realen System dargestellt.

Das so erstellte Modell wurde validiert, indem die getroffenen Annahmen in Gesprächen mit Mitarbeitern der Deutschen Bahn AG als sinnvoll erachtet wurden. In diesem Sinn hat

---

<sup>137</sup> Dabei ist das Umsteigen nur ein Spezialfall, nämlich eine Verkettung der Ereignisse Aus- und Einsteigen.

also eine Validierung durch Anwendungsexperten stattgefunden, obwohl ein Modell dieser Art nicht vollständig validiert werden kann. Auf Implementierungsdetails soll an dieser Stelle weitgehend verzichtet werden.

### III.2.2.1 Entitäten bzw. Agenten des TrainSim-Modells

Nachfolgend werden die wichtigsten Details zu den oben ermittelten und beschriebenen Entitäten des konzeptuellen Modells näher erläutert. Die zahlenmäßig größte Gruppe stellen die Passagiere, deren Modellierung und Generierung zunächst betrachtet werden.

#### III.2.2.1.1 Passagiere und deren Verhalten

##### *III.2.2.1.1.1 Passagiergenerierung*

Ein Passagier wird im Wesentlichen durch eine bestimmte Route durch das System definiert. Diese wiederum besteht aus einem Start- und einen Endbahnhof und ggf. Zwischenstationen sowie den jeweiligen Ankunfts- bzw. Abfahrtszeiten.

Weitere Eigenschaften eines Passagiers sind für die Simulation nur bedingt von Bedeutung. So kann der Typ des Passagiers (Pendler, Gelegenheitsreisender etc.) zwar evtl. bei einer Verwendung dedizierter Nutzenfunktionen (vgl. Kapitel IV) interessant werden, da dies aber im konzeptuellen Modell aufgrund des hohen Rechenaufwands ausgeschlossen wurde, wird diese Idee hier nicht weiter verfolgt. Auch wird bspw. der Preis der Reise vernachlässigt, da er nur im Vergleich zu alternativen Verkehrsmitteln bewertet werden kann. Die Reise wird vielmehr schon im Vorfeld als sinnvoll erachtet. Lediglich die Pünktlichkeit des jeweiligen Passagiers beeinflusst als einziges objektiv messbares Kriterium dessen Zufriedenheit.

Zur Generierung der Passagierdaten werden lediglich folgende Daten verwendet:

- *Fernverkehrreisende*: Fernverkehrreisende reisen zwischen 50 km und 800 km im Netz der Deutschen Bahn AG. Ihr prozentualer Anteil liegt bei ca. 6,8 %.
- *Nahverkehrreisende*: Nahverkehrreisende reisen zwischen 1 km und 50 km, wobei sie zu einem hohen Prozentsatz die Rückreise am gleichen Tag wieder antreten. Ihr prozentualer Anteil liegt bei ca. 93,2 %<sup>138</sup>.
- *Anzahl Pendler pro Tag*: Pendler reisen zwischen 1 km und 300 km und treten die Rückreise am selben Tag nach sechs bis zwölf Stunden wieder an. Es gibt in etwa eine halbe Million Pendler am Tag, bspw. nach [Mikrozensus 2000], S. 41, 525.589 Pendler.

Die einzelnen Gruppen unterscheiden sich nur durch Reiseentfernung und Reishäufigkeit:

Dem Statistischen Bundesamt zufolge beträgt die Gesamtzahl Passagiere pro Jahr ca. 2 Mrd. Täglich fahren demnach ca. 5,5 Mio. Menschen mit dem Zug (vgl. [Stat. Bundesamt 2005]). Pendler werden getrennt betrachtet und müssen für die Berechnung der Nah- und

---

<sup>138</sup> Die prozentualen Anteile stammen aus Quellen des Bundesamtes für Statistik und können als eine Microsoft Excel Tabelle im Internet Statistik Shop im Bereich Downloads/Wirtschaftsbereiche/Verkehr und Nachrichtenübermittlung bezogen werden (vgl. [Stat. Bundesamt 2003])

Fernverkehrreisenden herausgerechnet werden. Es bleiben ca. 4,4 Mio. Passagiere im „Normalverkehr“. Dabei entfallen auf den Fernverkehr ca. 300.000 Passagiere pro Tag, auf den Nahverkehr entsprechend 4,1 Mio. Passagiere pro Tag bei ca. einer Million Pendlern, wenn Hin- und Rückfahrt getrennt betrachtet werden.

Diese Informationen zugrunde gelegt, wurde folgendes Vorgehen zur Erstellung der benötigten Routeninformation gewählt:

Zuerst werden die Bahnhöfe des Fahrplans Gemeinden zugeordnet, um das Passagierpotenzial der einzelnen Bahnhöfe zu bestimmen. Dies geschieht mit Hilfe der Postleitzahlen der Bahnhöfe und den Gemeindedaten des Statistischen Bundesamtes: Die gemeldeten Einwohner einer Gemeinde werden gleichmäßig auf die in der Gemeinde liegenden Bahnhöfe verteilt. Eine realistischere Verteilung könnte dabei mittels einer weitergehenden Analyse über die genauen Größen der Bahnhöfe in Großstädten erzielt werden. Da je nach Quelle die Größenangaben einzelner Bahnhöfe stark schwanken und auch die Anzahl Halte an einem Bahnhof nicht ohne weiteres herangezogen werden kann<sup>139</sup>, ist dieses Vorgehen gerechtfertigt.

Die einzelnen Passagiertypen werden ausgehend von ihren Startbahnhöfen wie folgt berechnet:

1. Fernverkehrreisende starten gleichmäßig über einen Tag verteilt. Für die Fahrtdauer wird für jeden Passagier eine Dreiecksverteilung unterstellt; ein Passagier fährt minimal 50 Minuten, am häufigsten 180 Minuten und maximal 600 Minuten. Mit der jeweiligen Zufallszahl aus dieser Verteilung, d. h. der jeweiligen Fahrtdauer, wird für jeden Passagier eine nach dem Fahrplan mögliche Reise, die keine Kreise enthält, berechnet. Dafür wird der in III.1.7 vorgestellte Passagierrouter eingesetzt.  
140
2. Die Nahverkehrreisenden starten ebenfalls gleichmäßig über einen Tag verteilt. Die Berechnung erfolgt analog zu den Fernverkehrreisenden, allerdings wird die Fahrtdauer dreiecksverteilt mit den Parametern 10, 25 und 50 Minuten angenommen. Außerdem wird bestimmt, dass 85 % der Passagiere ihre Rückreise am selben Tag antreten, wobei die Aufenthaltsdauer ebenfalls dreiecksverteilt (Parameter 60, 120 360 Minuten) geschätzt wird. Für diesen Anteil der Passagiere wird der kürzeste Rückweg nach ihrem Aufenthalt berechnet. Dieser ist nicht in jedem Fall ermittelbar, daher ist die Prozentzahl der Passagiere, welche ihre Rückreise am selben Tag antreten, kleiner als 85 %.
3. Pendler schließlich starten ihre Reise gleichverteilt zwischen 0 Uhr und 12 Uhr. Ihr Aufenthalt und ihre Fahrtdauer werden ebenfalls dreiecksverteilt (240, 480 und 720 Minuten bzw. 10, 70 und 150 Minuten) angenommen. Ansonsten werden sie wie die

<sup>139</sup> An Eisenbahnknotenpunkten halten zwar sehr viele Züge, der Passagierumschlag ist aber vergleichsweise gering. Umgekehrt ist bspw. Berlin Zoologischer Garten volumenmäßig sehr groß, die Anzahl Halte ist aber vergleichsweise gering.

<sup>140</sup> Die Alternative wäre die Verwendung der bahneigenen Routensuche im Internet. Überlegungen in diese Richtung wurden jedoch aus Effizienz- und Konsistenzgründen verworfen.

Rückreisenden im Nahverkehr ermittelt. „Gleichverteilt“ bezieht sich dabei auf die Ereignisse im Bahnsystem, deren Dichte gegen 5.30 Uhr beginnt zuzunehmen, dann gegen 8 bis 9 Uhr einen Höhepunkt erreicht und danach wieder abnimmt bis zur Mittagszeit, sodass in allen Zügen ein ähnlicher Anteil Pendler sitzt.

Die Anzahl der an einem Bahnhof startenden Personen ergibt sich aus dem Einzugsbereich des Bahnhofs, wobei zu berücksichtigen ist, dass, werden allen Bahnhöfen die einzelnen Gemeinden zugeordnet, nur ca. 61,5 Mio. Einwohner dieser Gemeinden, direkten Zugang zum Netz der Deutschen Bahn haben. Dies entspricht nur ca. 75 % der Gesamtbevölkerung. Die Anzahl der an einem Bahnhof startenden Personen wird dementsprechend erhöht.

### III.2.2.1.1.2 *Passagierverhalten*

Aufgrund der großen Anzahl der Passagiere werden diese – im Gegensatz zum konzeptuellen Modell – in der Simulation passiv modelliert, d. h. sie werden ihrer Route entsprechend von den Zügen aus Bahnhöfen abgeholt und dort wieder abgesetzt. Dies geschieht mittels Passagierverwaltungen, die für alle Züge und Bahnhöfe implementiert wurden und die den Transfer der Passagiere zwischen den Zügen und Bahnhöfen gewährleisten. Diese Verwaltungen „reichen sich also die involvierten Reisenden nach Bedarf weiter“.<sup>141</sup>

Wird eine geplante Route verspätet, und verpasst ein Passagier dadurch einen Anschluss, ermittelt der Disponent eine alternative Route unter Zuhilfenahme des Passagierrouters. Die Passagiere können die alternative Route akzeptieren, sie ablehnen und das System verlassen oder einen neuen Zielbahnhof anzugeben. Für diesen wird dann eine neue Route gesucht.

Wie im Realsystem sind Passagiere aus Sicht der Simulation temporäre Entitäten: Sie treten zu einem bestimmten Zeitpunkt in das Modell ein, durchlaufen die ihnen zugewiesenen permanenten und temporären Bestandteile und verlassen dann das System wieder. Ebenfalls zu den temporären Entitäten zählen die Züge.

#### III.2.2.1.2 Züge

Die Route eines Zugs ergibt sich, wie im Realsystem, direkt aus den Ereignissen des Fahrplans, wonach ein Zug zu einer bestimmten Uhrzeit an einem Bahnhof startet, ausfährt, einfährt oder endet. Der physikalische Weg zwischen zwei Stationen wird in der Realität durch den Buchfahrplan festgelegt, der für diese Arbeit nicht vorlag. Da ein Zug i. d. R. mehrere physikalische Routen nutzen könnte, wird in dieser Arbeit ein Zugrouter (s. Abschnitt III.2.2.1.6), ein Äquivalent zum zuvor beschriebenen „Netzadministrator“, verwendet, der zur Laufzeit die benutzte Route bei der Ausfahrt aus einem Bahnhof berechnet. Auf diese Weise kann auf eingetretene Belegungskonflikte oder Deadlocks reagiert werden. Befindet sich bspw. ein anderer, langsamerer Zug auf der geplanten Route eines Zugs, muss auf diesen gewartet werden. Ein eventueller Überholvorgang wird durch einen Disponenten bestimmt und gesteuert; dafür muss im Netz natürlich eine Wartemöglichkeit gegeben sein. Ebenso Warten muss ein Zug vor einem Bahnhof, falls in diesem alle Gleise belegt sind. Nachdem ein Zug in

---

<sup>141</sup> Die Passagierverwaltung ist als Heapspeicher realisiert, welcher die Ereignisse aller Passagiere verwaltet.

einen Bahnhof angekommen ist, können die Passagiere aussteigen. Bei der Ausfahrt des Zugs steigen die wartenden Passagiere des Bahnhofs zu.

### III.2.2.1.3 Bahnhöfe

Bahnhöfe sind die „Treffpunkte“ für Passagiere und Züge. Sie sind die maßgeblichen permanenten Entitäten des Simulationsmodells und sind fest mit dem Streckennetz verbunden. Der Fahrplan spiegelt durch die Kontakte in einem Bahnhof die Bedeutung des Bahnhofs für das betrachtete Transportsystem wider. Die Bahnhöfe sind dabei eine Submenge aller möglichen Stellen im Streckennetz (vgl. Abschnitt II.2).

### III.2.2.1.4 Streckennetz

Auch das Streckennetz ist permanenter Bestandteil des Simulationsmodells. Eine Strecke verbindet zwei Stellen im Bahnnetz, zu denen auch die Bahnhöfe zählen. Strecken haben eine bestimmte Länge, die durch eine reelle Zahl in Kilometern angegeben wird. Die Kilometrierung einer Strecke muss nicht bei Null anfangen; eine Strecke kann bei einem beliebigen Wert – positiv oder negativ – beginnen. In der Praxis liegt der Anfangspunkt jedoch meist in der Nähe von Null.

Strecken können sich an bestimmten Stellen berühren, zur Bestimmung werden im Datenmodell der Bahn die jeweiligen Werte innerhalb der beiden betroffenen Streckenintervalle angegeben. Die Berührungspunkte können folgende Eigenschaften haben: parallel, einmündend bzw. abgehend, kreuzend mit/ohne Überleitung oder überleitend. Die geographische Lage der Strecken ergibt sich aus den Berührungspunkten mit den Bahnhöfen. Für letztere sind geographische Koordinaten bekannt. Den einzelnen Strecken sind weitere Merkmale zugeordnet, welche die Eigenschaften der Strecke genauer beschreiben, z. B. zur Art der Elektrifizierung.

Insgesamt sind demnach Lage, Verknüpfungen und Eigenschaften der Strecken gegeben. Das Simulationsmodell kann als Netzwerk mit verschiedenen Knotentypen, welche Bahnhöfe, Streckenberührungen und/oder Änderungen von Streckeneigenschaften markieren, dargestellt werden. Die Kanten des Graphs entsprechen dem physischen Bahnnetz relativ gut.

### III.2.2.1.5 Fahrplan

Aus dem Fahrplan ergeben sich vier Hauptereignistypen des Simulationsmodells.

- *Startereignisse* geben an, zu welchem Zeitpunkt ein Zug seine Fahrt in einem bestimmten Bahnhof beginnt.
- *Ausfahrten* geben analog den Zeitpunkt an, an dem ein Zug aus einem Bahnhof ausfährt. Hat ein Zug in einem Bahnhof keine Einfahrt, aber eine Ausfahrt sollen in diesem Bahnhof keine Passagiere aussteigen.
- *Einfahrten* definieren analog, zu welchem Zeitpunkt ein Zug in einen Bahnhof einfährt. Hat ein Zug in einem Bahnhof nur eine Einfahrt sollen an diesem Bahnhof keine Passagiere einsteigen können. Diese Modellierung wird häufig für ausländische Bahnhöfe genutzt. Auch kann für einige ICEs analog zu den Ausfahrten Kurstreckenbenutzung vermieden werden.

- *Endereignisse* geben den Zeitpunkt an, an dem ein Zug in einem Bahnhof endet.

Eine weitere Ereignisart sind die *Durchfahrten* an bestimmten Stellen im Netz, die jedoch für das Simulationsmodell irrelevant sind.

Der Fahrplan kann dementsprechend sowohl aus Sicht der Züge als auch aus Sicht der Bahnhöfe vollständig abgebildet werden.

#### III.2.2.1.6 Zugrouter

Die Routen *der Züge* zwischen ihren Ausfahrten und Einfahrten werden von einem Zugrouter auf Grundlage der topologischen Daten für einen Startbahnhof und einen Zielbahnhof ermittelt. Er bestimmt die zeitlich kürzeste Strecke und gibt eine Liste von Streckenabschnitten zurück, welche der Zug auf seiner Fahrt zwischen den Bahnhöfen benutzen soll. Fährt ein Zug aus einem Bahnhof aus, übergibt er diesen Bahnhof sowie seinen ersten Halt dem Zugrouter und erhält von ihm alle Streckenabschnitte, die er abfahren muss, um zum nächsten Halt zu gelangen.

Die Berechnung der Streckenabschnitte einer Zugroute erfolgt mit einer Kombination aus einem Dijkstra-Algorithmus für kürzeste Wege und einem Backtracking-Algorithmus für Verbindungen zwischen zwei Knoten in einem Netzwerk. Der Zugrouter kann auf diese Weise mehrere Routen zwischen zwei Knoten berechnen. Der Dijkstra-Algorithmus wird genutzt, um die Komplexität des Netzwerkes für die Zugrouten zu verringern, der Backtracking-Algorithmus sucht nur innerhalb dieses reduzierten Netzwerkes. Die Reduzierung des Netzwerkes wird erreicht, indem die Schnittmenge der vom Start- und Endbahnhof aus in der durch den Fahrplan vorgegebenen Dauer erreichbaren Knoten gebildet wird. Durch dieses Verfahren ist es möglich, auf eventuelle Streckensperrungen im Netzwerk zu reagieren.

#### III.2.2.1.7 Störungen

Im Rahmen der Simulation werden Störungen als Verspätungen auf die fahrenden Züge übertragen. Sie treten in unregelmäßigen Abständen auf, die sich durch eine negativ exponentialverteilte Zufallsvariable beschreiben lassen. Die Dauern der einzelnen Verspätungen werden ebenfalls durch eine negativ exponentialverteilte Zufallsvariable modelliert. Die Werte für beide Zufallsvariablen berechnen sich wie folgt:

- Die *Zwischenankunftszeit* ist abhängig von dem Prozentsatz der durchschnittlichen Verspätungshäufigkeit ( $PdVh$ ), der Dauer des Fahrplans und der Anzahl der im Fahrplan fahrenden Züge. Ihr Erwartungswert  $E$  sei definiert als

$$E := PdVH \cdot \frac{\text{Fahrplandauer in Minuten}}{\text{Anzahl Züge im Plan}}.$$

- Die *Verspätungsdauer* kann beliebig gewählt werden, in der kompletten Experimentation in Kapitel IV wird ein Erwartungswert von fünf Minuten gewählt, dies kann jedoch je nach Simulationsziel verändert werden.

Das Auftreten der Störungen wird durch *Störungseignisse* wie folgt modelliert: Störungen treten im Abstand der berechneten Zwischenankunftszeiten auf. Das erste Störungseignis wird zum Simulationsstart in die Ereignisliste aufgenommen und terminiert nach seiner

Ausführung das jeweils nächste Störungsereignis. Ein Störungsereignis verspätet zudem einen zufällig aus der Menge der gerade fahrenden Züge gewählten Zug um eine Verspätungsdauer, indem es alle künftigen Ereignisse des Zugs um die berechnete Störungsdauer verspätet, also die Verspätung linear propagiert.

#### III.2.2.1.8 Disponent

Der Disponent selbst ist integraler Bestandteil des Simulationssystems, da die in ihm implementierten Strategien den Fortlauf des Modells steuern. Er erhält quasi die Simulation aufrecht, indem er für jeden Zug Warteentscheidungen bestimmt. Dazu bekommt er Informationen über die Züge, den Fahrplan und die in den Zügen sitzenden Passagiere, wobei die benötigte Informationsmenge von der Strategie abhängt, mit der das Anschlussverhalten gesteuert wird, vgl. dazu Abschnitt III.1.6.4 und Kapitel IV.

Der Disponent erhält für seine Entscheidung in jedem Fall Informationen über die noch fehlenden Zubringer für eine geplante Ausfahrt und gibt entweder ein Signal zum Warten und eine Zeit für den nächsten Ausfahrtsversuch oder ein Signal zum Weiterfahren zurück. Unterstützend kann der Disponent, wie in III.1.6 beschrieben, den Passagierrouter einsetzen, um Ersatzrouten für Passagiere mit verpassten Anschlüssen zu bestimmen.

Eine weitere Aufgabe des modellierten Disponenten ist es, das Überholen von langsamen Zügen zu ermöglichen, die einen schnelleren Zug bremsen. Hierfür meldet ein Zug, sobald er zweimal hintereinander auf den gleichen Zug beim Einfahren in eine Strecke gewartet hat, diesen Zug und seine Position. Der Disponent muss nun anhand der gegebenen Topologie eine geeignete Stelle für den Überholvorgang bestimmen. Anschließend teilt er dem langsamen Zug mit, dass dieser an einer bestimmten Stelle im Streckennetz warten soll. Der schnellere Zug meldet, wenn er die Überholstelle passiert hat, sodass der Disponent dem wartenden Zug das Signal zur Weiterfahrt geben kann. Damit ist ein Überholvorgang abgeschlossen.

Alle anderen dispositiven Maßnahmen sind nicht innerhalb des Simulationsmodells implementiert. Aufgrund der modularen Struktur des Modells kann es jedoch vergleichsweise einfach erweitert werden.

#### III.2.2.1.9 Passagierrouter

Der bereits in Abschnitt III.1.7 erläuterte Passagierrouter wird nachfolgend in seinem Aufbau und seiner Funktionsweise erörtert.

##### *III.2.2.1.9.1 Aufbau*

Kernstück des Passagierrouters ist die interne Netzwerkrepräsentation, deren Initiierung auf dem statischen Fahrplan eines Tages beruht. Aus diesem wird ein Graph für eine sehr effiziente Routensuche aufgebaut. Der Aufbau ist prinzipiell vergleichbar mit dem eines normalen Time-Space-Netzwerks, welches Zugfahrten im Netz als Kanten zwischen *Bahnhofs-Timelines* (zeitlich geordnete Ankunfts- und Abfahrtsereignisse eines Bahnhofs) beschreibt. Die Anschlussbeziehung wird darin durch sog. Wartekanten in Bahnhöfen modelliert:

- Die *Knoten* repräsentieren die Fahrplanereignisse der Züge in ihren Stationen. Es wird für jedes *aktive* (vgl. weiter unten) Fahrplanereignis ein Knoten erzeugt, der mit den folgenden Kantentypen mit anderen Knoten verbunden wird.
- *Bahnhofs-kanten* verbinden die Ausfahrten eines Bahnhofs miteinander. Eine Bahnhofs-kante ist eine gerichtete Kante, welche zwei zeitlich aufeinander folgende Ausfahrten eines Bahnhofs miteinander verbindet.
- Eine *Umsteigekante* verbindet die Einfahrt eines Zugs mit der nächsten möglichen Ausfahrt eines Abbringers für eine bestimmte Übergangszeit in einem Bahnhof. Sie ist ebenfalls gerichtet.
- *Ausfahrtskanten* verbinden die Ausfahrt eines Zugs in einer Station mit der Einfahrt des Zugs in seiner nächsten Station.
- Die ebenfalls gerichteten *Zugkanten* schließlich verbinden jeweils zwei zeitlich aufeinander folgende Einfahrten eines Zugs in den angefahrenen Bahnhöfen miteinander.

Ein einfaches Beispiel für einen solchen Graphen ist in Abbildung 26 dargestellt.

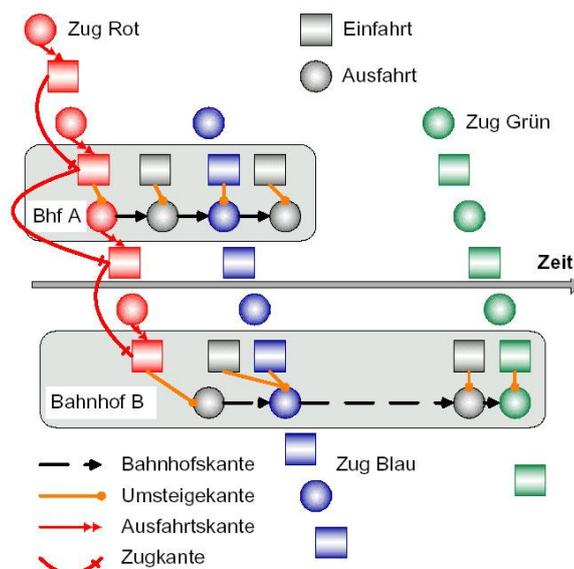


Abbildung 26: Beispielgraph<sup>142</sup> des Passagierouters

Bei der Konstruktion dieses Netzes können Kanten durch Verwendung von *First-Match*- bzw. *Latest-First-Match*-Beziehungen, wie sie aus der Umlaufplanung z. B. für Busse bekannt sind, vgl. [Mellouli 2003], eingespart werden. Dabei wird vor allem ausgenutzt, dass alle Abbringer, die *nach* dem ersten Abbringer, den ein Passagier erreichen kann, ankommen, ebenfalls durch diesen Passagier erreicht werden können. Eine Veranschaulichung des prinzipiellen Ablaufs dieser Aggregation bietet Abbildung 27 (vgl. [Mellouli 2003]).

<sup>142</sup> Die Ausfahrtskanten und Zugkanten des blauen und grünen Zugs wurden aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht eingetragen. Sie sind analog zu den Kanten des roten Zugs.

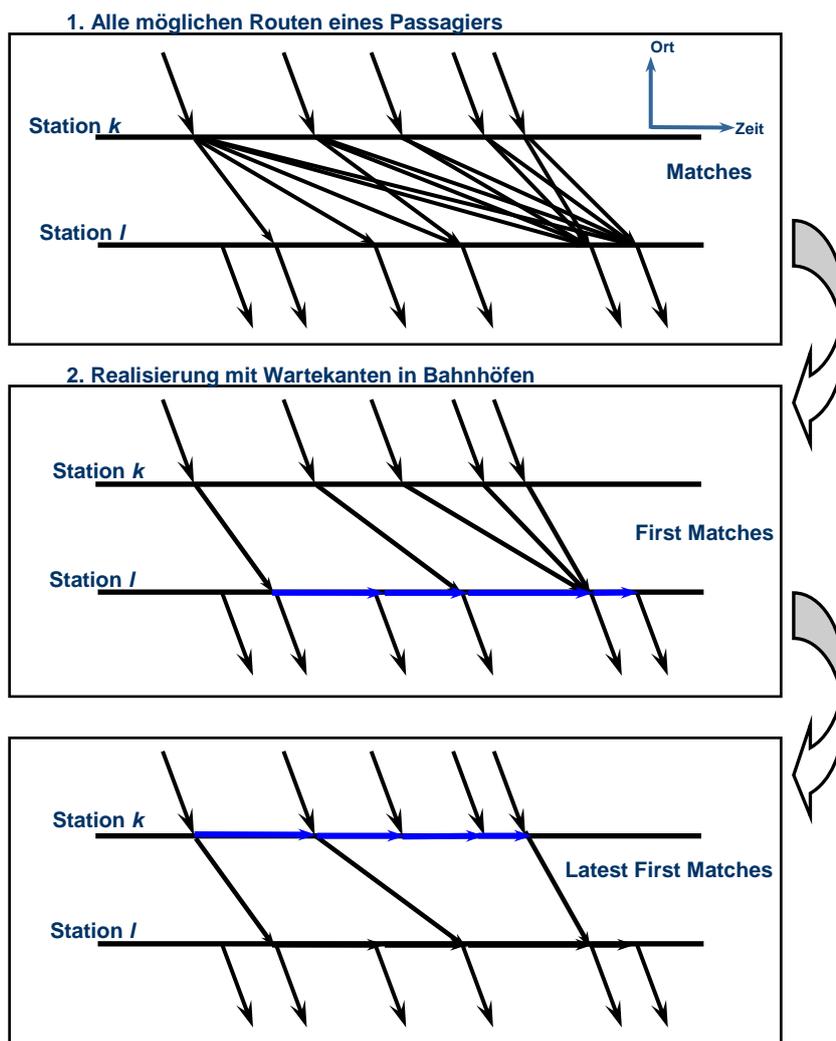


Abbildung 27: Latest-First-Matches in einem Anschlussnetzwerk

Es besteht die Möglichkeit, die Komplexität des Graphen zu reduzieren, indem Knoten, die keine Anschlussmöglichkeiten innerhalb eines Zeitintervalls haben (Zug ohne Anschlüsse), nicht in den Graph aufgenommen werden. Auf diese Weise wird ein *Anschlussfahrplan* des eigentlichen Fahrplans, der alle tatsächlichen Anschlussmöglichkeiten für Passagiere in den Bahnhöfen enthält, modelliert. Ein Großteil der Bahnhöfe mit nur einer Strecke, die nur Verkehr in zwei Richtungen zu den jeweils nächstliegenden Knotenbahnhöfen haben und daher keine sinnvollen Umsteigemöglichkeiten – außer in die Gegenrichtung – bieten, wird demnach nicht oder nur teilweise in den Graphen aufgenommen. Die ausgelassenen Knoten fungieren somit höchstens als Start- oder Endpunkte einer Route. Diese Knoten repräsentieren *passive* Fahrplanereignisse, während alle anderen im Graphen enthaltenen Knoten *aktive* Ereignisse modellieren. Beide Arten werden wie folgt ermittelt:

*Aktive Ereignisse:* Ein Einfahrtsereignis ist aktiv, wenn es eine Ausfahrt im gleichen Bahnhof gibt, die innerhalb einer bestimmten Zeit eine Verbindung zu einem anderen Bahnhof als zum letzten Bahnhof des Zugs herstellt. Ausfahrten sind aktiv, wenn sie bei der Ermittlung der aktiven Einfahrten eine Anschlussverbindung ermöglichen. *Passive* Ereignisse

sind die Ereignisse, die in einer gewissen Zeitspanne keine neuen Anschlüsse im Anschlussfahrplan erzeugen.

Das Beispielnetzwerk der Deutschen Bahn AG kann durch dieses Preprocessing signifikant verkleinert werden; von 767.000 Ereignissen bleiben nur 79 % aktiv, wenn ein Zeitfenster von 40 Minuten für die Ermittlung potenzieller Anschlüsse verwendet wird. In Teilnetzen – d. h. in ländlichen Regionen – bzw. in bestimmten Zeitfenstern eines Tages kann die Reduktion noch größer sein.

### III.2.2.1.9.2 Initiierung

Eine wichtige Eigenschaft, die sowohl für Update des Netzwerks (vgl. nächster Abschnitt) als auch für die Suche von Routen von Bedeutung ist, ist die *topologische Sortierung*. Die topologische Sortierung ordnet alle Knoten in einer Liste derart an, dass alle Nachfolger eines Knotens in der Liste hinter diesem Knoten stehen. Dies ist nur dann möglich, wenn der gerichtete Graph keine (gerichteten) Zyklen enthält, also ein sog. DAG (Directed Acyclic Graph) (vgl. Z. B. [Ahuja et al. 1993]) ist. Da der Fahrplangraph aufgrund des Zeitablaufs keine Zyklen aufweisen kann und azyklische Graphen in linearem Zeitaufwand topologisch sortiert werden können, nimmt die Sortierung, die direkt beim Aufbau des Graphen erfolgt, nur wenig Zeit in Anspruch. Sie startet mit allen Knoten, die keine eingehenden Kanten haben, und markiert diese mit aufsteigenden Nummern, den *topologischen Nummern* oder *TO-Nummern*. Anschließend werden nur Knoten markiert, die keine unmarkierten Vorgänger haben, indem sie eine höhere TO-Nummer als ihre direkten Vorgänger bekommen. Endbedingung für den topologisch sortierten Graphen ist demnach, dass für jede Kante die TO-Nummer des Quellknotens kleiner ist als die TO-Nummer des Zielknotens<sup>143</sup>.

### III.2.2.1.9.3 Update und Routensuche

Essentiell für den Passagierrouter ist ein *schnelles Update* des internen Netzwerks: Verspätungsmeldungen<sup>144</sup> werden in die Suche nach einer neuen Route aufgenommen, indem das Anschlussnetz laufend aktualisiert wird. Jede Verspätung wird dem Passagierrouter übermittelt, indem für jedes Ereignis eines Zugs die neue verspätete Zeit (nach einer beliebigen Methode prognostiziert) übergeben wird. Dieser modifiziert dann seine Modellrepräsentation, indem er jedes Ereignis des Zugs in dem Suchgraphen an die sich neu ergebende Position der topologischen Sortierung stellt.

- Einfahrten erhalten zunächst eine aktualisierte (Ist-) Zeit. Werden dadurch Anschlüsse verpasst, wird eine neue Umsteigekante zur nächsten erreichbaren Ausfahrt eingefügt. Die „alte“ Umsteigekante wird gelöscht.
- Ausfahrten werden an ihre neue Position in der Timeline eines Bahnhofs eingefügt; die Ausfahrtskante wird entsprechend aktualisiert. Dabei ist zu berücksichtigen, dass

---

<sup>143</sup> Ein alternatives Vorgehen würde zunächst alle Knoten ohne Nachfolger berücksichtigen.

<sup>144</sup> Realiter werden in Sekundenabständen Hunderte von Zuglaufmeldungen in das System eingespeist, aus denen relevante, für Konflikte sorgende, Störungen herauszufiltern sind.

die eingehenden Umsteigekanten einer Ausfahrt ebenfalls neu zu setzen sind. Auch hier muss die Ist-Zeit aktualisiert werden.

Alle Aktualisierungsaktionen können aufgrund der topologischen Sortierung des Graphen sehr schnell durchgeführt werden. Auch die *Routensuche* wird auf diese Weise vereinfacht, da auf einem solchen Graphen mit Hilfe einer ganz normalen Breitensuche (*Breadth First Search*, BFS) der kürzeste Weg von einem Startknoten zu einem Zielbahnhof ermittelt werden<sup>145</sup> kann:

Gegeben: Startknoten  $q$ , Zielknoten  $s$ , nach TO-Nummern sortierte Liste  $L$ .

1. Setze  $L := \emptyset$
2. Setze  $L := L \cup \{q\}$
3. Wähle  $t \in L$  mit kleinster TO-Nummer
4. Setze  $L := L \cup N(t)$ , wobei  $N$  die Nachfolger eines Knotens bezeichne, und markiere alle Knoten  $k$  aus  $N(t)$  als erreicht.
5. Falls  $q \notin L$  gehe zu 3.
6. Ende

Start- bzw. Zielknoten einer spezifischen Routenanfrage eines Passagiers werden temporär dem Netzwerk hinzugefügt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass eine Reise an einem inaktiven Ereignis starten bzw. enden kann, und dass sich ein Passagier sowohl an einem Bahnhof als auch in einem Zug befinden kann, wenn die Route zu bestimmen ist:

1. Ist der Passagier unterwegs, wird ein Quellknoten, der mit der nächsten aktiven Einfahrt verbunden ist, hinzugefügt.
2. Wartet der Passagier an einem Bahnhof, wird die Quelle mit den nächsten Abfahrtsereignissen verbunden. Sind diese inaktiv, werden stattdessen die nächsten aktiven Ankunftsereignisse der entsprechenden Züge gewählt.

Der *Zielbahnhof* wird durch einen Knoten *Senke* modelliert, der mit allen Knoten der Eingangereignisse des Bahnhofs verbunden wird.

Eine Besonderheit der realen Welt, die es in der Modellierung des Routers zu berücksichtigen gilt, ist die Existenz sog. *Äquibahnhöfe*. Dabei handelt es sich um Bahnhöfe oder Stationen, die im Fahrplan logisch getrennt sind, die aber physikalisch so nah beieinander liegen, dass eine Verbindung per Pedes möglich ist (z. B. Frankfurt Hauptbahnhof und Frankfurt Hauptbahnhof (tief), die wenige Gehminuten bzw. einige Höhenmeter voneinander entfernt sind).

Diese Bahnhöfe sind dann im Modell insofern als ein und derselbe Bahnhof anzusehen, als dass alle Einfahrten des einen Bahnhofs die Ausfahrten des anderen Bahnhofs genau so erreichen können, als ob beide identisch wären. Diese Eigenschaft wird im Graphen des Passagier-

---

<sup>145</sup> Für die Berechnung der Routen der Passagiere in der Simulation wurde z. T. ein anderes Vorgehen gewählt: Es wurde ein Startknoten und eine maximale Reisedauer festgelegt. Der Passagierrouter ermittelt dann Routen, die innerhalb der Reisedauer vom Startknoten aus erreichbar sind. Das Abbruchkriterium der Suche ist in diesem Fall eine maximale Anzahl gefundener Routen.

routers mit zusätzlichen Umsteigekanten berücksichtigt. Äquibahnhöfe, von denen der Zielbahnhof erreicht werden kann, sind ebenfalls als Zielbahnhöfe zu betrachten. Der Passagierrouter nimmt daher diese Äquibahnhöfe bei einer Routensuche in seine Senke auf.

#### III.2.2.1.9.4 Erweiterungen

Innerhalb des Modells können außerdem Mindestübergangszeiten einzelner Passagiere individuell gestaltet werden, indem bei einer Routenanfrage ein Umsteigefaktor mitgegeben wird, der eine Abweichung des Passagiers von der Standardmindestübergangszeit einer Umsteigekante angibt. Auf diese Weise kann ein individuelles Umsteigeverhalten des Passagiers, etwa bei Gehbehinderten oder bei Reisenden mit sehr viel Gepäck, modelliert werden; es wird gleichsam ein individueller Anschlussfahrplan berechnet. Steigt ein Passagier während einer Reise um, werden die Übergangszeiten der Umsteigekanten mit dem Umsteigefaktor multipliziert. Diese individuelle Übergangszeit bestimmt, welche Ausfahrt in einem Bahnhof als erstes von einem Passagier erreicht werden kann.

Da die Wegesuche sehr effizient abgehandelt wird, können zusätzliche Zielkriterien bei der Suche berücksichtigt werden, bspw. die Suche nach der kürzesten Route mit einer minimalen Zahl Umstiege. Dafür würden alle Umsteigekanten mit Kosten belegt, während Kanten auf demselben Zug kostenlos blieben.

Mit den genannten Datenstrukturen und Algorithmen kann der Passagierrouter auf einem handelsüblichen PC das komplette Netz für eine Fahrplanperiode aufbauen und in kurzen Zeiten Routen berechnen. In Testläufen auf 1,4 GHz-PCs wurde eine Anfrage im Mittel in ca. 200 ms beantwortet. Dies reichte in den durchgeführten Simulationsexperimenten aus, könnte aber in der Realität bei vielen Anfragen zum gleichen Zeitpunkt zu langsam sein, sodass es mehrere Passagierrouter im Netz geben sollte. Dies gilt auch, falls umfangreiche What-If-Analysen durchgeführt werden müssen, die viele Re-Scheduling-Abfragen benötigen. Weitere Rechenergebnisse dieser Testimplementierung finden sich in Kapitel IV.

#### III.2.2.2 Ablauf des TrainSim-Modells

Das beschriebene Simulationsmodell läuft im Prinzip nach dem in Abbildung 24 beschriebenen Verfahren ab; die Zustandswechsel finden ereignisorientiert statt.

Die einzelnen Ereignisse der Züge werden in einer Ereignisliste verwaltet. Initialisiert werden die Züge, indem ihre Startereignisse zu Beginn des Simulationslaufs zeitlich sortiert in die Liste eingetragen werden. Diese Startereignisse erzeugen später alle Folgeereignisse der Züge auf ihrer Route, auch diese werden über die Ereignisliste verwaltet und dort zu ihren Zeitpunkten eingereiht. Die Ereignisliste wird dann sequenziell abgearbeitet.

Passagiere werden in regelmäßigen Abständen schubweise initialisiert, indem sie in die Passagierverwaltungen ihrer Startbahnhöfe übergeben werden, bevor ihr erstes Zugereignis planmäßig stattfindet.

### III.2.2.2.1 Ereignisse des und Abhängigkeiten im Simulationsmodell

Nachfolgend werden alle wesentlichen Ereignisse kurz umgangssprachlich umrissen. Es handelt sich dabei im Wesentlichen für jeden Zug um Ankunft bei, Bearbeitung in und Abfahrt von einer „Bearbeitungsstation“, die auf seiner Route liegt. Zusätzlich dazu existieren weitere Ereignisse für Passagiere, die hier nur implizit angedeutet werden

#### III.2.2.2.1.1 Ausfahrt aus einem Bahnhof

Ein Zug hat die Aufgabe, alle von möglichen Zubringern kommenden Passagiere mitzunehmen. Es wird daher zunächst geprüft, ob alle Umsteiger angekommen sind. Ist dies der Fall, wird eine Route berechnet und die Ankunft an der ersten Kante der Route terminiert. Wird keine physikalische Route zum nächsten Bahnhof gefunden, werden die Züge direkt zu den Bahnhöfen transferiert, indem das Ankunftsereignis am nächsten Halt terminiert wird, ggf. inklusive einer eventuellen Verspätung. Dieser Kunstgriff ist aufgrund inkonsistenter Topologiedaten bisweilen nötig, um die Simulation geordnet weiterführen zu können.

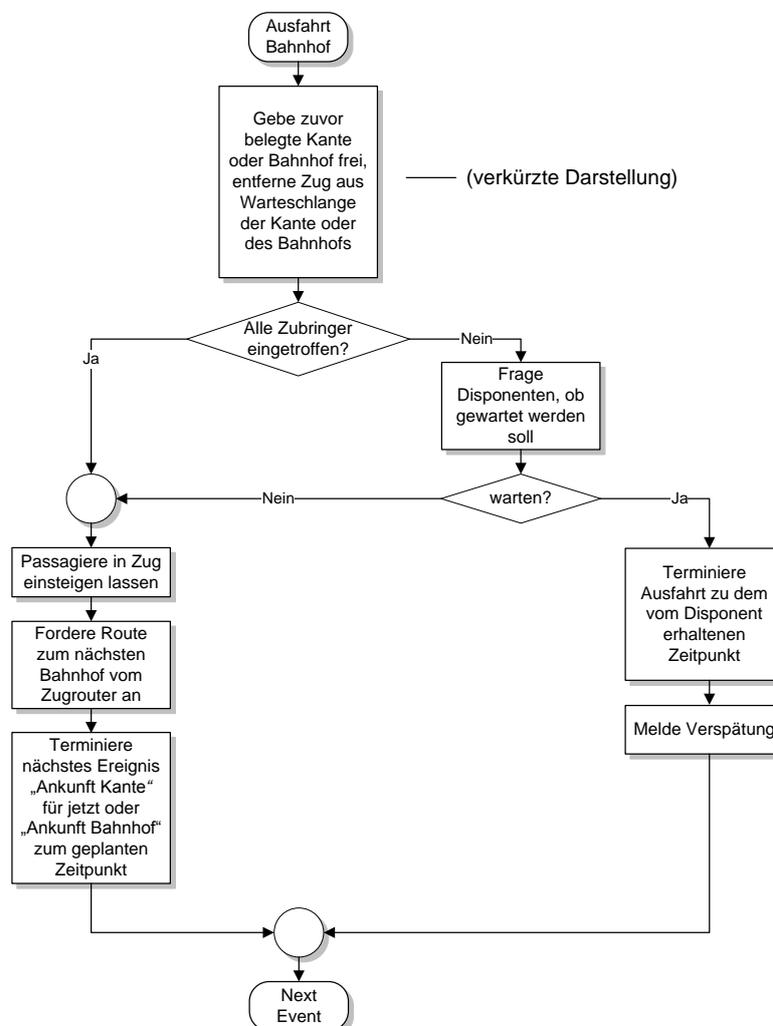


Abbildung 28: Ereignis „Ausfahrt Bahnhof“

Sind noch nicht alle Zubringer angekommen, berechnet der Disponent eine Wartezeit. Soll der Zug nicht warten, wird so fortgefahren wie oben, und einige Passagiere verpassen den

geplanten Anschlusszug. Soll der Zug warten, wird das Ausfahrtseignis zum durch den Disponenten bestimmten Zeitpunkt erneut in die Ereignisliste gestellt.

Ist das Ausfahrtseignis kein Startereignis, und hat der Zug in diesem Bahnhof keine Einfahrt, wird als erste Aktivität die vorhergehende Kante oder der letzte Bahnhof freigegeben, sodass sie von anderen Zügen befahren werden können. Die benutzten Kanten und Bahnhöfe werden immer erst dann freigegeben, wenn ein Zug sich *tatsächlich* im nächsten Abschnitt seiner Fahrt befindet. Das Ereignisdiagramm „Ausfahrt Bahnhof“ ist in Abbildung 28 dargestellt. Die Darstellung der Freigabe der zuvor belegten Kante (bzw. Bahnhof) ist dabei aus Gründen der Übersichtlichkeit verkürzt; korrekterweise sollte für den aus der Warteschlange entfernten Zug das Ereignis „Ausfahrt Bahnhof“ terminiert werden.

### III.2.2.2.1.2 Ankunft an einer Kante

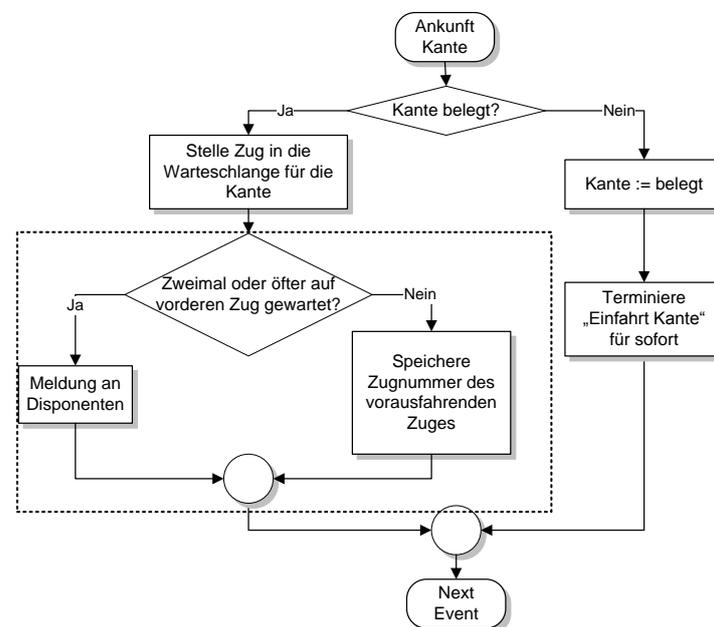


Abbildung 29: Ankunftsereignis an einer Kante

Im Normalfall kommt ein Zug nach einer Ausfahrt aus einem Bahnhof an einer Kante an. Ist die Kante nicht belegt, kann der Zug in diese einfahren. Er blockiert die Kante, damit keine anderen Züge mehr in diese einfahren können, und terminiert seine eigene Einfahrt für sofort. Ist die Kante belegt, wird der Zug in die Warteschlange der Kante gestellt.

In Abbildung 29 ist das Diagramm dieses Ereignisses dargestellt. Der gekennzeichnete Bereich zeigt eine mögliche Umsetzung einer automatisierten Erlaubnisanforderung für einen Überholvorgang: Wartet ein Zug an zwei hintereinander folgenden Kanten auf den gleichen Zug, wird ein Überholvorgang angestoßen und durch den Disponenten gesteuert. Dieser Vorgang ist bisher im Simulationsmodell vorgesehen. Prinzipiell ist an dieser Stelle auch jedes andere Regelwerk denkbar.

### III.2.2.2.1.3 Einfahrt in eine Kante

Nach der Ankunft an einer Kante folgt die Einfahrt in diese. Zunächst wird die zuvor belegte Kante freigegeben. Befindet sich ein weiterer Zug in der Warteschlange, wird dessen Einfahrt für sofort terminiert. Anschließend wird der aktuellen Kante der Status „belegt“ zugewiesen, die benötigte Fahrtdauer berechnet und das Ausfahrtsereignis terminiert. Abbildung 30 zeigt links das Ereignisdiagramm „Einfahrt Kante“.

### III.2.2.2.1.4 Ausfahrt aus einer Kante

Bei der Ausfahrt des Zugs aus einer Kante wird bestimmt, ob der Zug an seinem nächsten Bahnhof (Halt) angekommen ist. Ist dies der Fall, wird diese Ankunft dort auf „sofort“ terminiert, ansonsten wird die Ankunft an der nächsten Kante terminiert, ebenfalls auf „sofort“. Das entsprechende Diagramm ist in Abbildung 30 (rechts) zu sehen.

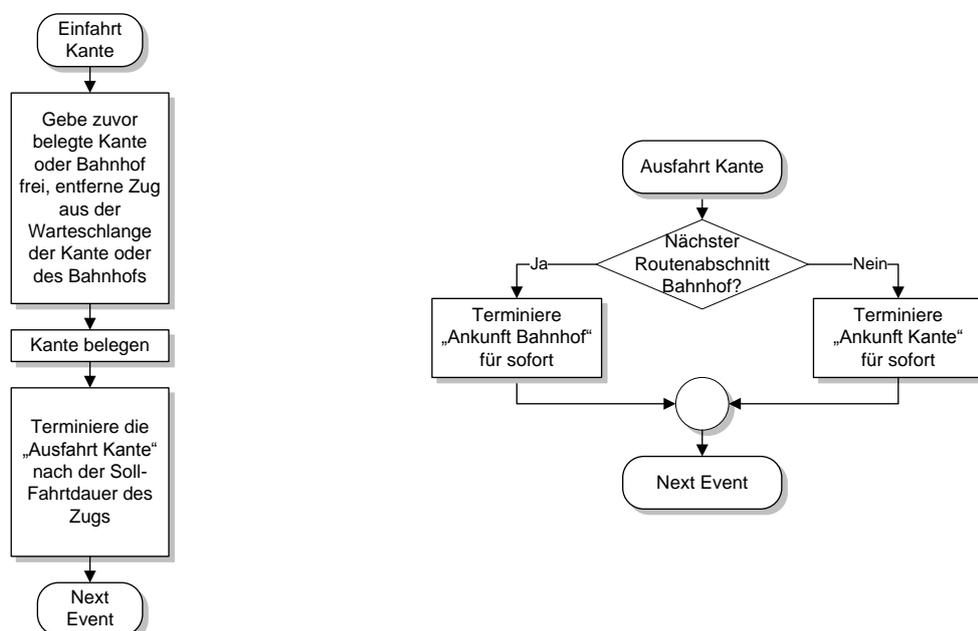


Abbildung 30: Ereignisdiagramme „Einfahrt Kante“ und „Ausfahrt Kante“

### III.2.2.2.1.5 Ankunft an einem Bahnhof

Ein Zug kann in einen Bahnhof einfahren, falls dort noch freie Gleise existieren. Dazu wird zunächst ein Gleis im Bahnhof blockiert, um das Einfahren eines anderen Zugs zur gleichen Zeit zu verhindern. Bei dem Folgeereignis handelt es sich normalerweise um eine Einfahrt, bisweilen folgt aber auch eine Ausfahrt, falls dort laut Fahrplan keine Passagiere einsteigen dürfen (vgl. Abschnitt II.2.2.1).

Hat der Bahnhof keine freien Gleise, kann der Zug nicht in den Bahnhof einfahren. Dann wird er in die Warteschlange des Bahnhofs gestellt und verbleibt dort, bis sein Vorgänger das belegte Gleis freigibt. Abbildung 31 zeigt das diesem Ereignis zugehörige Diagramm. Es ist zu erkennen, dass Züge nicht – wie im realen Leben – vorgegebene Gleise anfahren. Diese Vereinfachung ist dem Mangel an exakten Daten über die Bahnhofsinfrastruktur geschuldet.

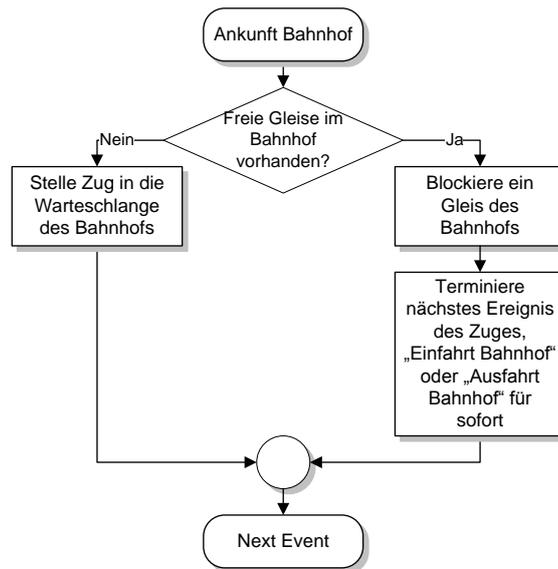


Abbildung 31: Ankunft an einem Bahnhof

III.2.2.2.1.6 Einfahrt in einen Bahnhof

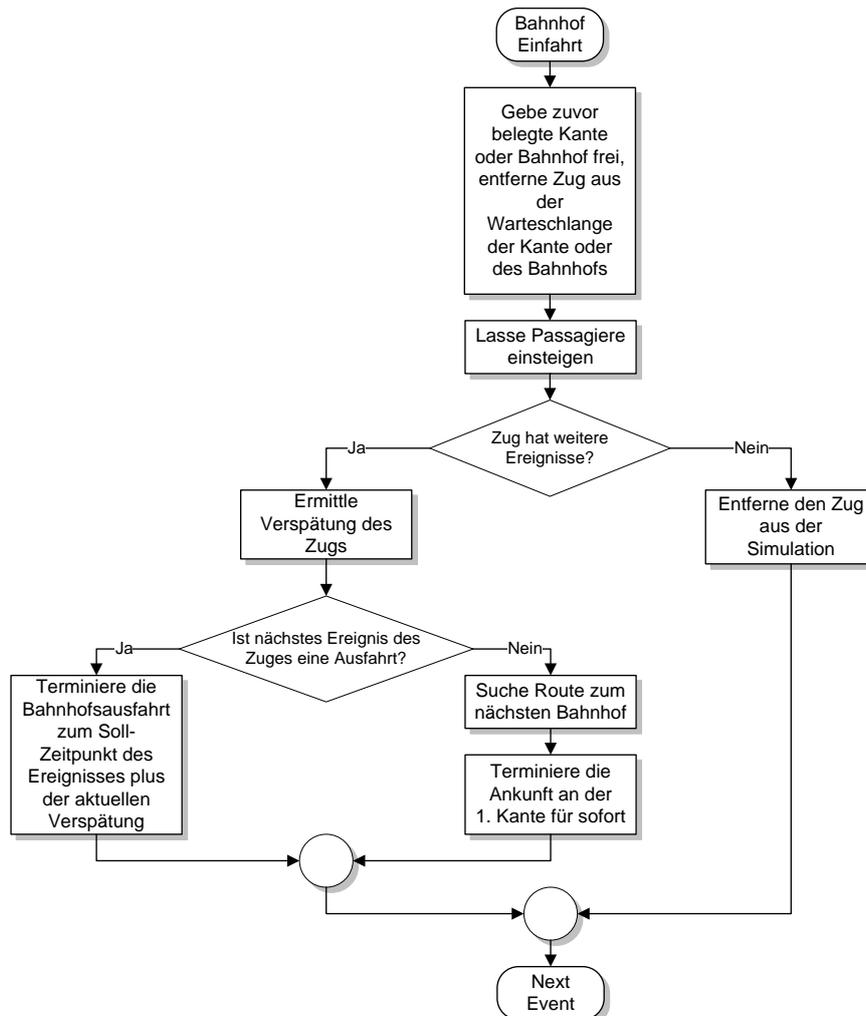


Abbildung 32: Diagramm „Einfahrt Bahnhof“

Kann ein Zug in einen Bahnhof einfahren, gibt er wiederum die zuvor belegte Kante (ggf. auch den belegten Bahnhof) frei, holt einen eventuell dort abgestellten Zug aus der Warteschlange und stellt die Einfahrt des Zugs in die Ereignisliste. Anschließend steigen die Passagiere, die ihr Ziel erreicht haben, aus. Die angefallene Verspätung wird ermittelt und auf die Folgeereignisse propagiert, und das Folgeereignis des Zugs wird terminiert. Dabei handelt es sich normalerweise um eine Ausfahrt oder um die Einfahrt des Zugs in seinen nächsten Bahnhof, wenn laut Fahrplan in diesem Bahnhof keine Passagiere zusteigen sollen. Ist das nächste Ereignis eine Ausfahrt, wird das zugehörige Ausfahrtsereignis inklusive der akquirierten Verspätung des Zugs während der Reise terminiert. Hat der Zug in diesem Bahnhof keine Ausfahrt, wird die Zugroute zum nächsten Bahnhof ermittelt und die Ankunft des Zugs an der ersten Kante der Route in die Ereignisliste gestellt. Ist diese Einfahrt die letzte in der Ereignisliste, hat der Zug seinen Zielbahnhof erreicht und kann aus dem System eliminiert werden (vgl. Abbildung 32).

#### III.2.2.2.2 Verteilung des Simulationsmodells in Regionen

Die Simulation des kompletten Bahnsystems ist eine rechenaufwändige Aufgabe, weswegen schon konzeptionell eine Aufteilung des Modells in verschiedene logische Prozesse erfolgte.

Diese folgt der geographischen Verteilung, die auch die Bahn selbst umsetzt, nämlich in verschiedene Regionen, die relativ autark abzuarbeiten sind – mit allen Vor- und Nachteilen der regionalen Trennung, die auch in der Realität zu beobachten sind. Wie auch im Realsystem entstehen durch die notwendig werdende Kommunikation Reibungsverluste: eine Synchronisation in kausalem Zusammenhang stehender Ereignisse wird erforderlich (vgl. Abschnitt III.2.1.3), und lokal erfolgreiche Dispositionsstrategien könnten global suboptimal sein.

Die Aufteilung im Simulationsmodell kann quasi willkürlich erfolgen, sollte jedoch in geographisch abgeschlossenen, zusammenhängenden Regionen resultieren, die das komplette Netz umfassen. Im Idealfall werden die Regionen so gebildet, dass die Anzahl der entstehenden Zugübergänge zwischen den Regionen minimal ist, um geringen Kommunikationsaufwand zu gewährleisten. Zusätzlich sollte die Anzahl der Ereignisse in jeder Region annähernd gleich sein, damit die entstehenden logischen Prozesse in etwa gleiche Laufzeit aufweisen<sup>146</sup>.

Bahnhöfe und Strecken werden den zugehörigen Regionen zugeteilt. Die Passagiere und Züge starten in der Region ihres ersten Bahnhofs. Jede Region beansprucht im Modell einen eigenen Rechner, den *Regionenrechner*. Diese Rechner bearbeiten ihren abgeschlossenen Bereich und transferieren Züge, welche die Region verlassen, zu den Nachbarregionen, indem sie alle Daten des Zugs inklusive der enthaltenen Passagiere über ein (Computer-) Netzwerk zum nächsten zuständigen Rechner schicken, wo die nächsten Ereignisse angestoßen werden. Jeder Rechner kann von seinem Nachbarn Züge empfangen und zu diesem senden.

---

<sup>146</sup> Da das Simulationssystem agentenbasiert konzipiert wurde, kann dies eigentlich entfallen – zur Laufzeit wird ein dynamischer Lastausgleich zwischen den Regionen erfolgen. Zusätzlich können derart dynamisch Ressourcen zur Laufzeit hinzugefügt werden, falls dies nötig ist.

In der Praxis zeigt sich, dass die Rechenzeit eines Regionenrechners gut mit der Anzahl der Bahnhöfe dieser Region korreliert ist, sodass die Bahnhöfe möglichst gleichmäßig auf die Regionen verteilt werden sollten, sofern die zugehörigen Prozessoren identische Leistungen haben. Das Simulationssystem ist in der Lage, jede Einteilung, die den oben genannten Bedingungen genügt, zu verwenden.

Die Zuordnung der Strecken zu Regionen wird ausgehend von den Bahnhöfen vorgenommen, indem alle von einem Bahnhof erreichbaren und noch nicht zugeteilten Streckenkanten der Region des Bahnhofs zugeteilt werden. Trifft man dabei auf einen anderen Bahnhof, wird in diese Richtung keine weitere Streckenkante markiert. Diese Art der Markierung der Kanten kann von einem beliebigen Bahnhof in beliebiger Reihenfolge gestartet werden. In jedem Fall können so zusammenhängende und vollständige Subnetze für die einzelnen Regionen generiert werden.

#### III.2.2.2.3 Synchronisation der Regionen

Probleme bei dieser Art der Verteilung können auftreten, falls Züge die Regionen wechseln. Hat die „Empfängerregion“ eine niedrigere Simulationszeit, ist dies unproblematisch. Ist sie aber höher, könnte das quasi in der Vergangenheit unberücksichtigte Eintreffen eines Zugs Kausalitätsverletzungen zur Folge haben.

In diesem Modell wird daher ein konservatives Synchronisationsverfahren angewandt. Die Synchronisation der Regionen wird dabei durch einen zentralen Computer gesteuert, der die Simulationszeit im Minutentakt weiterschaltet und die Regionenrechner ggf. unterbricht und wieder aktiviert. Die Regionenrechner berechnen alle Ereignisse einer Minute, melden die Fertigstellung der Zentrale und warten anschließend, bis sie das Signal zum Weitermachen bekommen. Dieses *Synchronisationsereignis* wird auf jedem Regionenrechner zu Beginn der Simulation mit der Anfangszeit der Simulation gestartet und ruft sich nachfolgend, von der Zentrale gesteuert, immer wieder selbst auf.

Auf diese Weise wird sichergestellt, dass keine ungültigen Zugtransfers über das Netzwerk stattfinden. In der Praxis impliziert dies natürlich einen Flaschenhals, falls ein Rechner deutlich langsamer ist als alle anderen – oder durch andere Prozesse belastet wird. Für die Testläufe wurden dementsprechend Cluster von Rechnern ähnlicher Kapazität verwendet.

Zusätzlich zur Synchronisation übernimmt die Zentrale die Steuerung und insbesondere die Initialisierung der Regionenrechner, indem er bspw. das Streckennetz und die Bahnhofsdaten aus der Datenbank einliest und verteilt.

#### III.2.2.2.4 Validierung des Simulationsmodells

Prinzipiell sind Modelle komplexer Realsysteme schwer zu validieren; eine vollständige Validierung ist fast immer unmöglich und zudem eng mit der Zielsetzung der jeweiligen Untersuchung und dem Vorhandensein ausreichender Vergleichsdaten verknüpft. In [Tromp 2004] wird bspw. eine Methode zur Validierung eines Simulationsmodells mittels Zuglaufdaten vorgestellt. Diese liefert relativ gute Ergebnisse für die Zugläufe als solche. Ein solches Verfahren ist prinzipiell erweiterbar auf das vorliegende Simulationsmodell; es könnten gemessene Passagierströme (konkret eine geeignete O/D-Matrix) zur Validierung verwendet

werden. Dieses Verfahren ist allerdings mit einigen Fallstricken behaftet (vgl. Abschnitt II.3.3.1). Da im Rahmen dieser Arbeit keine geeigneten Passagierdaten zur Verfügung standen, kann nur plausibilisiert werden, dass mittels des Simulationsmodells die gewünschten Zielsetzungen erreicht werden können:

Das oben beschriebene Modell diene ursprünglich zur Analyse diverser Fragestellungen im schienengebundenen Personenverkehr. Zu ihnen zählen

1. *Unterstützung der Netzplanung*: Es sollten Konsequenzen von Veränderungen in der Topologie, also im Falle von Strecken- bzw. Bahnhofsneu- und umbauten, untersucht werden können.
2. *Unterstützung der Fahrplanung*: Das Auffinden neuralgischer Punkte im Fahrplan bzw. die Robustheit eines gegebenen Plans sollte ermöglicht werden.
3. *Schulungssystem für Disponenten*: Disponenten sollten am System die Folgen dispositiver Maßnahmen direkt ablesen können, ohne in das Realsystem eingreifen zu müssen.
4. *Visualisierung des Systems*: Eine graphische Veranschaulichung des Systems kann zur Analyse der Basisdaten sehr hilfreich sein.<sup>147</sup>
5. *Bewertung von Dispositionsstrategien*: Das System sollte eine Analyse der Güte verschiedener Dispositionsstrategien ermöglichen.
6. *Abbildung von Passagierbewegungen und -verhalten*: Im Modell sollte eine Möglichkeit zur direkten Steuerung von Passagieren durch die Dispositionskomponente angeboten werden.

Für diese Arbeit ist das Erreichen der beiden letztgenannten Zielsetzungen von primärer Bedeutung, weswegen an dieser Stelle plausibilisiert werden soll, ob das vorgestellte Modell dazu geeignet ist.

Von Anfang an war der Schwerpunkt der Modellierung nicht hauptsächlich auf die technischen Aspekte des Bahnsystems ausgelegt, es sollte vielmehr von Anfang an eine realistische Anzahl von Passagieren (im günstigsten Fall: alle) modelliert werden, um die strategisch sinnvolle Ausrichtung eines EVU an dessen Kunden zu betonen.

Aus den obigen Erörterungen wird deutlich, dass der sowohl Ablauf als auch Aufbau des Simulationsmodells dem realen System entsprechen. Die Züge benutzen die Gleise zwischen den Bahnhöfen und fahren ihrem Fahrplan gemäß von einem Bahnhof zum anderen, sie blockieren die gerade benutzten Streckenabschnitte für andere Züge, vergleichbar mit den Sperrzeitentritten im Realsystem. Das Modell kann daher prinzipiell zur Analyse des Transportsystems der Deutschen Bahn AG genutzt werden.

Unabhängig von der Eignung des Modells für Topologieplanung (Ziel 1) oder Disponentenunterstützung per Visualisierung (Ziel 5) ist ebenfalls festzuhalten, dass mit der Integration

---

<sup>147</sup> In der Tat wurden auf diese Weise diverse Unstimmigkeiten in den Topologiedaten der Bahn gefunden und – im Modell – beseitigt.

des Passagierrouter-Moduls und der Möglichkeit zur flexiblen Implementierung des Passagierverhaltens das Ziel Nummer 6 erreicht ist; das System weist Schnittstellen und Module zur Passagiersteuerung auf. Es ermöglicht damit den vollständigen Test der kundenorientierten Disposition.

Das Simulationsmodell bietet zudem die technische Möglichkeit, sehr leicht beliebige Dispositionsstrategien zu integrieren, was einen hohen Wert an sich darstellt. Es ist also prinzipiell möglich, Konsequenzen verschiedener Strategiealternativen mit einem gegebenen festen Streckennetz, Fahrplan und Passagieraufkommen zu testen. Störungsverteilungen und –häufigkeiten sind dabei variabel. Damit ist das Ziel 5 prinzipiell erreicht.

Wenn dabei die Passagierrouuten bzw. deren Verteilung auf Start- und Zielbahnhöfe nicht dem Realsystem entsprechen, sinkt natürlich die Glaubwürdigkeit quantitativer Aussagen. Trotzdem können zumindest verschiedene Strategien miteinander verglichen werden, wenn alle anderen Inputs in das Modell gleich bleiben. Outputunterschiede können dann direkt auf die verschiedenen Strategien zurückgeführt werden, sodass in dieser Arbeit immerhin Strategieempfehlungen gegeben werden können. Allerdings ist *nicht auszuschließen*, dass in der Simulation erfolgreichere Strategien in der Praxis nicht unbedingt bessere Ergebnisse liefern müssen. Die der Experimentation in Kapitel IV gewonnenen Erkenntnisse sind also in letzter Konsequenz eher ein „Proof of Concept“ als eine Handlungsempfehlung an die Deutsche Bahn AG – ganz abgesehen davon, dass auch die vorgestellten Methoden selbst keinerlei Anspruch erheben, bestmögliche Dispositionsergebnisse zu bestimmen.

#### III.2.2.2.5 Konzeptionelle Abweichungen vom realen System

Dem Ziel des Simulationssystems geschuldet, einen Betriebstag innerhalb relativ kurzer Zeit – im niedrigen Stundenbereich – simulieren zu können, wurde an einigen Stellen bewusst ein geringerer Detaillierungsgrad gewählt.

- Gleise in den Bahnhöfen sind nur implizit mittels Bahnhofskapazitäten berücksichtigt.
- Die verwendeten Topologiedaten des Netzwerkes sind zwar relativ detailliert, aber nicht atomar – in der Realität existiert i. d. R. eine noch feinere Einteilung.
- Störungen werden im Modell nur auf die Züge übertragen, es ist zunächst nicht vorgesehen, einzelne Strecken zu sperren. Einerseits war dafür die Datengrundlage nicht ausreichend<sup>148</sup>, andererseits kann eine derartige Störung durchaus abgebildet werden, indem einem Zug eine besonders große Verspätung zugefügt wird.
- Spezifische Merkmale von Passagieren, z. B. Typ, Alter, Erfahrung, Gepäckmenge etc. werden, wenn überhaupt, momentan nur implizit über die Variation der persönlichen Übergangszeiten modelliert.
- Züge werden nicht weiter unterteilt, d. h., unterschiedliche Kapazitäten oder Wagenkonfigurationen werden nicht modelliert.

---

<sup>148</sup> Zwar können natürlich Strecken aus der Topologiedatenbank entfernt werden, diese wären aber im Modell nicht von den nicht oder nicht korrekt erfassten Strecken zu unterscheiden.

Diverse weitere Eigenschaften und Bestandteile des Bahnsystems – bspw. Zugbesetzungen – wurden ebenfalls nicht modelliert, sind aber für die hier erfolgenden Analysen ohne Belang.

#### III.2.2.2.6 Implementierung

Die Programmierung des vorgestellten Modells erfolgt in der Programmiersprache JAVA, die aufgrund der sehr guten Eignung zur Erstellung verteilter Systeme ausgewählt wurde. Zusätzlich wurde eine in JAVA implementierte Simulationsbibliothek eingesetzt, nämlich das an der Universität Hamburg entstandene Framework für die diskrete, ereignis- und prozessorientierte Simulation DESMO-J (Discrete-Event Simulation and Modelling in Java; vgl. [Lechner99] und [DESMO-J 2005]).

DESMO-J stellt neben dynamischen Komponenten auch eine Reihe von Klassen zur Abbildung der statischen, für die Simulation notwendigen Basisfunktionen zur Verfügung, wie z. B. Warteschlangen, Zufallszahlengeneratoren, Ereignis- und Zeitmanagement. Es können Ereignisse mit ihren spezifischen Abläufen modelliert und über einen Zeitplan in eine Ereignisliste eingefügt, entfernt oder verschoben werden.

Die einzelnen Komponenten des Modells, bspw. Disponent, Zugrouter, Topologiemanager und die Passagierverwaltungen wurden ebenfalls in JAVA implementiert, jedoch ohne Nutzung der Basisklassen von DESMO-J. Der Passagierrouter wurde aus Performanzgründen in C++ entwickelt. Er kann, wie alle anderen Modellkomponenten, über den JAVA-eigenen Kommunikationsmechanismus der *Remote Method Invocation* (RMI) angesprochen werden.

## IV Bahnseitige Strategien für die kundenorientierte Disposition

*„Mo|bi|li|tät die; - <lat.>: 1. (geistige) Beweglichkeit. 2. Beweglichkeit von Individuen od. Gruppen innerhalb der Gesellschaft. 3. (Bevölkerungsstatistik) die Häufigkeit des Wohnsitzwechsels einer Person“*

Duden Fremdwörterbuch<sup>149</sup>

In den Kapiteln I und II wurde gezeigt, dass dispositive Maßnahmen offensichtlich direkten Einfluss auf die Kundenzufriedenheit haben. Ihre Anwendung in Form von Dispositionsstrategien im Rahmen eines Entscheidungsunterstützungssystems böte dem menschlichen Disponenten über die bisherige bloße Anzeige von Information hinaus eine wertvolle Entscheidungsunterstützung, da ein Mensch die große Menge zur Verfügung stehender Informationen nicht in gleicher Geschwindigkeit wie ein Computer verarbeiten kann. Zusätzlich würde auf diese Weise ein Instrument geschaffen, mit dem längerfristig ggf. fällige Entschädigungsleistungen der Bahn minimiert werden könnten. Darüber hinaus ermöglichen Dispositionsstrategien eine nichttriviale automatisierte Disposition, was im Rahmen der Simulation Voraussetzung für die Bewertbarkeit und Vergleichbarkeit verschiedener Dispositionsstrategien ist.

Anschließend wurde in Kapitel III eine Simulations- bzw. Dispositionsarchitektur entwickelt und erläutert, an welcher Stelle verschiedene Algorithmen zur Berechnung einer Dispositionsentscheidung integriert werden können.

Es bleibt demnach die Frage zu klären, auf welche Weise (oder: mit welchem Algorithmus) dispositive Maßnahmen im Sinne des Kunden im Konfliktfall berechnet werden könnten. Dass die Berechnung dann durch den Disponenten selbst oder verschiedene seiner (Dienst-) Agenten übernommen wird, ist im eigentlichen Sinne nämlich nur aus Modellierungssicht interessant.

Der folgende Abschnitt widmet sich also der Berechnungslogik der Disposition: Er erklärt diverse denkbare Strategien, die zur Disposition in der Praxis geeignet erscheinen. Neben einigen einfachen Heuristiken wird in dieser Arbeit exemplarisch die Simulation des weiteren Ablaufs vorgestellt. Zusätzlich wird eine Entscheidungsunterstützung durch mathematische Optimierung detailliert erläutert. Diese Strategiekomponente stellt insofern eine Besonderheit dar, als dass sie nicht nur zur Beurteilung der anderen Strategien eingesetzt, sondern für manche Entscheidungssituationen auch als Online-Algorithmus verwendet werden kann.

Da die Umsetzung dieses Konzepts der kundenorientierten Disposition getrennt von jeglicher Passagiersteuerung stattfinden kann, und nicht einmal einen Eingriff in die bisherige

---

<sup>149</sup> Zitiert nach [Duden 2001].

Aufbau- und Ablauforganisation erfordert<sup>150</sup>, wurde den Dispositionsstrategien ein eigenes Kapitel gewidmet.

## IV.1 Grundlagen

Begonnen wird mit einer Grundsatzbetrachtung zu Lösungsmöglichkeiten für die Dispositionsproblematik. Anschließend werden Definitionsstrategien genauer definiert und klassifiziert.

### IV.1.1 Lösungsverfahren für die Dispositionsproblematik

Im Rahmen dieser Thesis wurden diverse Verfahren zur Berechnung von Dispositionentscheidungen implementiert und getestet. Dies geschah aus mehrerlei Gründen:

- *Proof of Concept*: Wie schwierig ist die Integration verschiedener Algorithmen in die Dispositionsarchitektur?
- *Evaluation der Möglichkeit des Einsatzes exakter Verfahren*: Ist es möglich, das Online-Optimierungsproblem der Disposition in Echtzeit *exakt* zu lösen? Kann ein exaktes Verfahren wenigstens zeitlich und räumlich begrenzt als Offline-Benchmark eingesetzt werden?
- *Test der Wartezeitregeln*: Ist die Dispositionsstrategie der Wartezeitregeln (vgl. Abschnitt II.4.4.4) eine gute Strategie im Sinne der kundenorientierten Disposition?
- *Vorschlag sinnvoller Dispositionsstrategien*: Gibt es Strategien, die in der Simulation – und damit hoffentlich in der Praxis – besser funktionieren als die Wartezeitregeln der Bahn? Explizit sollten dabei aufgrund der Natur des Problems *keine* optimalen Strategien gesucht werden; die Strategien sollten vielmehr einfach anzuwenden sein und, zumindest teilweise, ohne komplette Passagierinformation auskommen<sup>151</sup>.

Ganz allgemein lassen sich Methoden zur Lösung eines Optimierungsproblems, sei es nun online oder offline, in *exakte* und *heuristische Verfahren* unterteilen. Nachfolgend soll zunächst eine kurze Übersicht über vorhandene Methoden zur Lösung von Optimierungsproblemen gegeben werden.

#### IV.1.1.1 Exakte Verfahren

Exakte Verfahren versuchen einen Output zu finden, der eine gegebene Zielfunktion unter Einhaltung bestimmter Nebenbedingungen, sog. *Restriktionen*, maxi- oder minimiert. Ggf. wird gezeigt, dass kein Optimum existiert. Dabei werden bisweilen sehr komplexe Systeme in u. U. Millionen Variable enthaltende mathematische Gleichungen und Ungleichungen umge-

---

<sup>150</sup> Es wäre absolut unproblematisch, einige der hier vorgestellten Methoden der kundenorientierten Disposition direkt in der Praxis zu testen.

<sup>151</sup> I. d. R. wird eine bessere Informationsgrundlage zur besseren Entscheidung führen. Daher sollte der Anspruch an eine Dispositionsstrategie, die im Kundensinne bessere Ergebnisse liefert als die Wartezeitregeln, in erster Linie Praktikabilität unter den heutigen Voraussetzungen sein.

setzt, die wiederum einen Lösungsraum aufspannen, in denen eine konkrete Ausprägung des Variablenvektors einen möglichen Systemzustand, bspw. ein durchführbares Produktionsprogramm, repräsentiert. Jeder Aktivität einer Variablen wird in der Regel in der Kostenfunktion ein Kostenwert zugeordnet, um eine Lösung bewerten zu können. Die Lösung mit minimalen Kosten respektive maximalem Profit soll im Anschluss in die Realität übertragen werden.

Die theoretische Laufzeit der meisten dieser Verfahren ist Angesichts der NP-Vollständigkeit im schlechtesten Fall (*worst-case*) nicht polynomiell.<sup>152</sup> Obwohl sich Probleminstanzen konstruieren lassen, bei denen die tatsächliche Laufzeit dem *worst-case* entspricht, verhält sich in praxi manch exaktes Verfahren bei der Lösung zahlreicher Modelle unproblematisch; viele Instanzen lassen sich in linearer Laufzeit lösen<sup>153</sup>. Trotzdem gilt als Faustformel: Je größer die Zahl der Variablen (diskret oder kontinuierlich) eines Optimierungsproblems ist, und je „nichtlinearer“ die Restriktionen sind, desto schneller werden die Grenzen des Machbaren erreicht.

Eine Klasse von Optimierungsproblemen sind die der *mathematischen Programmierung*: Bestehen Restriktionen und die Kostenfunktion aus linearen Verknüpfungen kontinuierlicher, beschränkter Variablen, wird das Optimierungsmodell *Lineares Programm* (LP) genannt. Die lineare Programmierung spielt eine besondere Rolle in der mathematischen Optimierung, da zum einen eine Vielzahl verschiedener Probleme als lineare Programme modelliert werden können, und zum anderen bereits eine Reihe effizienter Algorithmen, die riesige lineare Programme lösen können, entwickelt wurde (vgl. für eine Anwendung [Kliwer 2005]). Die Methoden der linearen Programmierung spielen ferner eine wichtige Rolle bei der Analyse und Lösung nichtlinearer mathematischer Optimierungsprobleme (s. u.).

Ein *gemischt-ganzzahliges Optimierungsproblem* (mixed integer problem, MIP) liegt vor, wenn eine Teilmenge der Variablen, die den Systemzustand beschreiben, nur ganzzahlige Werte annehmen darf. Bspw. können Dispositionsentscheidungen durch binäre (0/1-) Variablen modelliert werden: Soll ein Zug auf einen verspäteten Zubringer warten, wird die entsprechende Variable auf „1“ gesetzt, fährt der Zug ohne zu warten ab, nimmt die gleiche Variable den Wert „0“ an.

Lineare Optimierungsprobleme, die nur kontinuierliche Variablen beinhalten, sind in polynomieller Zeitkomplexität, z. B. mittels sogenannter Interior-Point-Methoden (s. z. B. [Anderson 1998] oder [Wright 1997]), lösbar, d. h., der Zeitaufwand für die Lösung derartiger Probleme lässt sich als Polynom bezüglich der Größe des Problems darstellen. Mit der Verwendung ganzzahliger Variablen, die zur Modellierung bspw. logischer Restriktionen oft zwingend vonnöten sind, steigt jedoch die Schwierigkeit der Lösung; Probleme dieser Art werden als *NP-vollständig* (nichtdeterministisch polynomiell) klassifiziert. Es handelt sich um Probleme, für die keine polynomiellen Algorithmen bekannt sind. Bei der Modellierung ist es

---

<sup>152</sup> So zeigen [Gatto et al. 2004] für einige Varianten des Verspätungsmanagements die NP-Vollständigkeit.

<sup>153</sup> Insbesondere gilt dies für einige Modelle in der mathematischen Optimierung.

demnach ungeheuer wichtig, effiziente Formulierungen zu finden, um ein Problem lösen zu können: Es kann vorkommen, dass zwei äquivalente Modellformulierungen dramatisch unterschiedliche Lösungszeiten implizieren. Während die eine mittels moderner Software in wenigen Sekunden gelöst werden kann, läuft die zweite Stunden oder Tage, wenn überhaupt eine Lösung gefunden wird.

Diese Art der mathematischen Modellierung unterstellt zwei bisweilen unrealistische Annahmen: 1) Das reale Problem lässt sich überhaupt in mathematischen Ausdrücken isomorph zur Realität modellieren und es liegt 2) eine klare Ordnung zwischen zwei Outputvektoren bzgl. ihrer Qualität vor.

Beides ist in vielen praktischen Anwendungen nicht immer zu gewährleisten: Zum Beispiel sind Irrationalitäten schwer zu modellieren, und die Bewertung unterschiedlicher Lösungen ist längst nicht immer offensichtlich.

Optimierungsprobleme im Produktionsplanungsprozess im fahrplanbasierten Verkehr werden sehr oft als gemischt-ganzzahliges Problem formuliert<sup>154</sup>. Zur Lösung wurden ausgefeilte Lösungstechniken entwickelt, welchen meist eine langjährige Erfahrung inhärent ist. Grundlage fast aller Methoden ist das *Branch&Bound-Verfahren*. Dabei wird ein Entscheidungsbaum sukzessive aufgebaut und abgearbeitet, dessen Blätter den zulässigen Lösungen des Problems entsprechen. Neue Knoten werden durch die Bildung von Unterproblemen generiert, indem einer *Branching-Variable* diskrete (Integer-) Werte zugewiesen werden. Die Auswahl der Variable kann nach verschiedenen Kriterien erfolgen. Für die neu generierten Knoten werden zunächst untere bzw. obere Schranken (je nachdem, ob minimiert oder maximiert wird) berechnet, indem eine *LP-Relaxation* des MIP-Problems gelöst wird. Eine LP-Relaxation erhält man, indem die im MIP-Modell enthaltenen Integer-Forderungen aufgehoben werden. Falls für eine LP-Relaxation eines Teilproblems eine optimale Lösung gefunden wird, die für das Ausgangsproblem (MIP) zulässig (erfüllt alle Integer-Forderungen) und besser als alle bisher gefundenen MIP-Lösungen ist, werden Zielfunktionswert und Lösung als die bisher besten gespeichert, und für den Knoten ist kein weiteres Branching mehr nötig. In diesem Fall wird dann das eigentliche *Bounding* durchgeführt: es werden alle Knoten, deren untere Schranken (obere Schranken im Falle der Maximierung) schlechter als der Zielfunktionswert der eben gefundenen MIP-Lösung sind, samt ihrer Unterbäume gestrichen. Erfüllt die Lösung der LP-Relaxation die Ganzzahligkeitsbedingungen nicht, wird geprüft, ob die berechnete Schranke besser ist als die beste der bisher gefundenen MIP-Lösungen. Ist dies nicht der Fall, wird der Knoten als „bounded“ erkannt und nicht weiter bearbeitet.

Wesentlich für die Güte des Branch&Bound-Verfahrens sind die *Branching-Strategie*, nach der die Auswahl der Variablen erfolgt, nach der neue Zweige im Baum gebildet werden, und die Art, in der die Unterprobleme in jedem Knoten gelöst werden, um eine *Bounding-Funktion* zu erhalten. Letzteres geschieht bspw. mittels Interior-Point-Methoden, *Column Generation* (vgl. z. B. [[Barnhart et al. 1998]]), *Branch&Cut* (vgl. z. B. [Hoffmann/Padberg

---

<sup>154</sup> Einige interessante Beispiele für alle Planungsphasen sind in [Bussieck et al. 1997] zu finden.

1985] oder [Nemhauser/Wolsey 1988] oder *Lagrange-Relaxation* (vgl. [Reeves 1995]), ohne dass diese Verfahren hier näher erläutert werden sollen.

#### IV.1.1.2 Heuristische Verfahren

Eine Heuristik (gr. Heurískein = finden, entdecken) ist eine „methodische Anleitung“ oder auch „Anweisung zur Gewinnung neuer Erkenntnisse“ (vgl. [Duden 2001]). In diese Kategorie fallen prinzipiell alle Algorithmen, die eine spezielle Problemstruktur in irgendeiner Weise ausnutzen. Bekannte heuristische Verfahren der Informatik sind universelle Lösungsstrategien wie *Simulated Annealing*, *Genetische Algorithmen*, *Tabu Search*, *Ant Systems* etc. Solche Verfahren werden auch Metaheuristiken genannt. Und basieren sehr oft auf lokaler Suche im Wertebereich der jeweiligen Zielfunktion. Dabei wird, ausgehend von einem Startwert, unter benachbarten Lösungen die je nach Verfahren günstigste ausgewählt, bspw. diejenige mit der größten Verbesserung des Zielfunktionswerts im *Hill-Climbing-Verfahren*. Intelligenteren Verfahren nehmen auch Verschlechterungen des Zielfunktionswerts in Kauf, vor allem um zu vermeiden, dass nur lokale Optima gefunden werden.

Bei heuristischen Verfahren gelingt es nicht immer, die Optimalität der gefundenen Lösungen zu beweisen. Trotzdem liefern sie für viele Problemstellungen sehr gute Lösungen in akzeptabler Zeit. Einen guten Einstieg zum Thema heuristische Verfahren bietet [Reeves 1995].

Da bei der Disposition als Online-Optimierungsproblem die Optimalität einer Dispositionsentscheidung letztlich eher ein Prognoseproblem ist, wurde auf der Einsatz exakter Verfahren in dieser Arbeit eingeschränkt, lediglich die mathematische Optimierung wurde als Online-Algorithmus getestet. Stattdessen wurden im Hinblick auf Praktikabilität diverse einfache Heuristiken getestet, u. a. der Wartezeitregeln der Deutschen Bahn AG, und miteinander verglichen. Zusätzlich wurde eine Simulationskomponente zur Berechnung von Warteentscheidungen implementiert, um die einfache Machbarkeit dessen zu demonstrieren. In den folgenden Abschnitten werden diese Algorithmen zur Disposition näher erläutert.

### IV.1.2 Definition und Klassifikation von Dispositionsstrategien

Allgemein formuliert ist eine Dispositionsstrategie  $D$  eine Verfahrensvorschrift zur Generierung eines Plans zur Durchführung mindestens einer Maßnahme, der mindestens einen in einem bestimmten Zustand  $Z_i$  des Bahnnetzes vorliegenden Primärkonflikt  $K$  auflöst.

Eine Dispositionsstrategie im Sinne dieser Arbeit muss demnach mindestens den Primärkonflikt auflösen, also konkret *mindestens eine* Warte- bzw. Abfahrtsentscheidung geben, kann aber auch – dann aufgrund zu prognostizierender Werte – auch mehrere der oben definierten Maßnahmen (vgl. Abschnitt II.4.1.3) enthalten.

Für die kundenorientierte Disposition reicht die Betrachtung von Strategien, welche über Maßnahmen zur Anschlussicherung bzw. zur Passagierinteraktion entscheiden, aus. Daher werden in der Implementierung alle anderen dispositiven Maßnahmen ausgeblendet.

In einem System zur kundenorientierten Disposition müssen nach Ansicht des Autors in jedem Fall mehrere Dispositionsstrategien zur Auswahl stehen, von denen einige schnell und in deterministischer Zeit zu berechnen sind, implementiert sein. Jede Methode kann dann in der Praxis mit einem „Konfidenzniveau“<sup>155</sup> ausgestattet werden, welches die zu erwartende Qualität der Methoden widerspiegelt. Im Normalfall kann dann die Methode mit der höchsten Konfidenz ausgewählt werden, wobei letztlich in der Praxis ein Experte – bspw. unter Verwendung des Drei-Hirn-Ansatzes<sup>156</sup> (vgl. [Althöfer 2005]) – über das tatsächliche Handeln ab einem bestimmten Ausmaß eines Konflikts entscheiden muss. Die eingesetzten Methoden sollten ständig auf ihre Güte hin überprüft werden, damit ihre jeweilige Konfidenz angepasst werden kann. Dabei ist nicht nur wichtig, dass eine Strategie im Sinne der Zielfunktion gute Ergebnisse liefert, sondern auch, ob die resultierenden Pläne umgesetzt werden können.

Eine Klassifikationsmöglichkeit für Dispositionsstrategien ist wie gesehen die Exaktheit des Verfahrens. Die beiden wichtigsten Kriterien für die Verwendbarkeit einer Dispositionsstrategie in der Praxis sind jedoch zum einen die *Laufzeit* und zum anderen der *Informationsbedarf*. Beide sind selbstverständlich miteinander korreliert.

Eine *Klassifikation nach der Laufzeit* ist eigentlich eine Pseudoklassifikation, da sie sowohl mit der Art der Dispositionsstrategie, d. h., Typ der zu Grunde liegenden Berechnungsvorschrift (Heuristik beziehungsweise exaktes Verfahren), als auch mit dem Informationsbedarf (der benötigten Datenmenge) zusammenhängt.

In dieser Arbeit werden sowohl Strategien verfolgt, die eine Entscheidung aufgrund einer einfachen Berechnungsvorschrift treffen, als auch Verfahren, welche komplexere Lösungsansätze integrieren, nämlich *Simulation* und *Mathematische Programmierung*. Die beiden letztgenannten Verfahren sind nicht deterministisch in ihrer Laufzeit, sodass ihre Verwendbarkeit in der Praxis eingeschränkt ist<sup>157</sup>. Trotzdem kann ihre Verwendung gelingen.

*Nach dem Informationsbedarf* lässt sich wie folgt untergliedern: In die Dispositionsentscheidung können Passagier- und Zuginformationen ebenso einfließen wie Daten zum weiteren Fahrplan – letztere insbesondere in Bezug auf Anschlüsse an den Folgebahnhöfen. Auch eine kombinierte Betrachtung dieser Informationsbedarfe ist denkbar. Zudem besteht natürlich ebenfalls die Möglichkeit, generell für alle Züge festzulegen, ob auf Zubringer gewartet werden soll oder nicht. Eine individuelle Dispositionsentscheidung je Abfahrt wird in diesem Fall nicht getroffen. Eine mögliche Klassifikation der Strategien nach ihren Informationsbedarfen ist in Abbildung 33 dargestellt.

---

<sup>155</sup> Konfidenz sei hier nicht im statistischen Sinne definiert. Es müssen vielmehr über die Analyse von Vergangenheitsdaten Erfahrungswerte bestimmt werden, welche Strategie wann einzusetzen ist.

<sup>156</sup> Vereinfacht gesagt wählt dabei der Mensch den ihm am besten erscheinenden Vorschlag aus einer Reihe Möglichkeiten aus.

<sup>157</sup> Für die mathematische Optimierung existieren Beispiele dafür, dass kleine Änderungen in der Modellformulierung den Unterschied zwischen sehr kurzer und extrem langer Lösungszeit ausmachen können. Auch die Lauflänge einer Simulation ist eine Zufallsvariable, obwohl bei dem in dieser Arbeit verwendeten Modell zur Simulation als Dispositionsstrategie aufgrund seiner Einfachheit i. d. R. annehmbare Laufzeiten erzielt werden.

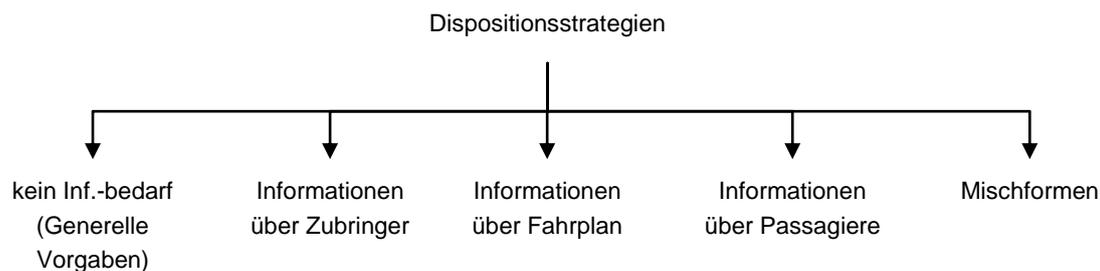


Abbildung 33: Einteilung verschiedener Dispositionsstrategien nach dem Informationsbedarf

#### IV.1.2.1 Generelle Wartevorgaben

Dies sind die einfachsten Formen von Dispositionsentscheidungen, denn es werden keine individuellen Situationsbetrachtungen vorgenommen. Stattdessen legt man generell für alle Züge fest, ob diese ggf. auf ihre Zubringer zu warten haben oder nicht. Es wird grundsätzlich keine Unterscheidung zwischen den beteiligten Zubringern vorgenommen. Daher existieren im Grunde nur die folgenden zwei Möglichkeiten von Strategien mit generellen Wartevorgaben: *planmäßig abfahren* oder *auf sämtliche Zubringer warten*, wobei letzteres zusätzlich mit einer generellen Höchstwartedauer verbunden werden könnte.

#### IV.1.2.2 Zubringerabhängige Entscheidungen

Diese Strategien beziehen Informationen über die Zubringer in ihre Entscheidung mit ein. In erster Linie handelt es sich bei den relevanten Daten um die Zuggattungen (ICE, RB etc.). Diese geben Aufschluss darüber, welche Züge vorrangig zu behandeln sind. So wird beispielsweise ein ICE, der überwiegend im Fernverkehr eingesetzt wird und wegen der längeren Strecken seltener fährt, kaum auf Regionalbahnen mit höherer Fahrfrequenz Rücksicht nehmen müssen. Der Informationsbedarf für diese Strategien ist vergleichsweise gering. Mögliche notwendige Daten sind:

- Gattungen der beteiligten Züge
- voraussichtliche Ankunftszeiten der verspäteten Zubringer zur Ermittlung der Wartezeit

Zu dieser Gruppe von Dispositionsstrategien zählt auch die Anwendung globaler Regelwartezeiten; wie sie die Bahn einsetzt. Allerdings erfolgt realiter nur ein Teil der Abwicklung durch ein Regelsystem (oder weiteren Eingriff); ein anderer Teil wird durch einen menschlichen Disponenten nachbearbeitet, vgl. Abschnitt II.4.4.4.

#### IV.1.2.3 Fahrplanabhängige Entscheidungen

Weitere mögliche Einflussfaktoren für Warteentscheidungen sind Informationen über die Anschlüsse des aktuell betrachteten Zugs an seinen noch folgenden Bahnhöfen sowie die generelle Erreichbarkeit der Stationen seiner weiteren Route von diesem Bahnhof aus. Durch Betrachtung der Folgeanschlüsse kann eine Begrenzung der Wartezeit festgelegt sein, wenn davon ausgegangen wird, dass keiner oder nur ein bestimmter Anteil davon durch eine verzö-

gerte Abfahrt in Gefahr geraten darf, verpasst zu werden. Auch ist es denkbar, Alternativverbindungen am aktuellen Bahnhof zu untersuchen, um einschätzen zu können, wie gut mögliche Reiseziele bei Verpassen dieses Zugs erreicht werden können. Für diese Strategien sind detaillierte Informationen erforderlich, die jedoch größtenteils relativ einfach aus den Fahrplänen zu ermitteln sind. Folgende Daten können hier bspw. von Interesse sein:

- Plan-Abfahrtszeiten der Anschlusszüge an Folgebahnhöfen
- voraussichtliche Verspätungen der Anschlusszüge an Folgebahnhöfen
- Plan-Ankunftszeiten des aktuellen Zugs an Folgebahnhöfen
- Routen und Sollzeiten aller Züge, die diesen Bahnhof noch passieren

#### IV.1.2.4 Passagierabhängige Entscheidungen

Eine der Hauptthesen dieser Arbeit ist die Sinnhaftigkeit des Treffens von Dispositionsentscheidungen auf Basis von Passagierinformationen. Dabei werden bspw. die Reisendenzahlen in Zubringern und Abbringer verglichen oder auch nur die Umsteiger betrachtet. Die grundsätzliche Idee besteht darin, eine Lösung zu finden, die sich bei möglichst wenigen Passagieren nachteilig auswirkt.

In der Praxis liegen entsprechende Informationen allerdings nur in ungenügendem Maße vor, da sich trotz großer Frühbucherabatte (vgl. Kapitel I) bei Weitem nicht alle Reisenden frühzeitig auf eine bestimmte Verbindung festlegen können oder wollen. Für die Simulation ist dies hingegen nebenrangig, sodass hier auch Strategien dieser Art getestet werden sollen.

Interessante Daten für die Anwendung dieser Strategien sind z. B.:

- Passagierzahlen in den beteiligten Zügen
- Passagierzahlen an den Folgebahnhöfen
- Reiserouten von Passagieren

#### IV.1.2.5 Entscheidungen auf Basis kombinierter Informationsarten

Es liegt nahe, verschiedenartige Informationen zu kombinieren und dadurch bei der Warteentscheidung unterschiedliche Aspekte einzubeziehen.

Der Informationsbedarf selber beziehungsweise die Verarbeitung teilweise großer Datenmengen kann zum Teil durch intelligente Datenstrukturen, z. B. geschickte Netzwerkmodellierung, wie bspw. bei dem Passagierrouter, abgedeckt werden, muss aber zum anderen Teil durch Verkleinerung der betrachteten Modelldimensionen, im konkreten Fall durch Verkleinerung des Zeithorizonts bzw. eine Gruppierung von Problembestandteilen in einem mathematischen Modell gesenkt werden.

## IV.2 Bewertungsmaßstäbe „guter“, kundenorientierter Disposition

Jede Dispositionsstrategie muss trivialerweise bewertet werden können, um eine Vergleichbarkeit mit anderen Dispositionsstrategien zu gewährleisten. Die Kriterien der Bahn sind bisher relativ unspezifisch: Die Zugpünktlichkeit und die „Flüssigkeit“ des Verkehrs

zählen dazu, ohne dass es genaue Verfahrensvorschriften gäbe, wie beides im Einzelfall zu gewährleisten ist, vgl. Abschnitte II.4.4.4 und II.4.4.5.

Es sind demnach geeignete Bewertungskriterien für die Güte von Dispositionsstrategien abzuleiten. Diese sind sowohl für eine Ex-post- als auch für eine Ex-ante Betrachtung von Bedeutung, um zum einen die Qualität einer Dispositionsentscheidung evaluieren zu können, und zum anderen eine Aussage darüber treffen zu können, welche Dispositionsstrategie in welcher Entscheidungssituation die beste ist.

Die Vergleichbarkeit dieser Strategien ermöglicht zudem das Akquirieren von Wissen über die Qualität vergangener Dispositionsentscheidungen; das Lernen „guter“ Disposition durch Ex-Post-Betrachtung wird somit erst möglich. In der Praxis könnten verschiedene Strategien für gewisse Zeitintervalle getestet werden, indem einfach die ggf. normierten, gewichteten Passagierwarteminuten ceteris paribus gegeneinander abgewogen werden. In Verbindung mit dem in Abschnitt IV.7 gezeigten mathematischen Programm zur Offline-Analyse ist es sogar möglich zu bestimmen, wie weit das Offline-Optimum für einige Testinstanzen entfernt ist.

Für die Bewertung einer Dispositionsentscheidung sind prinzipiell mehrere Operationalisierungen denkbar. So könnte z. B. versucht werden, die Folgen einer Entscheidung monetär zu bewerten. Dieser Ansatz wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht weiter verfolgt, da erstens keine dazu notwendigen Daten über anfallende Kosten während des Betriebs des Bahnnetzes vorliegen, und zweitens der Sinn dieser Betrachtungen ohnehin zweifelhaft ist: In den letzten Jahren wurden verfügbare Erstazressourcen (Crews und Züge, die für den Notfall bereitstehen) mittels Optimierungsverfahren bereits weitgehend ausgedünnt, sodass Einsparungen durch eventuell bessere Ressourcennutzung kaum zu erzielen sind. Der Fahrplan muss aber *in jedem Fall* erfüllt werden, sodass ein gewisser Fixkostenblock immer gegeben ist. Gleichwohl sind alternative Dispositionsentscheidungen natürlich immer auch von der reinen Kostenseite gegeneinander abzuwiegen – der Einsatz eines neuen Zugs ist natürlich viel teurer, als bspw. ein geschicktes Umleiten bereits fahrender Züge, selbst wenn dafür ein paar Passagiere länger warten müssen. Stehen sich aber als Alternativen nur die Anschlusssicherung bzw. das Trennen einer Anschlussbeziehung gegenüber, so können andere Überlegungen in den Mittelpunkt treten. In dieser Arbeit soll dann die *Steigerung des Kundennutzens* das primäre Ziel darstellen, wobei von der folgenden, einfachen Überlegung ausgegangen wird: der Nutzen des Kunden steigt bei der Dienstleistung „Bahnfahrt“, wenn die *ungeplante Wartezeit* sinkt.

Wartezeit kann weiterhin in verschiedene Wartezeitqualitäten untergliedert werden, nämlich „Wartezeit im Zug“ und „Wartezeit im Bahnhof“. Dabei ist anzunehmen, dass Wartezeit im Bahnhof als unangenehmer empfunden wird als im Zug. Natürlich bietet ein großer Bahnhof heute weit mehr als einfache Wartehallen, sodass die in einem Bahnhof verbrachte Zeit – bspw. als Einkaufserlebnis – als durchaus angenehm empfunden werden kann. Dadurch wird jedoch die *Zeit am Bahnsteig*, in der direkt auf den Zug gewartet wird, keineswegs schöner. Zudem kommt ein Passagier im Zug in jedem Fall seinem Ziel näher.

Darüber hinaus wird Wartezeit mit steigender Dauer überproportional unangenehmer. Dies führt zu dem Funktionsverlauf wie in den Graphen in Abbildung 34, welche qualitativ die einem Kunden entstehenden Kosten (als Negativnutzen) der Wartezeit gegenüberstellen (vgl. dazu auch [Suhl et al. 2001a]).

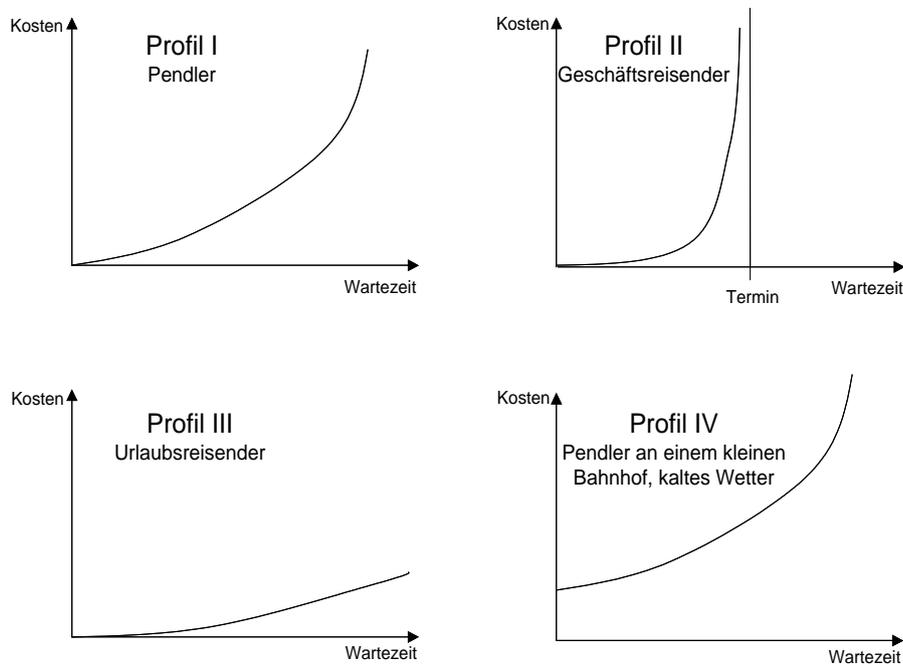


Abbildung 34: Kostenfunktionen verschiedener Kategorien von Reisenden im Vergleich

Diese Kostenfunktionen können für verschiedene Arten von Kunden unterschiedlich aussehen: eine denkbare Unterteilung würde bspw. berücksichtigen, dass ein Geschäftsreisender mit zunehmender Wartedauer nicht nur überproportional wütend wird, sondern irgendwann ein Zeitpunkt eintritt, an dem seine Kosten gegen unendlich gehen, weil er seinen Termin effektiv verpassen wird (und daraufhin die Bahn für seine nächste Reise vielleicht nicht wieder wählt). Andersherum wird ein Urlaubsreisender über einen längeren Zeitraum vielleicht gelassen reagieren und, weil er die Bahn ohnehin nicht oft nutzt, sie auch bei der nächsten Reise wieder benutzen. Mögliche Nutzerprofile für verschiedene Arten von Reisenden finden sich ebenfalls in Abbildung 34.

Der Ansatz verschiedener Kundentypen wird nicht weiterverfolgt, da die Entscheidung über die effektiven Nutzenfunktionen nicht nur willkürlich, sondern auch noch undemokratisch ist, und diese letztlich zudem – in dieser Phase der Systementwicklung – sehr schwierig zu erheben sind.<sup>158</sup>

Eine interessante Möglichkeit zur Integration dieses Gedankens in das Preissystem der Bahn wären Versicherungen: es ist durchaus denkbar, eine Reise gegen Unpünktlichkeit zu

<sup>158</sup> Jeder Passagier wird natürlich sein pünktliches Ankommen für unglaublich wichtig halten, dasjenige anderer Passagiere dagegen als relativ unwichtig erachten.

versichern: gegen eine bestimmte Summe könnte, ab einer bestimmten Verspätung, ein Schadensersatz im Bereich von 0 bis 100 % des Fahrtpreises oder sogar eine Konventionalstrafe – wie im Güterverkehr – fällig werden. Dies ist jedoch sicherlich ein Politikum: Passagiere hatten – aufgrund einer Gesetzesvorschrift aus den 80-er Jahren des 19. Jahrhunderts (!) lange Zeit kein verbrieftes Recht auf Entschädigungsleistungen, selbst wenn die Bahn sich mittlerweile durch eine „Kundencharta“ verpflichtet hat, Entschädigungen bei größeren Verspätungen zu leisten (vgl. z. B. [Spiegel 2004]). Jegliche Regelung dieser Art basiert also noch immer auf der Kulanz der Deutschen Bahn AG.

Der Test solcher Preisinitiativen wäre zwar mit dem hier verwendeten Simulationssystem ohne weiteres möglich, würde aber die Grenzen dieser Arbeit sprengen, da viel weiter gehende Untersuchungen zu Kundengewohnheiten und Verspätungshäufigkeiten sowie versicherungsmathematische Überlegungen zu verfolgen wären.

Mögliche (Gesamt-) Zielfunktionen kundenorientierter Disposition sind unter Zuhilfenahme einer der in Abbildung 34 dargestellten Funktionen z. B. die Minimierung der Summe der Wartezeitkosten aller durch die Anwendung der Dispositionsstrategie betroffenen Passagiere.

Dabei sollte es eine Obergrenze für die Wartezeit eines einzelnen Passagiers geben, wenn die Dispositionsstrategie dies nicht ohnehin vorgibt. Gibt es keine Obergrenze, können „zu lange“ wartende Passagiere im System immerhin im System identifiziert und durch Entschädigungsleistungen irgendwelcher Art besonders behandelt werden.

Nebenkriterien für die Güte der Dispositionsentscheidung sind zudem die *Einschränkung der Zahl notwendiger Dispositionshandlungen* sowie bspw. *eine höhere Gewichtung der Anschlussicherung bei Passagieren in Tagesrandlage*. Prinzipiell sind diverse weitere Nebenbedingungen denkbar, unter denen die Güte einer Strategie betrachtet werden kann, bspw. messbare Kriterien wie die Zahl induzierter Folgeverspätungen /-konflikte, welche zusätzliche Dispositionsentscheidungen bedingen. Letztlich wird ein Disponent von Fall zu Fall entscheiden, ob eine vorgeschlagene Entscheidung sinnvoll, oder, aufgrund einer speziell vorliegenden Situation, zu verwerfen ist.

Nachfolgend werden exemplarisch einige der Dispositionsstrategien vorgestellt, die für die vorliegende Arbeit umgesetzt wurden.

### IV.3 Modellbildung: Das Bahnsystem aus Sicht der kundenorientierten Disposition

Nachfolgend bezeichne  $N_x$  die Kardinalität der Menge  $\mathcal{E}$ .

Der Modellierungszeitraum sei  $0, \dots, T$ , ein Zeitschritt sei bspw. die in Fahrplänen übliche Einheit „Minute“.

Es seien nun

$$B^* := \{b_1^*, \dots, b_{N(B^*)}^*\}$$

die Menge aller Stellen im Bahnnetz und

$$B \subseteq B^* := \{b_1, \dots, b_{N(B)}\}$$

die Menge der Bahnhöfe, die auf Zugläufen Stationen darstellen.

$B(z)$  sei dann definiert als die Menge aller Stationen eines Zugs auf seiner Fahrt.

Zudem sei

$$Z := \{z_1, \dots, z_{N(Z)}\}$$

die Menge aller physikalischen Züge.

Alle Entitäten des Bahnsystems, die für die kundenorientierte Disposition interessant sind, sowie deren Beziehungen untereinander, sind im Fahrplan enthalten.

Der Fahrplan  $F$  sei definiert als die geordnete Menge der (Fahrplan-) Ereignisse:

$$F := \{e_1, \dots, e_{N(F)}\}.$$

Dabei seien die einzelnen Ereignisse chronologisch und anschließend nach Typ sortiert; bei gleichzeitigen Ereignissen werden zuerst die Ankunfts-, danach die Abfahrtsereignisse betrachtet. Ein (Fahrplan-) Ereignis  $e$  sei wiederum als Treffpunkt eines bestimmten Zugs  $z$  mit einer Stelle  $b$  definiert:

$$e_i := (z_i, b_i, typ_i, t_i, s_i(t), g_i), 1 \leq i \leq N(F), \text{ wobei}$$

$z_i \in Z$  den Zug,

$b_i \in B$  die Stelle,

$typ_i \in \{Start, An, Ab, End, Durch\}$  den Typ,

$t_i$  den planmäßigen Eintrittszeitpunkt,

$s_i(t)$  die von der Zeit abhängige Verspätung (oder, falls das Ereignis noch nicht eingetreten ist, die prognostizierte Verspätung)

und

$g_i$  die Gattung des Zugs, welche dieser zum Ereigniszeitpunkt innehat<sup>159</sup>,

bezeichne.

Der Fahrplan gibt normalerweise Routen durch das oben beschriebene Netzwerk von Ereignissen vor, indem Zugläufe beschrieben werden: Eine Zugfahrt  $F(z)$  eines Zugs  $z$  kann als eine Menge von An- und Abfahrtsereignissen  $e$  des entsprechenden Zugs angesehen werden, es sei:

$$F(z) := \{e_k \mid z(e_k) = z\}, \text{ mit } r_i \text{ als Anzahl der Ereignisse der Fahrt } i.$$

Vereinfachend bezeichne  $e_{ij}$  die  $j$ -te Station des Zugs  $i$ .

---

<sup>159</sup> Die Gattung eines Zugs kann sich durchaus während des Zuglaufs ändern. Dies ist aus Sicht der Problemstellung zwar irrelevant, soll aber in der Modellierung aus Gründen der Verallgemeinerbarkeit erhalten bleiben. Zu einem späteren Zeitpunkt können damit bspw. Simulationen gattungsabhängiger Preisvariationen durchgeführt werden.

Anmerkung:

Die Verspätung  $s$  eines Ereignisses ist im eigentlichen Sinne eine Zufallsvariable. Im Idealfall liegt demnach in praxi eine Wahrscheinlichkeitsfunktion einer theoretischen oder mindestens empirischen statistischen Verteilung über den Eintritt des Ereignisses zu einem bestimmten Zeitpunkt vor. Diese Verteilung ist von Natur aus kontinuierlich, für das vorliegende Problem kann sie jedoch auch diskret gewählt werden, da Angaben in Minutenschritten absolut ausreichen. Sie ist ferner nach oben und unten beschränkt: Ein Zug mit einer aktuellen Verspätung kann aufgrund physikalischer Restriktionen maximal einen Teil dieser Verspätung aufholen, und selbst ein Liegenbleiben eines Zugs auf einer eingleisigen Strecke lässt sich innerhalb einer maximalen Reaktionszeitspanne beheben.

$S$  ist zusätzlich von der Zeit abhängig: Je größer der Abstand der Prognose vom tatsächlichen Ereigniseintritt, desto größer wird i. d. R. die Unsicherheit sein, mit der  $s$  bestimmt werden kann, und umgekehrt. Es soll jedoch gelten  $\lim_{t \rightarrow t_i + E(s_i(t))} t_{IST} - t_i - E(s_i(t)) = 0$ , d. h., je näher der Eintrittszeitpunkt heranrückt, desto genauer wird auch die Prognose des Zeitpunkts sein.

Für die Prognose der Verspätung  $s$  wird zusätzlich unterstellt, dass die Position des jedes Zugs sowie seine technischen Gegebenheiten und die Streckencharakteristik bekannt sind, damit die Prognose selbst deterministisch erfolgen kann.<sup>160</sup>

## IV.4 Einfache Heuristiken zur Entscheidungsfindung

Der Klassifikation aus Abschnitt IV.1.2 folgend, werden zunächst einige denkbare heuristische Ansätze, die für diese Arbeit simulativ getestet wurden, vorgestellt. Die Auflistung ist naturgemäß nicht vollständig; beliebige andere Methoden sind leicht in das System zu integrieren.

### IV.4.1 Strategiekonstruktion

Zusätzlich zu den obigen Definitionen seien  $wz_{\max}$  eine generell festgesetzte maximale Wartezeit und  $wd_{e_{ij}, e_{i'j'}}$  die voraussichtliche Wartedauer von Ereignis  $e_{ij}$  auf  $e_{i'j'}$ , nämlich  $t_{i'j'} + s_{i'j'} - t_{ij}$ .

Die Wartebedingung  $W(e_{ij}, e_{i'j'})$  gibt an, ob ein Zug, dessen Abfahrtsereignis  $e_{ij}$  ansteht, auf das Eintreten des verspäteten Ankunftsereignisses  $e_{i'j'}$  warten soll oder nicht. Dementsprechend wird als Ergebnis entweder der Wert 1 („Warten“) oder 0 („Nicht Warten“) zurückgegeben. Die Wartebedingung ist strategieabhängig und wird jeweils in den folgenden Beschreibungen der einzelnen Strategien spezifiziert. Für eine positive Warteentscheidung wird folgende Bedingung als zutreffend vorausgesetzt:

<sup>160</sup> In der Praxis kann es passieren, dass die genaue Position z. B. wegen Übertragungsfehlern unbekannt ist, es also nicht bekannt ist, ob ein Zug nicht an einem Kontrollpunkt vorbeigekommen oder einfach nur die Meldung dafür nicht angekommen ist.

$$wd_{e_{ij}, e_{i'j'}} \leq wz_{\max}$$

Es sei ferner  $VZ_{e_{ij}}$  als Menge aller verspäteten Ankunftsereignisse (Zubringer) bzgl. eines Abfahrtsereignisses  $e_{ij}$  definiert:

$$VZ_{e_{ij}} := \{e_{i'j'} \mid typ_{i'j'} \in \{an, end\} \wedge b_{i'j'} = b_{ij} \wedge t_{i'j'} \leq t_{ij} \wedge wd_{e_{ij}, e_{i'j'}} > 0\}$$

Es sei weiter  $WD_{e_{ij}}$  als Menge aller Wartedauern der verspäteten Ankunftsereignisse, welche die Wartebedingung erfüllen, definiert:

$$WD_{e_{ij}} := \{wd_{e_{ij}, e_{i'j'}} \mid e_{i'j'} \in VZ_{e_{ij}} \wedge W(e_{ij}, e_{i'j'})\}$$

Das Supremum dieser Menge gibt jeweils die resultierende Verzögerung eines Ereignisses  $e_{ij}$  an:

$$s_{ij} \geq \sup(WD_{e_{ij}})$$

#### IV.4.1.1 Generelle Wartevorgaben

*Strategie #1.* Es wird grundsätzlich keine Rücksicht auf verspätete Zubringer genommen, jeder abfahrbereite Zug verlässt den Bahnhof planmäßig. Die Wartezeit nach dieser Strategie beträgt somit immer Null. Da kein individueller Entscheidungsprozess stattfindet, sind auch keine weiteren Informationen erforderlich.

$$W(e_{ij}, e_{i'j'}) := 0$$

*Strategie #2.* Ein abfahrbereiter Zug wartet immer so lange, bis sämtliche verspäteten Zubringer am Bahnhof angekommen sind. Die Verzögerung einer Abfahrt hängt also von der erwarteten Ankunftszeit des voraussichtlich spätesten Zubringers ab, sofern diese nicht ein evtl. generell festgelegtes Limit überschreitet. Für eine sofortige Wartezeitermittlung bei Abfahrbereitschaft müssen die Verspätungen der einzelnen Zubringer bekannt sein.

$$W(e_{ij}, e_{i'j'}) := 1$$

#### IV.4.1.2 Zubringerabhängige Entscheidungen

Zu dieser Gruppe von Dispositionsstrategien zählt, wie erwähnt, auch die Anwendung globaler Regelwartezeiten. In der hier verwendeten Notation könnten die Regelwartezeiten wie folgt formuliert werden:

$$W(e_{ij}, e_{i'j'}) := wd(e_{ij}, e_{i'j'}) \leq rwz_{g_{ij}, g_{i'j'}} \rightarrow 1$$

Dabei bezeichne  $rwz_{g_{ij}, g_{i'j'}}$  wiederum die globale Regelwartezeit eines Zugs der Gattung  $g_{ij}$  bzgl. eines Zubringers der Gattung  $g_{i'j'}$ .

*Strategie #3.* Die Zuggattungen werden nach ihrer Vorrangigkeit in bestimmte Kategorien eingeteilt (vgl. Tabelle 7). Auf einen verspäteten Zubringer wartet ein Zug nur dann, sofern dieser einer höherwertigen Kategorie als er selbst angehört. Es kann eine generelle maximale Wartezeit für Züge festgelegt werden.

Sei eine Funktion  $kat(g_{ij})$  derart definiert, dass sie einen der Vorrangigkeit einer Zuggattung  $g_{ij}$  entsprechend hohen Wert liefert, lässt sich die Wartebedingung für diese Strategie wie folgt ausdrücken:

$$W(e_{ij}, e_{i'j'}) := kat(g_{ij}) < kat(g_{i'j'}) \rightarrow 1$$

Tabelle 7: Kategorisierung nach Zuggattungen

Zuggattung	Kategorie
ICE, EC, IC, IR	A
D, SE, RB, RE	B
S	--
Sonstige	C

*Strategie #4.* Diese Strategie unterscheidet sich von der vorherigen nur dadurch, dass auch auf Zubringer der gleichen Kategorie gewartet wird.

$$W(e_{ij}, e_{i'j'}) := kat(g_{ij}) \leq kat(g_{i'j'}) \rightarrow 1$$

*Strategie #5.* Bei diesem Vorgehen wartet ein abfahrbereiter Zug auf verspätete Zubringer, die voraussichtlich innerhalb der Mindestübergangszeit eintreffen werden. Daher müssen für Anwendung dieser Strategie die voraussichtlichen Ankunftszeiten der Zubringer sowie die bahnhofsabhängige Mindestübergangszeit bekannt sein. Sei diese für den Bahnhof  $b_{ij}$  des Ereignisses  $e_{ij}$  durch die Funktion  $müz(b_{ij})$  gegeben, dann lautet die Wartebedingung dieser Strategie:

$$W(e_{ij}, e_{i'j'}) := wd_{e_{ij}, e_{i'j'}} \leq müz(b_{ij}) \rightarrow 1$$

#### IV.4.1.3 Fahrplanabhängige Entscheidungen

*Strategie #6.* Ein Zug wartet höchstens so lange auf verspätete Zubringer, wie er nicht in Gefahr gerät, die Anschlusszüge seines weiteren Fahrplans zu verpassen. Ermittlungsgrundlage für die Dispositionsentscheidung sind demnach die planmäßigen Abfahrtszeiten der Anschlusszüge. Es wird also zunächst durch die Betrachtung dieser Daten quasi ein Puffer ermittelt, der die maximal mögliche Verzögerung für die Abfahrt am betroffenen Folgebahnhof darstellt. Die endgültige Wartezeit ergibt sich dann aus den erwarteten Verspätungsminuten des voraussichtlich spätesten Zubringers, der nach jeweils aktuellem Wis-

sensstand innerhalb dieser Zeitspanne  $t$  am aktuellen Bahnhof eintreffen wird. Sei  $P_{e_{ij}}$  die Menge der Pufferzeiten des abfahrtsbereiten Zugs an all seinen noch folgenden Stationen, so kann die Wartebedingung wie folgt definiert werden:

$$W(e_{ij}, e_{i'j'}) := wd_{e_{ij}, e_{i'j'}} \leq \inf(P_{e_{ij}}) \rightarrow 1$$

*Strategie #7.* Diese Strategie ist beinahe identisch zu der vorherigen; allerdings werden bereits bekannte Verspätungen der weiteren Anschlusszüge berücksichtigt. Der Puffer und damit die mögliche Wartezeit werden somit u. U. großzügiger bemessen. Sei  $P'_{e_{ij}}$  die Menge der Pufferzeiten des abfahrtsbereiten Zugs an all seinen Folgestationen unter Berücksichtigung möglicher Verspätungen der Anschlusszüge, so lautet die Wartebedingung für diese Strategie:

$$W(e_{ij}, e_{i'j'}) := wd_{e_{ij}, e_{i'j'}} \leq \inf(P'_{e_{ij}}) \rightarrow 1$$

*Strategie #8.* Möglicherweise zeigen Erfahrungswerte, dass ein bestimmter Anteil  $q$  der Anschlusszüge in Gefahr geraten darf, verpasst zu werden. Das führt im Vergleich zu den beiden vorherigen Strategien logischerweise u. U. zu einer längeren Verzögerung der aktuell betrachteten Abfahrt. Da, wie oben erwähnt, bestimmte Züge vorrangig zu behandeln sind, sollten auch hier die beteiligten Zuggattungen, bspw. durch unterschiedliche Gewichtungen, berücksichtigt werden.

Sei mit  $mp(e_{ij}, q)$  eine Funktion gegeben, welche die minimale Pufferzeit für den Zug des Ereignisses  $e_{ij}$  unter Berücksichtigung der Quote  $q$  liefert. Dann lässt sich die Wartebedingung in diesem Fall formulieren als:

$$W(e_{ij}, e_{i'j'}) := wd_{e_{ij}, e_{i'j'}} \leq mp(e_{ij}, q) \rightarrow 1$$

*Strategie #9.* Es wird eine generelle Zeitspanne  $t$  festgelegt, innerhalb der ein anderer Zug mit gleicher Route diesen Bahnhof passieren muss. Ist das nicht der Fall, muss die Abfahrt so lange verzögert werden, bis alle verspäteten Zubringer da sind. Eine weitergehende Überlegung wäre es, die Suche nach Alternativverbindungen auf gleichwertige Züge zu beschränken, da die Nutzung bestimmter Zuggattungen mit einem Preiszuschlag verbunden ist. Im Regelfall weisen gleiche Routen allerdings bereits auch auf gleichwertige Zuggattungen hin. Darüber hinaus wäre denkbar, bei der Festlegung der o. g. Zeitspanne  $t$  Unterscheidungen nach der Uhrzeit vorzunehmen, um bspw. in Tagesrandlage tendenziell länger zu warten. Die Wartebedingung für diese Dispositionsstrategie lautet

$$W(e_{ij}, e_{i'j'}) := t'_{e_{ij}} > t \rightarrow 1,$$

wobei  $t'_{e_{ij}}$  die Zeit bis zum Eintreffen des nächsten Zugs mit gleicher Route bezeichne.

*Strategie #10.* Diese Strategie ähnelt der vorherigen, allerdings fehlt hier die Bedingung, dass eine Alternativverbindung die gleiche Route aufweisen muss. In diesem Fall wird, vereinfacht gesagt, dass alle Folgebahnhöfe von diesem Bahnhof aus direkt und in angemessener

Zeit  $t$  mit einem Alternativzug erreicht werden können. Ist das für mindestens eine der Folgestationen nicht gewährleistet, muss auf alle verspäteten Zubringer gewartet werden. Ob die Ankunftszeit eines anderen Zugs an einem der Folgebahnhöfe angemessen ist oder nicht, kann sich wiederum nach der Uhrzeit richten. Die Wartebedingung kann analog der von Strategie #9 formuliert werden, wobei  $t'_{e_{ij}}$  jedoch als maximale Zeitverzögerung durch Ankünfte an den Folgebahnhöfen über die jeweils nächstmögliche Direktverbindung von  $b_{ij}$  ausgehend definiert sei.

*Strategie #11.* Bei dieser Ermittlungsmethode geht man noch einen Schritt weiter, indem lediglich gewährleistet wird, dass alle Folgebahnhöfe *irgendwie* in angemessener Zeit  $t$  erreichbar sind. Dabei wird den Passagieren ggf. zusätzliches Umsteigen zugemutet. Auch hier gilt wieder die gleiche Wartebedingung wie für die Dispositionsstrategie #9. In diesem Fall muss  $t'_{e_{ij}}$  dann die maximale Zeitverzögerung durch Ankünfte an den Folgebahnhöfen über die jeweils nächstmögliche Verbindung (von  $b_{ij}$  aus) angeben.

#### IV.4.1.4 Passagierabhängige Entscheidungen

Die Menge der Passagiere sei nun mit  $P := \{P_1, \dots, P_{N(P)}\}$  bezeichnet.

Ganz allgemein gilt: Eine Route  $R$  durch das Bahnnetz ist eine zeitlich geordnete Menge von Ereignissen:  $R = (e_{r_1}, \dots, e_{r_{N(R)}})$ , wobei für zwei beliebige, aufeinander folgende Ereignisse  $e_i, e_j$  der Route  $z_i = z_j \wedge b_i \neq b_j$  oder  $z_i \neq z_j \wedge b_i = b_j$  gilt, d. h., entweder, es wird derselbe Zug weiter benutzt, oder es wird an einem Bahnhof umgestiegen.

Es bezeichne nun  $R := \{R_1, \dots, R_{N(R)}\}$  die Menge aller Routen. Dann sei ein einzelner Passagier  $P_l$  durch die Menge der Routen bestimmt, die er im Lauf der Zeit innehat:

$$P_l := \{R_l(t)\}.$$

Die geplante (Soll-) Route des Passagiers ist  $R_l(0)$ , die tatsächliche (Ist-) Route ergibt sich zu  $R_l(T)$ .

Es bezeichne ferner  $p_{ij}$  Anzahl der Passagiere, die Route zum Zeitpunkt  $t_{ij}$  das Ereignis  $e_{ij}$  enthält,  $umst(e_{i'j'}, e_{ij})$  die Anzahl der Passagiere mit den zwei aufeinander folgenden Ereignissen  $e_{i'j'}$  und  $e_{ij}$  in ihrer Reiseroute  $R(t_{i'j'})$  (Umsteiger),  $zust(e_{ij})$  die Anzahl der zum Zeitpunkt  $t_{ij}$  an den Folgebahnhöfen des Zugs mit dem Ereignis  $e_{ij}$  wartenden Zusteiger für diesen Zug und  $passbf(e_{ij})$  die Anzahl der zum Zeitpunkt  $t_{ij}$  an den Folgebahnhöfen des Zugs mit dem Ereignis  $e_{ij}$  wartenden Passagiere.

*Strategie #12.* Eine Möglichkeit, eine Dispositionsentscheidung auf Fahrgastinformationen zu gründen, besteht darin, auf einen verspäteten Zubringer nur dann zu warten, wenn die in ihm befindlichen Umsteiger einen bestimmten Anteil der Passagiere im wartenden Zug dar-

stellen bzw. überschreiten. Dazu wird im Vorfeld eine entsprechende Quote  $q$  festgelegt, deren Erfüllung je Zubringer geprüft wird. Mit anderen Worten wird auf einen verspäteten Zubringer gewartet, wenn für ihn die folgende Wartebedingung erfüllt ist:

$$W(e_{ij}, e_{i'j'}) := \frac{umst(e_{i'j'}, e_{ij})}{p_{ij}} \geq q \rightarrow 1$$

Dazu müssen detaillierte Informationen über die Passagiere bzgl. ihrer Anzahl und geplanter Reiserouten vorliegen, was zurzeit nur in der Simulation realisierbar ist.

*Strategie #13.* Während bei der vorherigen Methode je Zubringer untersucht wird, ob eine bestimmte Quote erfüllt ist und der abfahrbereite Zug seine Abfahrt ggf. entsprechend zu verzögern hat, wird nun die *Summe* der Umsteiger aller verspäteten Zubringer betrachtet. Übersteigt diese Zahl einen gewissen Anteil  $q$  der Passagierzahl des abfahrbereiten Zugs, wird auf alle verspäteten Zubringer gewartet. Die Wartebedingung für diese Dispositionsstrategie ist dann:

$$W(e_{ij}, e_{i'j'}) := \frac{\sum_{e_{i'j'} \in VZ_{e_{ij}}} umst(e_{i'j'}, e_{ij})}{p_{ij}} \geq q \rightarrow 1$$

Ist die vorgegebene Quote  $q$  nicht erfüllt, fährt der Zug planmäßig los, und alle nun noch verspäteten Zubringer verpassen diesen Anschluss.

*Strategie #14.* In diesem Fall erfolgt wieder eine Warteentscheidung je Zubringer. Allerdings werden diesmal die bloßen Passagierzahlen, unabhängig von den jeweiligen Reiserouten, betrachtet. Es wird vorausgesetzt, dass ein gewisser Anteil der Gesamtreisenden eines Zubringers in den aktuell betrachteten Zug umsteigen möchte. Daher wird auf einen verspäteten Zug dann gewartet, wenn die Anzahl seiner Passagiere eine gewisse Quote  $q$  in Bezug auf die Reisenden des Abbringers erfüllt. Die Wartebedingung lautet also:

$$W(e_{ij}, e_{i'j'}) := \frac{p_{i'j'}}{p_{ij}} \geq q \rightarrow 1$$

Diese Strategie ist bei den derzeitigen Gegebenheiten bei der Deutschen Bahn AG ein wenig praktikabler als die beiden vorherigen Methoden, da der Informationsbedarf entsprechend geringer ausfällt. Falls keine endgültigen Passagierzahlen vorliegen, könnten diese ggf. abgeschätzt werden.

*Strategie #15.* Auch hier werden statt der Umsteigerzahlen die Passagierzahlen in den Zubringern betrachtet. In diesem Fall ist allerdings wieder die Summe der Reisenden in allen verspäteten Zubringern für die Warteentscheidung relevant, und es wird wie in Strategie #13 entweder auf alle Zubringer mit Passagieren oder auf keinen verspäteten Zug gewartet. Die Abfahrt verzögert sich, wenn gilt:

$$W(e_{ij}, e_{i'j'}) := \frac{\sum_{e_{i'j'} \in VZ_{e_{ij}}} p_{i'j'}}{p_{ij}} \geq q \rightarrow 1$$

Bisher wurden nur die Reisenden in den direkt beteiligten Zügen bei der Festsetzung der Wartezeit berücksichtigt. Die vier nachfolgend beschriebenen Strategien erweitern diese Vorschläge jeweils um eine zusätzliche Betrachtung der zusteigenden bzw. aller Passagiere, die an den Folgebahnhöfen des abfahrbereiten Zugs warten.

*Strategie #16.* Im ersten Fall bedeutet dies eine Erweiterung der Strategie #12 um die zum Entscheidungszeitpunkt wartenden Zusteiger an allen weiteren Stationen des aktuellen Zugs. Damit auf einen verspäteten Zubringer gewartet wird, sollte die Anzahl seiner Umsteiger in einem angemessenen Verhältnis  $q$  zu den dann von zusätzlicher Wartezeit betroffenen Passagieren im Zug und an seinen weiteren Haltestellen stehen. So wie beim Zubringer hier nur die Umsteiger betrachtet werden, sind an den Folgestationen nur die auf diesen Zug wartenden Passagiere von Interesse. Damit auf einen verspäteten Zug gewartet wird, muss für sein ausstehendes Ankunftsereignis die folgende Bedingung erfüllt sein:

$$W(e_{ij}, e_{i'j'}) := \frac{umst(e_{i'j'}, e_{ij})}{p_{ij} + zust(e_{ij})} \geq q \rightarrow 1$$

*Strategie #17.* Die nächste Entscheidungsalternative stellt eine Erweiterung von Strategie #13 dar. In diesem Fall müssen die Umsteiger aller verspäteten Zubringer eine bestimmte Quote  $q$ , gemessen an den Passagier- und Zusteigerzahlen des abfahrbereiten Zugs, erfüllen. Es muss also gelten:

$$W(e_{ij}, e_{i'j'}) := \frac{\sum_{e_{i'j'} \in VZ_{e_{ij}}} umst(e_{i'j'}, e_{ij})}{p_{ij} + zust(e_{ij})} \geq q \rightarrow 1$$

Ist diese Bedingung wahr, wartet der Zug mit seiner Abfahrt, bis alle ausstehenden Zubringer, in denen sich relevante Umsteiger befinden, angekommen sind. Andernfalls fährt er planmäßig los, und sämtliche noch verspäteten Zubringer verpassen diesen Anschluss.

*Strategie #18.* Bei dieser Strategie werden erneut die Reisendeninformationen der Einfachheit halber vernachlässigt. Damit auf einen Zubringer gewartet wird, muss die Anzahl seiner Passagiere einen bestimmten Anteil  $q$  der Reisenden im aktuellen Zug plus der wartenden Passagiere an den Folgebahnhöfen darstellen. Einfacher ausgedrückt erreicht ein verspäteter Zug den betrachteten Anschluss, wenn gilt:

$$W(e_{ij}, e_{i'j'}) := \frac{P_{i'j'}}{p_{ij} + passbf(e_{ij})} \geq q \rightarrow 1$$

Es handelt sich also um Erweiterung von Strategie #14.

*Strategie #19.* Schließlich besteht noch die Möglichkeit, Strategie #15 um Informationen über wartende Passagiere an den Folgestationen zu erweitern. Die Wartebedingung für diese Dispositionsstrategie lautet:

$$W(e_{ij}, e_{i'j'}) := \frac{\sum_{e_{i'j'} \in VZ_{e_{ij}}} p_{i'j'}}{p_{ij} + passbf(e_{ij})} \geq q \rightarrow 1$$

Wiederum gilt, dass der Zug planmäßig abfährt, falls diese Bedingung nicht erfüllt ist.

#### IV.4.1.5 Entscheidungen auf Basis kombinierter Informationsarten

*Strategie #20.* Eine Möglichkeit, Passagierdaten und Fahrplaninformationen zu koppeln, besteht darin, alle Umsteiger in den verspäteten Zubringern einzeln zu betrachten und die jeweiligen Angebote an Alternativverbindungen zu untersuchen. In dieser Strategie gilt, dass ein Zug seine Abfahrt immer dann verzögert, wenn mindestens ein Umsteiger in einem der verspäteten Zubringer bei Verpassen dieses Anschlusses seinen Zielbahnhof nicht mehr in angemessener Zeit erreichen würde. Für die Anwendung dieser Strategie sind somit Passagier- und Fahrplaninformationen erforderlich. Die Reiseziele der Umsteiger in Verbindung mit der jeweils geplanten Ankunftszeit am Zielbahnhof stellen die Basis für eine Entscheidung dar, ob einem Reisenden die Nutzung eines anderen Zugs zugemutet werden kann. Für jeden betroffenen Fahrgast werden mit Hilfe von Fahrplandaten Alternativverbindungen gesucht. Führen diese innerhalb einer bestimmten Zeitspanne zu den Zielbahnhöfen, wird davon ausgegangen, dass der Passagier durch eine Änderung seiner Reiseroute keine entscheidenden Nachteile erfährt. Trifft dies auf alle Umsteiger zu, verlässt der abfahrtsbereite Zug den Bahnhof planmäßig. Wäre dagegen wenigstens einer der Passagiere aufgrund einer Routenänderung von einer unverhältnismäßig hohen Verlängerung seiner Reisezeit betroffen, ist die Abfahrt zu verzögern, bis der entsprechende Zubringer eingetroffen ist.

Sei  $PV_{e_{ij}, e_{i'j'}}$  die Menge aller Gesamtverspätungen der Passagiere mit den aufeinanderfolgenden Ereignissen  $e_{i'j'}$  und  $e_{ij}$ , wenn der Fall  $t_{i'j'} + s_{i'j'} > t_{ij} + s_{ij}$  eintritt. Bezeichne zudem  $t$  die maximal zumutbare Verspätung für die Passagiere. Dann kann die Wartebedingung dieser Strategie definiert werden als:

$$W(e_{ij}, e_{i'j'}) := (\exists pv \in PV_{e_{i'j'}, e_{ij}} \mid pv > t) \rightarrow 1$$

*Strategie #21.* Diese Strategie entspricht im Wesentlichen der vorherigen, nur dass zusätzlich in Kauf genommen wird, dass ein bestimmter Anteil  $q$  der Umsteiger eines verspäteten Zubringers bei Verpassen des Anschlusses von einer deutlichen Reisezeitverlängerung betroffen ist. Die Wartebedingung lautet:

$$W(e_{ij}, e_{i'j'}) := \frac{|pv \in PV_{e_{i'j'}, e_{ij}} : pv > t|}{|PV_{e_{i'j'}, e_{ij}}|} \geq q \rightarrow 1$$

*Strategie #22.* Ein Zug wartet so lange auf verspätete Zubringer, dass nach aktuellem Kenntnisstand die Gesamtwartezeit der beteiligten Passagiere minimal ist. Dabei wird auch die mögliche Erforderlichkeit neuer Routenberechnungen für Passagiere im weiteren Verlauf berücksichtigt, die durch eine evtl. verzögerte Abfahrt notwendig werden. Definiert man eine Menge  $C_{ij}$  derart, dass sie alle Kosten in Form von Passagierwarteminuten enthält, die für die relevanten Ausprägungen von  $s_{ij}$  anfallen, und sei  $s_{ij}^{\min} := s_{ij} \mid c_{ij} = \inf(C_{ij})$ , dann lautet die Wartebedingung für diese Strategie:

$$W(e_{ij}, e_{i'j'}) := wd_{e_{ij}, e_{i'j'}} \leq s_{ij}^{\min} \rightarrow 1.$$

Es lassen sich beliebige weitere Strategien dieser Art konstruieren; die hier genannten verstehen sich lediglich als Beispiele oder, bestenfalls, als Vorschläge. In der Praxis würde das Ergebnis einer solchen Berechnung dem Disponenten immerhin als Entscheidungshilfe vorgelegt werden können.

## IV.4.2 Implementierung

Die meisten der genannten Strategien sind aufgrund der algorithmischen Einfachheit unkritisch in ihrer Laufzeit, weswegen sie direkt „inline“ im Disponenten in der Programmiersprache JAVA programmiert wurden. Auch bei den aufwändigeren Berechnungen mit Passagierrouter wurden noch relativ akzeptable Zeiten erzielt, vgl. Abschnitt IV.4.3.

### IV.4.2.1 Globale Simulationsparameter für den Disponenten

Zur Steuerung und Durchführung eines Simulationslaufs müssen einige Parameter definiert sein, wenn der Disponent aktiv und nach einer bestimmten Strategie entscheiden soll.

Der Disponent kann per Voreinstellung im Simulationssystem aktiviert werden. Geschieht das nicht, läuft die Simulation mittels einer Standardstrategie, und es wird zu Beginn des Simulationslaufs kein Disponentenagent erzeugt.

Zudem ist einstellbar, welche Strategie(n) gerade Verwendung finden soll(en); die Standardeinstellung entspricht den globalen Regelwartezeiten (vgl. Abschnitt II.4.4.4) der Bahn. Diese dient auch als Rückfallstrategie, falls keine andere ausgewertet werden konnte. Einige der implementierten Algorithmen benötigen für ihre Entscheidung zusätzlich die Festlegung einer Mindestquote, Maximalzeitspanne oder diverser weiterer Parameter, vgl. Abschnitt IV.4.2. Geschieht dies nicht, werden sinnvoll erscheinende Standardwerte angenommen.

Eine weitere Einstellmöglichkeit ist die Art der Ausgabe der Reportvariablen (bspw. Anzahl der Reisenden, Summe der Passagierwarteminuten etc.).

Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, mittels einer Datenbankabfrage die Dauer bis zum Eintreffen des nächsten Zugs mit der gleichen Route wie der des aktuell betrachteten Abbringers festzustellen und anhand der so ermittelten Differenzminuten ein individuell sinnvolles Wartezeitlimit zu erhalten. In Kombination damit ist Angabe eines Mindestabstands zum nächsten Zug auf derselben Route möglich, was eine entsprechende Kürzung der maximalen Wartezeit zur Folge hat. Standardmäßig wird dabei der Wert 10 angenommen, d. h. ein Zug

würde höchstens bis zu 10 Minuten vor der planmäßigen Ankunft seines Folgezugs auf verspätete Zubringer warten. Eine generelle individuelle Ermittlung einer Wartezeitbegrenzung mag für die Praxis zwar sinnvoll sein, ist aber für die Simulation nicht empfehlenswert, da die häufigen Datenbankabfragen einen erheblichen Performanzverlust zur Folge haben. Standardmäßig wird daher eine maximale Verzögerung einer Abfahrt in Höhe von 60 Minuten angenommen.

Für die Simulation selbst müssen schließlich noch technische Angaben erfolgen, bspw. die Art des Einlesens der Fahrplandaten: Für einige Strategien muss ein größerer Fahrplanhorizont bekannt sein als für andere, weswegen ein größerer Teil des Fahrplans im Hauptspeicher vorzuhalten ist.

#### IV.4.2.2 Besonderheiten einzelner Strategien

Je nach Strategie können bestimmte der oben genannten Einstellungen notwendig sein. Ist eine Strategie nicht aufgeführt, sind keine Einstellungen vonnöten.

- *Strategie#02 – Auf alle Zubringer warten:* In diesem Fall kann die Bestimmung einer maximalen Wartezeit von Bedeutung sein, d. h. eine Zugabfahrt wird bei einer entsprechenden Festlegung nicht unbegrenzt lange verzögert. Es wird daher nicht notwendigerweise auf die Ankünfte aller verspäteten Zubringer gewartet, sondern nur auf jene, welche innerhalb einer möglicherweise geltenden Höchstwartedauer stattfinden.
- *Strategie#05 – Warten, falls Zug innerhalb MÜZ eintrifft:* Strategie #5 ist nicht implementiert, da keine genauen Angaben zu den Mindestübergangszeiten einzelner Bahnhöfe vorliegen.
- *Strategie#08 – Bestimmte Quote von Anschlusszeiten einhalten:* Es ist festzulegen, wie viel Prozent der späteren Anschlusszüge in die Gefahr geraten darf, als Folge einer hinausgezögerten Abfahrt verpasst zu werden.
- *Strategie#09, Strategie#10 – Direkte Erreichbarkeit der Folgebahnhöfe über Alternativverbindungen beachten:* Bei diesen Strategien wird mit Hilfe einer Datenbankabfrage geprüft, ob die Folgebahnhöfe entweder mit einem Zug gleicher Route oder mit einem Zug beliebiger Route innerhalb einer bestimmten, konfigurierbaren Zeitspanne erreichbar sind.
- *Strategie#11 – Generelle Erreichbarkeit der Folgebahnhöfe über Alternativverbindungen beachten:* Im Unterschied zu den beiden vorherigen Strategien muss keine Direktverbindung zu den Folgebahnhöfen bestehen; vielmehr wird für Passagiere eine alternative Route gesucht. Dazu muss eingestellt werden, wie viele Minuten nach der planmäßigen Ankunft des abfahrtsbereiten Zugs ein Folgebahnhof jeweils durch mindestens eine Alternativverbindung spätestens erreicht werden sollte.
- *Strategie#12 bis Strategie#19 – Dispositionsentscheidung anhand von Passagierverhältnissen:* Alle diese Strategien vergleichen Passagier- bzw. Umsteigerzahlen der verspäteten Zubringer mit den Reisendenzahlen im abfahrtsbereiten Zug und z. T. an den Bahnhöfen und setzen sie in Relation. Da eine Dispositionsentscheidung davon

abhängig ist, ob dieses Verhältnis eine bestimmte Grenze übersteigt, ist zur Initialisierung eine Mindestquote anzugeben. Ansonsten hat in diesen Fällen nur noch die Angabe einer maximalen Wartedauer einen möglichen Einfluss auf das Ergebnis.

- *Strategie#20 – Erreichbarkeit der Ziele betroffener Umsteiger beachten:* Um die Erreichbarkeit der Zielbahnhöfe von Umsteigern bei Verpassen eines Anschlusszugs zu überprüfen, werden durch den Passagierrouter Alternativverbindungen für diese Reisenden ermittelt. Zudem ist für eine Entscheidung, ob die Ziele in angemessener Zeit mit anderen Zügen zu erreichen sind, ein entsprechender Wert vorzugeben, welcher die maximal zumutbare Gesamtverspätung für einen Passagier in Minuten angibt.
- *Strategie#21 – Erreichbarkeit der Ziele eines Mindestanteils der betroffenen Umsteiger beachten:* Zusätzlich zu den Einstellungen aus #20 muss ein Wert gesetzt werden, welcher den zu tolerierenden Anteil der Umsteiger mit alternativer Zielerreichung außerhalb der festgelegten Zeitspanne beschreibt.
- *Strategie#22 – Minimierung der Passagierwarteminuten:* Da bei Anwendung dieser Strategie die Auswirkungen verschiedener Wartezeiten untersucht werden, um die aus einer Dispositionsentscheidung voraussichtlich resultierende Erhöhung der Gesamtverspätung aller Reisenden zu minimieren, müssen auch hier verschiedene Alternativverbindungen ermittelt werden. Ansonsten wirkt sich hier lediglich noch eine mögliche Festsetzung einer maximalen Verzögerungszeit für Zugabfahrten auf die Dispositionsentscheidung aus.

### IV.4.3 Ergebnisse der Experimentation

Einige der zuvor beschriebenen Dispositionsstrategien sind unter vergleichbaren Bedingungen auf ihren Erfolg bzgl. der aus ihren Entscheidungen resultierenden Passagierwartezeiten zu testen. Dabei wird angenommen, dass eine niedrigere Summe der Wartezeiten eine höhere Kundenzufriedenheit impliziert. Die aufgrund der Testergebnisse Erfolg versprechenden Strategien eignen sich möglicherweise auch in der Praxis besonders für eine kundenorientierte Disposition.

#### IV.4.3.1 Testumgebung und Simulationsbedingungen

Jede Simulation wird verteilt auf zwei Clients ausgeführt, die jeweils von einem dritten Rechner synchronisiert werden. Für die Simulationen, bei denen der Passagierrouter eingesetzt wird, wird ein weiterer Rechner benötigt.

Der Simulationszeitraum beträgt sechs Stunden, wobei das erste Simulationsintervall mit einer Länge von 30 Minuten als Einschwingphase betrachtet wird (vgl. Abschnitt III.2.1). Während dieser Phase sind noch keine Reisenden in der Simulation enthalten, diese werden erst ab der Simulationszeit 6.30 Uhr aus der Datenbank eingelesen. Das bedeutet eine Berücksichtigung von rund 1 Mio. Bahnreisenden und knapp 9.000 Zügen bei der Abbildung des Bahnbetriebs. Für etwa 10 % der Züge werden wie oben beschrieben Verspätungen generiert.

Die im nächsten Abschnitt vorgestellten Ergebnisse wurden unter Anwendung der nachfolgend genannten Quoten erzielt<sup>161</sup>.

- *Strategie #12*: Auf einen Zubringer wird dann gewartet, wenn die Anzahl der Umsteiger in den abfahrbereiten Zug mindestens 30 % der dort anwesenden Passagiere beträgt.
- *Strategie #13*: Stellt die Summe der Umsteiger aller verspäteten Zubringer mindestens 70 % der im abfahrbereiten Zug anwesenden Passagiere dar, wartet dieser auf sämtliche Zubringer, in denen sich Umsteiger befinden.
- *Strategie #14*: Ein Zubringer muss mindestens die fünffache Zahl der Passagiere des abfahrbereiten Zugs aufweisen, damit dieser dessen Ankunft abwartet.
- *Strategie #15*: Beträgt die Summe der Reisenden in allen verspäteten Zubringern mindestens die zehnfache Zahl der Passagiere im abfahrbereiten Zug, verzögert dieser seine Abfahrt, bis sämtliche Zubringer mit Passagieren eingetroffen sind.
- *Strategie #16*: Ein Zug wartet auf einen verspäteten Zubringer, sofern dessen Umsteiger mindestens 30 % der Reisenden im wartenden Zug zzgl. Der bereits wartenden Zusteiger an Folgebahnhöfen darstellen.
- *Strategie #17*: Die Summe der Umsteiger aller verspäteten Zubringer muss mindestens 70 % der Passagiere im abfahrbereiten Zug zzgl. Der bereits wartenden Zusteiger an Folgebahnhöfen betragen, damit die Abfahrt entsprechend lange verzögert wird.
- *Strategie #18*: Eine Abfahrt wird verzögert, sofern die Anzahl der Passagiere eines verspäteten Zubringers mindestens fünfmal größer ist als die der Fahrgäste im abfahrbereiten Zug zzgl. Der bereits wartenden Passagiere an dessen noch folgenden Stationen.
- *Strategie #19*: Ist die Summe der Passagiere aller verspäteten Zubringer zehnmal größer als die der Reisenden im abfahrbereiten Zug sowie an dessen Folgestationen, wird die Abfahrt verzögert, bis alle Zubringer mit Passagieren am Bahnhof angekommen sind.
- *Strategie #20*: Die Dispositionsentscheidungen sind so zu treffen, dass die Gesamtverspätung eines Passagiers eine Dauer von 40 Minuten möglichst nicht überschreitet.

Unabhängig von der gewählten Dispositionsstrategie gilt für alle Züge eine maximale Wartezeit von 60 Minuten. Auf eine Berücksichtigung der Taktung eines Zugs durch eine individuell zu ermittelnde Höchstwartedauer wurde aus Performanzgründen verzichtet. Je Testfall sind fünf Simulationen auszuführen.

---

<sup>161</sup> Dabei ist es möglich, ja sogar sehr wahrscheinlich, dass es „bessere“ Parametereinstellungen gibt, weil Simulation naturgemäß keine Optimalität garantiert. Die genannten Werte haben sich in Pilotläufen als sinnvoll herausgestellt.

#### IV.4.3.2 Auswertung

Eine Stichprobe ergab, dass im Verlauf einer Ausführung durchschnittlich 371,6 (59,5) Verspätungen<sup>162</sup> für zufällig gewählte Züge generiert wurden. Die erzeugten Verzögerungen betragen zwischen 1 (0) und 24 (2,24) Minuten bei einem Mittelwert von 5,46 (0,03) Minuten und einer durchschnittlichen Standardabweichung von 4,47 (0,07) Minuten. Der am häufigsten generierte Wert ist in allen Läufen 1, der Median jeweils 4. In Abbildung 35 wird eine beispielhafte Verteilung generierter Verspätungen dargestellt.

*Laufzeitverhalten.* Die Dauer einer Simulation hängt im Wesentlichen vom Einsatz des Passagierrouters, von der Anzahl der Abfahrtskonflikte und von dem Zeitaufwand für eine Warteentscheidung ab. Dabei sind die Ergebnisse allerdings nicht unbedingt auf die Verhältnisse in der Praxis zu übertragen. Bspw. ist die Ermittlung möglicher Pufferzeiten im Fahrplan eines Zugs bei Simulationen, in denen die Strategie #6 eingesetzt wurde, aufgrund der Notwendigkeit zusätzlicher Datenbankabfragen mit einem relativ hohen Aufwand verbunden. Dabei dürften derartige Informationen im realen Bahnbetrieb einfacher zu ermitteln sein als z. B. aktuelle Umsteigerzahlen in Zügen, die dagegen im Simulationssystem wiederum relativ schnell ermittelt werden können, wie die Ergebnisse der Strategien 12 und 13 zeigen (vgl. Tabelle 8). Die Strategien 20 und 22, welche hier die mit Abstand höchsten Werte liefern, erfordern dagegen auch in der Praxis den größten Aufwand, da die betroffenen Passagiere einzeln betrachtet und mögliche Alternativrouten für sie ermittelt und ausgewertet werden.

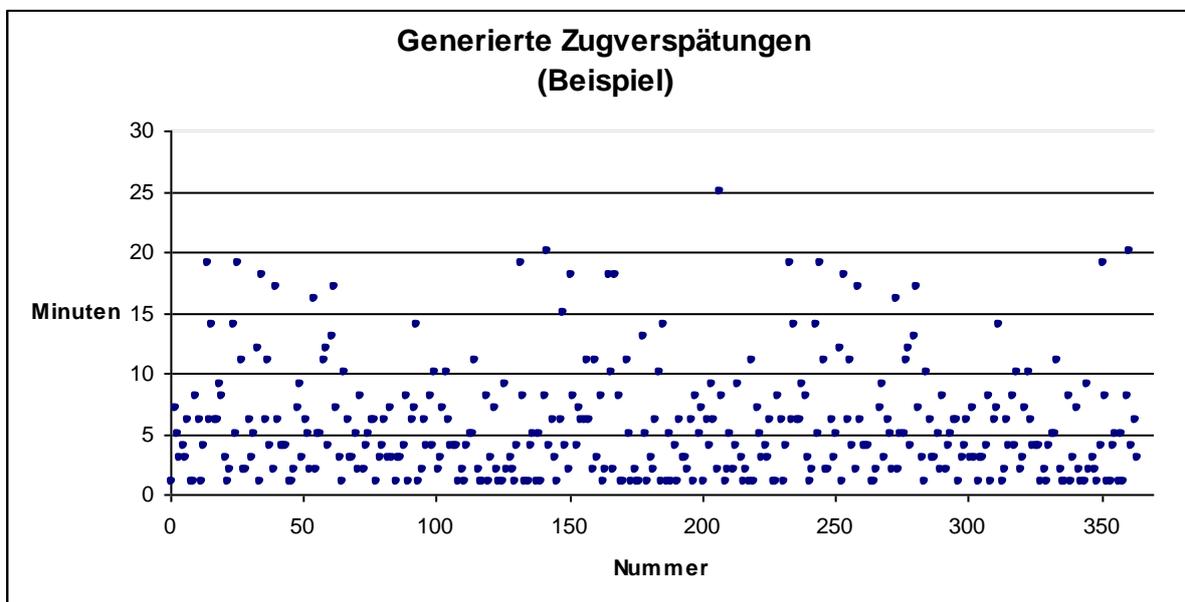


Abbildung 35: Beispiel für generierte positive Zugverspätungen im Verlauf einer Simulation

<sup>162</sup> Der in Klammern gesetzte Wert gibt jeweils die Standardabweichung an.

Auch die Anzahl der Abfahrtskonflikte ist nicht nur abhängig von den Folgewirkungen einer Dispositionsentscheidung auf weitere Bereiche des Schienennetzes. Aufgrund von Gleisbelegungen beispielsweise, durch die sich die Einfahrt und somit auch die Ankunft eines verspäteten Zubringers weiter verzögern kann, können im Fall einer relativ langen möglichen Wartedauer eines Zugs etliche zusätzliche Dispositionsentscheidungen für diese Abfahrt hinzukommen. So lässt sich z. B. der auffallend hohe Wert der Strategie #6 mit durchschnittlich 122.255 (26.085) Abfahrtskonflikten dadurch erklären, dass der weitere Fahrplan des wartenden Zugs u. U. vergleichsweise hohe Pufferzeiten beinhaltet und ansonsten nichts gegen eine Abfahrtsverzögerung spricht. So kann es vorkommen, dass eine sich immer wieder hinauszögernde Ankunft eines Zubringers gleich mehrere Abfahrtskonflikte verursacht.

Tabelle 8: Simulationsdauer in Minuten und Anzahl der Abfahrtskonflikte

Laufzeitverhalten				
Strategie	Laufzeit (min)		Abfahrtskonflikte	
	Ohne Dispositionsstrategie	Mit Dispositionsstrategie	Ohne Dispositionsstrategie	Mit Dispositionsstrategie
<b>RWZ</b>	95	133	9.308	8.593
<b>01</b>	89	140	5.763	5.122
<b>02</b>	111	-	76.900	-
<b>03</b>	125	280	23.501	18.635
<b>06</b>	204	-	122.255	-
<b>12</b>	93	128	10.527	8.239
<b>13</b>	88	113	5.834	5.321
<b>14</b>	99	-	44.163	-
<b>15</b>	83	-	19.967	-
<b>16</b>	89	119	4.937	5.374
<b>17</b>	82	-	5.141	-
<b>18</b>	84	-	6.425	-
<b>19</b>	78	-	5.402	-
<b>20</b>	-	473	-	11.946
<b>22</b>	-	461	-	6.720

*Ankunftspünktlichkeit.* Pünktlich erreichen – wie zu vermuten ist – die meisten Reisenden ihren Zielort dann, wenn bei Dispositionsentscheidungen die Umsteigerzahlen in den verspäteten Zubringern mit den Passagierzahlen des wartenden Zugs verglichen werden bzw. zumindest die Passagiersituation an den Folgebahnhöfen mit einbezogen wird (Strategien 12, 13, 16-19). Nicht weniger erfolgreich ist die Dispositionsstrategie #22, die noch weitergehen-

de Betrachtungen vornimmt, indem die Auswirkungen möglicher Entscheidungen miteinander verglichen werden. In all diesen Fällen kommen durchschnittlich über 90 % – mit Standardabweichungen zwischen 0,9 % und 3,2 % – der Reisenden planmäßig an ihrem Zielbahnhof an (vgl. Tabelle 9). Auf den Erfolg bzgl. pünktlicher Ankunft hat der Einsatz des Passagierrouters erwartungsgemäß keinen merklichen Einfluss. Dagegen wirkt er sich erwartungsgemäß positiv auf die Werte bzgl. grundsätzlicher Zielerreichung aus – in allen vergleichbaren Fällen erreichen bei Ermittlung neuer Routen deutlich mehr Passagiere ihren Zielbahnhof. Die wenigsten Verspätungsfälle treten bei Anwendung der Strategien 12, 13 und 17 auf. Diese erreichen außerdem, zusammen mit den Strategien 20 und 22 bei Einsatz des Passagierrouters, die höchsten generellen Zielankunftsquoten.

Tabelle 9: Erfolg und Pünktlichkeit der Zielankünfte

Ankunftspünktlichkeit in %						
Strategie	Pünktliche Ankünfte		Verspätete Ankünfte		Keine Ankünfte	
	Ohne Dispositionsstrategie	Mit Dispositionsstrategie	Ohne Dispositionsstrategie	Mit Dispositionsstrategie	Ohne Dispositionsstrategie	Mit Dispositionsstrategie
<b>RWZ</b>	71,448	71,324	27,967	28,658	0,585	0,018
<b>01</b>	86,994	89,553	12,217	10,417	0,788	0,031
<b>02</b>	48,452	-	45,449	-	6,100	-
<b>03</b>	83,811	83,742	14,608	16,202	1,581	0,056
<b>06</b>	67,163	-	29,411	-	3,426	-
<b>12</b>	92,968	92,957	6,659	7,029	0,373	0,014
<b>13</b>	92,736	93,553	6,887	6,431	0,377	0,016
<b>14</b>	84,910	-	13,738	-	1,353	-
<b>15</b>	89,815	-	9,281	-	0,904	-
<b>16</b>	92,772	92,092	6,870	7,891	0,358	0,018
<b>17</b>	90,099	-	9,330	-	0,571	-
<b>18</b>	91,771	-	7,651	-	0,578	-
<b>19</b>	90,139	-	9,161	-	0,700	-
<b>20</b>	-	83,451	-	16,548	-	0,001
<b>22</b>	-	93,010	-	6,989	-	0,001

Relativ schlechte Ergebnisse in Bezug auf pünktliche Ankünfte der Reisenden an ihrem Zielort weist dagegen die Anwendung globaler Regelwartezeiten auf. Demnach erreichen in der Simulation im Durchschnitt nur rund 71 % – mit einer Standardabweichung in Höhe von 1,7 % bei Nutzung des Passagierrouters und 4,7 % ohne die Ermittlung alternativer Routen –

der Fahrgäste pünktlich ihr Reiseziel. Dahinter liegen nur noch die Strategien 2 und 6 mit jeweils sowohl einer niedrigen Pünktlichkeitsquote von 67,163 (4,589) % bzw. 48,452 (5,733) % als auch einem mit 3,426 (1,073) % bzw. 6,1 (1,364) % vergleichsweise hohen Anteil an Passagieren, die als Folge einer aufgetretenen Störung mit dem Zug überhaupt nicht an ihrem Ziel ankommen. Die relativ langen möglichen Wartezeiten an einem Bahnhof wirken sich auf die Resultate dieser Strategien sehr negativ aus.

In Abbildung 36 sind die Ergebnisse zur Pünktlichkeit bei Anwendung der einzelnen Strategien noch einmal in Diagrammen einander gegenübergestellt. Dabei wird noch einmal deutlich, dass bei Berücksichtigung von Passagierinformationen (Strategien 12 bis 20 sowie 22) die Pünktlichkeitsquoten am Höchsten sind, wobei die Strategien 14 und 20 im Verhältnis schlechtere Resultate liefern. Hier könnte eine Änderung der Parameter positive Wirkung zeigen.

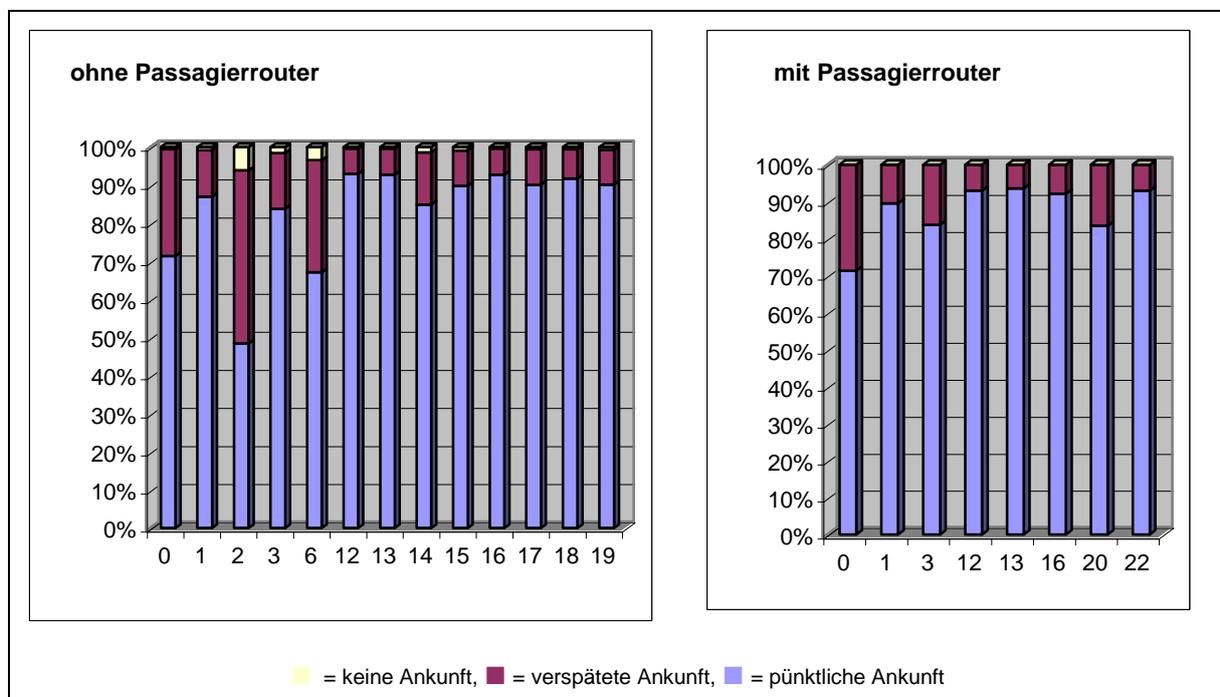


Abbildung 36: Übersicht Ankunftspünktlichkeit

*Gesamtverspätungen der Passagiere.* Betrachtet man nur die Passagiere, die verspätet ihren Zielbahnhof erreichen, werden bei Anwendung der globalen Regelwartezeiten oder generellem Ignorieren verspäteter Zubringer die niedrigsten durchschnittlichen Verspätungen erzielt. Hier wirken sich die gegenüber anderen Strategien stark eingegrenzten maximalen Wartezeiten für Züge positiv aus. Die Werte relativieren sich ein wenig, wenn man die Passagiere, die ihren Zielort nicht erreichen, mit einbezieht, oder gar die Verspätungen auf alle Reisenden umrechnet. Dabei wird für Fahrgäste, für die nach Verpassen eines Anschlusses keine Alternativverbindung ermittelt wird, eine Gesamtwartezeit in Höhe von 720 Minuten berechnet. Hier profitieren insbesondere die Strategien 12, 13, 16, 20 und 22 von ihren höheren Pünktlichkeits- oder Zielankunftsquoten. Relativ schlechte Ergebnisse erzielen dagegen besonders

die Strategien 2, 3 und 6, die höchstens die beteiligten Zuggattungen oder den weiteren Fahrplan betrachten. Gerade in Bezug auf möglichst niedrige Passagierverspätungen wirken sich also umfassendere Betrachtungen der beteiligten Fahrgäste positiv aus. In Tabelle 10 sind die einzelnen Ergebnisse noch einmal gegenübergestellt.

Tabelle 10: Passagierwarteminuten je verspäteten Passagier mit erfolgreicher Zielankunft, je verspätetem Passagier insgesamt und je Passagier insgesamt

Gesamtverspätungen der Passagiere in Minuten						
Strategie	Je versp. Pass. m. A.		Je versp. Pass.		Je Passagier	
	Ohne PR	Mit PR	Ohne PR	Mit PR	Ohne PR	mit Dispositionsstrategie
<b>RWZ</b>	4,905	5,291	19,029	5,734	5,597	1,645
<b>01</b>	5,864	8,419	49,175	10,492	6,395	1,103
<b>02</b>	73,397	-	148,974	-	77,416	-
<b>03</b>	34,753	37,006	101,631	39,355	16,465	6,436
<b>06</b>	62,835	-	130,339	-	43,219	-
<b>12</b>	15,419	15,662	52,480	17,003	3,710	1,216
<b>13</b>	8,101	10,878	45,487	12,544	3,283	0,804
<b>14</b>	38,060	-	99,392	-	14,980	-
<b>15</b>	28,776	-	89,930	-	9,205	-
<b>16</b>	7,094	10,644	41,714	12,199	3,062	0,932
<b>17</b>	6,332	-	47,167	-	4,700	-
<b>18</b>	7,377	-	57,732	-	4,730	-
<b>19</b>	6,364	-	31,590	-	3,105	-
<b>20</b>	-	14,001	-	14,050	-	2,279
<b>22</b>	-	10,779	-	10,877	-	0,726

Die Ausprägungen der Passagierverspätungen je Strategie werden in Abbildung 37 graphisch veranschaulicht. Hier wird noch einmal besonders deutlich, welchen Nutzen die Suche nach alternativen Routen für die Passagiere bringt.

Weist man Reisenden, die einen Anschluss verpassen, keine neue Route zu – d. h. sie erreichen ihr Ziel nicht –, wird mit durchschnittlich 38 Minuten die niedrigste maximale Verspätungsdauer eines Passagiers bei Anwendung der globalen Regelwartezeiten (Standardabweichung: 9,4 Minuten) bzw. bei grundsätzlichem Ignorieren verspäteter Zubringer (Standardabweichung: 3,6 Minuten) erreicht (vgl. Tabelle 11). Hier wirkt sich wiederum die Festlegung stark begrenzter Wartezeiten – eine Abfahrt kann sich maximal um 10 bzw. 0 Minuten

verzögern – positiv aus. Bei den anderen Dispositionsstrategien ist jeweils eine Wartezeit von theoretisch bis zu 60 Minuten möglich.

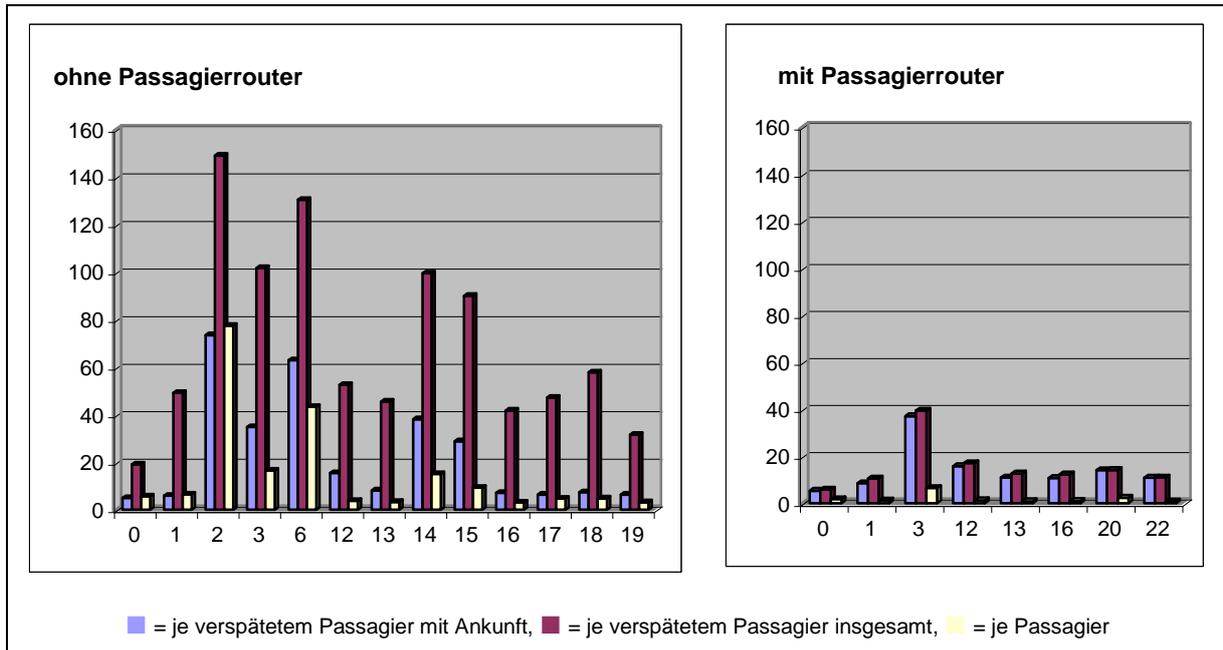


Abbildung 37: Übersicht Passagierverspätungen

Tabelle 11: Durchschnittliche maximale Gesamtverspätung der Passagiere

Maximale Passagierverspätung					
Strategie	Max. PWM		Strategie	Max. PWM	
	Ohne Dispositionsstrategie	Mit Dispositionsstrategie		Ohne Dispositionsstrategie	Mit Dispositionsstrategie
<b>RWZ</b>	38	631	<b>15</b>	193	-
<b>01</b>	38	528	<b>16</b>	104	635
<b>02</b>	243	-	<b>17</b>	89	-
<b>03</b>	188	999	<b>18</b>	106	-
<b>06</b>	256	-	<b>19</b>	69	-
<b>12</b>	141	717	<b>20</b>	-	737
<b>13</b>	106	467	<b>22</b>	-	377
<b>14</b>	219	-			

Bei Einsatz des Passagierrouters ist aus nachvollziehbaren Gründen die durchschnittliche maximale Verspätungsdauer in allen vergleichbaren Fällen deutlich höher. Hier wird das beste Ergebnis mit einem Wert von 377 (83) Minuten bei Ermittlung der Wartedauer mit dem voraussichtlichen Minimum an Passagierverspätungen (Strategie #22) erreicht.

*Gewichtete Passagierwartezeiten.* Es ist anzunehmen, dass ein Aufenthalt im Zug generell als angenehmer empfunden wird als das Warten am Bahnhof, ebenso dürfte die Unzufriedenheit eines Fahrgastes mit zunehmender Reiseverzögerung stärker steigen. Berücksichtigt man bei der Beurteilung von Wartezeiten Dauer und Ort ihres Auftretens durch eine entsprechende Gewichtung der Passagierwarteminuten, lassen sich die Auswirkungen von Verspätungen auf die Kundenzufriedenheit möglicherweise besser einschätzen. Bei den in Tabelle 12 angegebenen Ergebnissen erfolgte eine Gewichtung der Wartezeiten von Reisenden gemäß der in Abbildung 38 dargestellten Funktion. Dabei wurde Fahrgästen, die nicht an ihrem Zielort angekommen sind, eine Gesamtverspätung in Höhe von 720 Minuten am Bahnhof unterstellt. Dieser relativ hohe Wert dient dabei der Verdeutlichung der Konsequenzen eines extremen Negativnutzens eines verpassten Anschlusses für einzelne Passagiere; es könnte ebenfalls mit einem besonders hohen Imageschaden bei einem verpassten Anschluss begründet werden. In Abbildung 39 werden die gewichteten Wartezeiten je Passagier graphisch veranschaulicht.

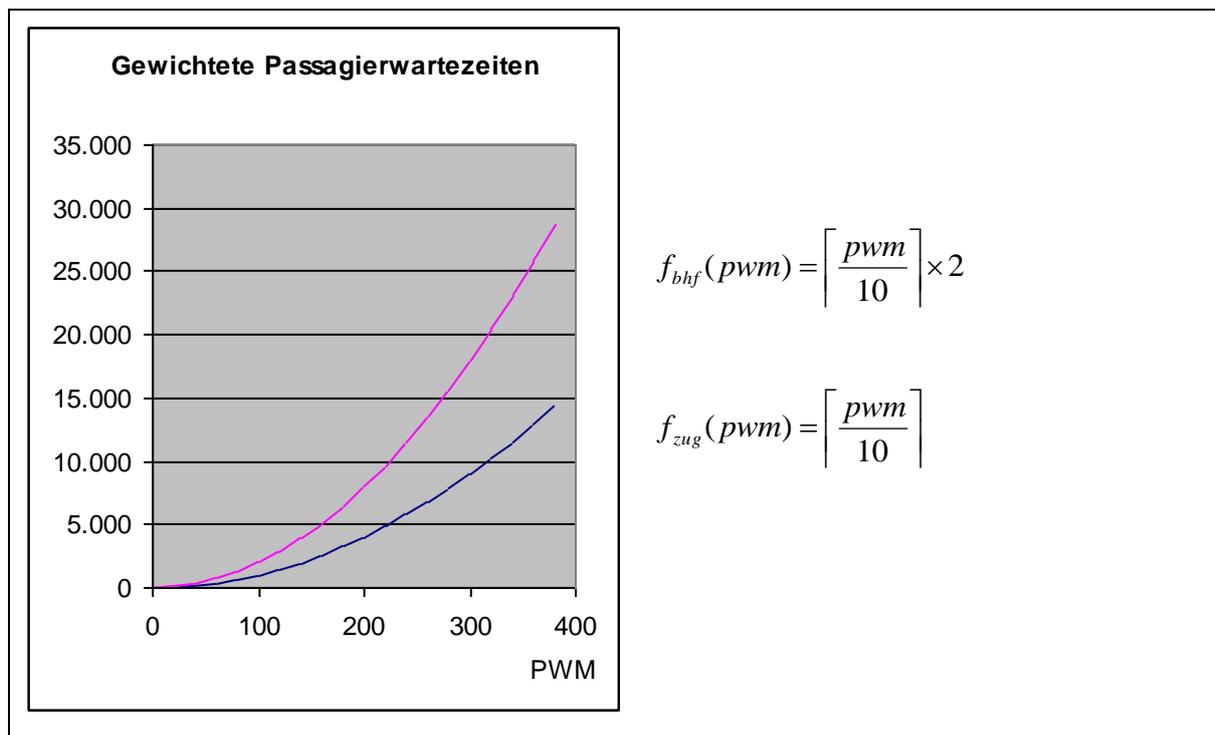


Abbildung 38: Gewichtungsfunktion für Passagierwartezeiten

Betrachtet man lediglich die Passagiere, die überhaupt nicht oder nur mit Verspätung ihren Zielbahnhof erreichen, führt die Anwendung globaler Regelwartezeiten zu den besten Resultaten. Auch hier wirkt sich vermutlich wieder die Begrenzung einer Abfahrtsverzögerung auf maximal 10 Minuten positiv aus.

Dagegen führt die Verhinderung längerer Wartezeiten auf verspätete Zubringer bei Strategie #1 diesmal jedoch zu keinem Erfolg. In diesem Fall verteilen sich die entstehenden Passagierwarteminuten möglicherweise nicht besonders günstig. Vor allem aber wirkt sich hier eine

geringere Zielankunftsquote durch die polynomielle Steigung der Gewichtungsfunktion sehr negativ auf das Ergebnis aus. Davon profitieren wiederum die Strategien 12, 13, 16 und 22, die neben einer hohen Pünktlichkeit auch vergleichsweise wenige Fälle von Nichterreichung des Zielortes aufweisen. Letzteres gilt auch insbesondere für die Strategie #20, welche neben Strategie #22 die höchste Zielankunftsquote verzeichnen konnte und nach der vorgenommenen Gewichtung das zweitbeste Resultat bzgl. der Passagierwartezeiten erzielt. Übertroffen wird sie hier nur noch von Strategie #22, die allerdings sogar mit einigem Abstand das beste Ergebnis liefert. Darüber hinaus werden gute Ergebnisse bei Anwendung der Strategie #19, welche die Passagiere in den betroffenen Zügen sowie an den Folgebahnhöfen des abfahrereiten Zugs betrachtet, erreicht. In diesem Fall ist bereits die gewichtete Wartezeit je verspätetem Passagier sehr gering. Hier scheinen sich u. a. relativ kurze Verspätungszeiten – die maximale Verspätung betrug 69 (21) Minuten (vgl. Tabelle 11) – bei gleichzeitig hoher genereller Zielankunftsquote positiv auf das Ergebnis auszuwirken.

Tabelle 12: Gewichtete Passagierwartezeit je verspätetem Passagier (inkl. Passagiere ohne Zielankunft) und je Passagier insgesamt

<b>Gewichtete Passagierwartezeiten</b>				
<b>Strategie</b>	<b>Je verspätetem Passagier</b>		<b>Je Passagier</b>	
	<b>Ohne Dispositionsstrategie</b>	<b>Mit Dispositionsstrategie</b>	<b>Ohne Dispositionsstrategie</b>	<b>Mit Dispositionsstrategie</b>
<b>RWZ</b>	2.059,167	86,679	609,554	24,974
<b>01</b>	6.304,464	369,318	819,641	38,842
<b>02</b>	13.075,172	-	6.815,037	-
<b>03</b>	10.491,282	900,289	1.699,156	147,285
<b>06</b>	11.535,939	-	3.841,902	-
<b>12</b>	5.597,725	369,562	396,732	26,377
<b>13</b>	5.488,840	342,741	394,288	22,532
<b>14</b>	9.795,428	-	1.473,234	-
<b>15</b>	9.533,123	-	973,776	-
<b>16</b>	5.069,104	328,577	373,272	25,536
<b>17</b>	5.954,445	-	594,383	-
<b>18</b>	7.361,011	-	602,306	-
<b>19</b>	3.717,775	-	364,767	-
<b>20</b>	-	116,887	-	19,348
<b>22</b>	-	137,130	-	8,391

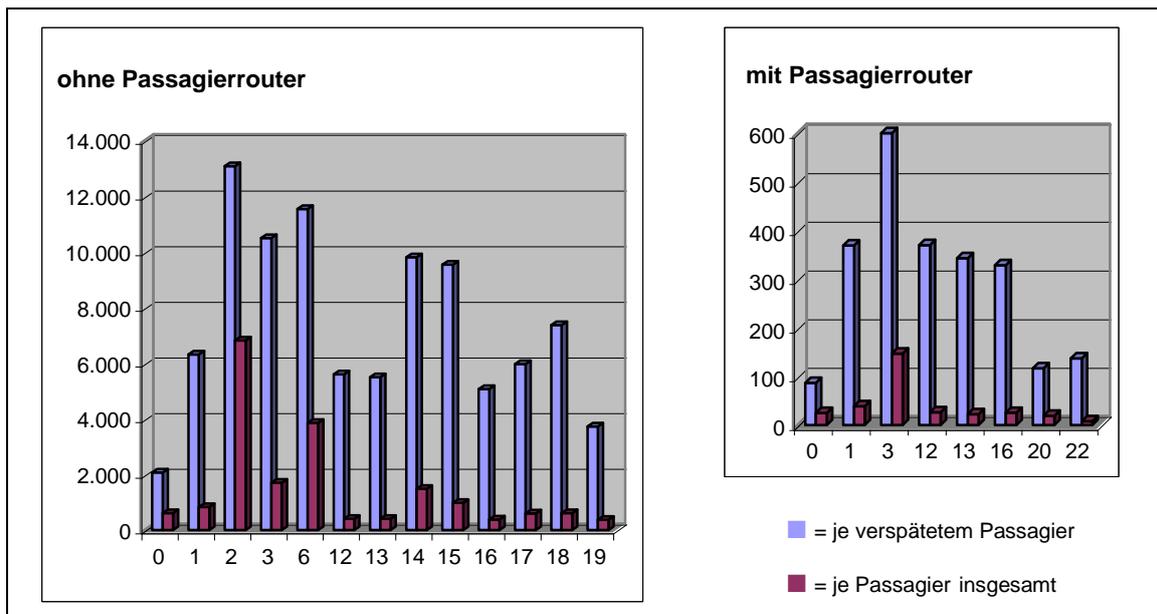


Abbildung 39: Übersicht gewichtete Passagierwartezeiten

Die verschiedenen, in diesem Kapitel vorgestellten, Ergebnisse bestätigen insgesamt die Annahme, dass eine Einbeziehung von Fahrgastinformationen bei Dispositionsentscheidungen eine erkennbare positive Wirkung im Hinblick auf Passagierverspätungen zeigt. Insbesondere scheint die Anwendung passagierorientierter Strategien die Quote der pünktlichen Zielankünfte von Reisenden zu steigern – keine der anderen Vorgehensweisen führt hier zu einem ebenso guten Ergebnis. Auch der Anteil der Reisenden, die ihre Ziele als Folge von Verspätungen nicht erreichen, kann durch Berücksichtigung von Passagierdaten gesenkt werden, wie die Resultate der Dispositionsstrategien 12, 13 und 16 zeigen. Sehr gute Ergebnisse werden bei der Anwendung von Strategie #22 erzielt, die durch eine Minimierung der voraussichtlichen Passagierverspätungen die umfassendsten Untersuchungen vornimmt.

Die jeweils durch den Einsatz des Passagierrouters wesentlich verbesserten Ergebnisse verdeutlichen noch einmal, wie wichtig es ist, die Reisenden frühzeitig mit Informationen über möglichst gute Alternativrouten zu versorgen, falls die Gefahr besteht, dass sie ihre Anschlusszüge verpassen. Dies stützt die Annahme, dass es lohnenswert ist, in den weiteren Ausbau eines Reisendeninformationssystems zu investieren.

## IV.5 Simulation ‚im Kleinen‘ zur What-If-Analyse

Ist genügend Zeit vorhanden, können die Konsequenzen der Verwendung bestimmter einfacher Dispositionsheuristiken aus dem vorigen Abschnitt per Simulation vor Treffen der eigentlichen Entscheidung simuliert werden. Auf diese Weise kann überprüft werden, welche Strategie – unabhängig von ihrer sonstigen Zuverlässigkeit – im Augenblick die besten Ergebnisse bringt.

## IV.5.1 Modellierung

Dies geschieht mittels eines vereinfachten Simulationsmodells, welches den aktuellen Zustand im Netz nach einfachen Strategien fortschreibt und protokolliert, ohne dabei auf Details – bspw. die Prüfung, ob eine zulässige Strecke für einen Zug existiert – zu achten.

Das verwendete Simulationsmodell kommt mit lediglich vier Ereignissen aus, die allerdings in sehr hoher Frequenz auftreten und die, genau wie im TrainSim-Modell, den Weg eines Zugs während der Simulation beschreiben. Das erstmalige Auftreten eines Zugs wird durch das Ereignis „Zug startet“ abgebildet, entsprechend wird seine Ankunft am Endbahnhof durch das Ereignis „Zug endet“ repräsentiert. Zwischen diesen beiden Zeitpunkten wird der Verlauf durch die Ereignisse „Zug erreicht Bahnhof“ und „Zug verlässt Bahnhof“ gemäß des ugrunde liegenden Fahrplans beschrieben.

Ein Aufholen von Verspätungen ist in diesem Modell nicht explizit vorgesehen.

### IV.5.1.1 Ereignis „Zug startet“

Dieses Ereignis dient dazu, einen Zug im System zu initiieren und anschließend zu propagieren. Im Gegensatz zu den im Folgenden vorgestellten Ereignissen ist dieses Ereignis nicht die direkte Entsprechung eines Eintrages aus dem Fahrplan. Vielmehr werden einmalig alle Bewegungsdaten erzeugt und vorinitialisiert. Außerdem wird der Status des Zugs dem Simulationssystem bekannt gegeben, dabei insbesondere sein derzeitiger Verspätungszustand. Startet der Zug erst während der Simulation, so ist seine Verspätung zunächst Null.

Dieses Ereignis terminiert eines der folgenden Ereignisse für den Zeitpunkt des ersten Auftretens während der Simulation.

### IV.5.1.2 Ereignis „Zug endet“

Der letzte Eintrag im Fahrplan jedes Zugs ist die Ankunft in seinem Zielbahnhof. Erreicht der Zug während der Simulation diesen Bahnhof, wird dieses Ereignis ausgelöst. Da die Simulation einen begrenzten Zeithorizont besitzt, bedeutet dies im Umkehrschluss, dass nicht für jeden während der Simulation betrachteten Zug dieses Ereignis terminiert wird.

Die Hauptaufgabe dieses Ereignisses ist es, den entsprechenden Zug aus dem System zu entfernen. Das Simulationsmodul kann dadurch seine internen Statistiken aktualisieren, die als Grundlage zur Berechnung einiger Kennzahlen dienen.

Zudem wird der Bahnhof über das Eintreffen des Zugs informiert, sodass entsprechende Schritte eingeleitet werden können. Diese sind mit denen einer Ankunft während der Fahrt des Zugs identisch. Da dieses Ereignis der letzte Eintrag im Fahrplan des Zugs darstellt, terminiert es auch keine weiteren Ereignisse.

### IV.5.1.3 Ereignis „Zug erreicht Bahnhof“

Dieses Ereignis wird ausgelöst, wenn ein Zug einen Bahnhof, welcher nicht sein Zielbahnhof ist, erreicht. Der aktuelle Bahnhof wird über das Eintreffen des Zugs informiert. Nun werden verschiedene Aktionen ausgeführt: Zunächst wird die Zahl der Passagiere ermittelt,

die den Zug an diesem Bahnhof verlassen. Aus dieser Menge werden diejenigen herausgenommen, die ihren Zielbahnhof erreicht haben und das System komplett verlassen. Für die restlichen Passagiere wird der Anschlusszug ermittelt und festgestellt, ob dieser schon abgefahren ist. Entsprechend werden die Passagierstatistiken aktualisiert. Als letztes werden die Wartelisten des Bahnhofes überprüft, um eventuell wartende Abbringer für diesen Zug über die Ankunft zu informieren und gegebenenfalls deren Weiterfahrt zu veranlassen.

Schließlich terminiert dieses Ereignis die Weiterfahrt des Zugs mit dem Ereignis „Zug verlässt Bahnhof“ nach der vorgeschriebenen Standzeit des Zugs.

#### IV.5.1.4 Ereignis „Zug verlässt Bahnhof“

Dieses Ereignis wird ausgeführt, wenn ein Zug seinen aktuellen Bahnhof verlassen soll. Bevor dies geschieht, wird zunächst mittels des Bahnhofsfahrplans überprüft, welche Zubringer dieser Zug besitzt und ob diese den Bahnhof bereits erreicht haben. Ist die Liste der noch ausstehenden Zubringer nicht leer, so muss, wie in der Realität, eine Entscheidung über das weitere Vorgehen getroffen werden. Dies geschieht bspw. nach einer der oben genannten einfachen Strategien, um die Rechenzeit zu begrenzen. Wurde innerhalb des Entscheidungsprozesses ein Warten des Zugs beschlossen, endet die Verarbeitung des Ereignisses an dieser Stelle, und der Zug wird in die Warteschlange des Bahnhofes gestellt. Wenn alle Zubringer, auf die gewartet werden soll, den Bahnhof erreicht haben, wird dieses Ereignis mit dem Eintreffen des letzten Zubringers sofort erneut terminiert. Es wird vereinfachend angenommen, dass das Umsteigen eine konstante Zeit benötigt. Somit ist „Zug verlässt Bahnhof“ das einzige Ereignis, welches häufiger auftreten kann, als der Fahrplan es vorgibt.

Wurden keine verspäteten Zubringer gefunden oder trotzdem das Verlassen des Bahnhofes beschlossen, so wird im nächsten Schritt das Einsteigen der Passagiere veranlasst. Hat der Zug eine Verspätung, so werden die entsprechenden Statistiken über Warteminuten und Verspätungen aktualisiert. Schließlich wird die neue Verspätung aus geplanter Abfahrtszeit und aktueller Simulationszeit bestimmt und an die nachfolgenden Bahnhöfe gemeldet. Das Ereignis „Zug erreicht Bahnhof“ oder „Zug endet“ wird entsprechend der Fahrdauer zum nächsten Bahnhof terminiert.

Parallel werden nun mehrere Strategien in verschiedenen Läufen dieser Simulation getestet. Die im Rahmen dieser Simulationsläufe ermittelte beste Strategie wird bestimmt und dem Disponenten geliefert, wobei allerdings nur linear propagierte Verspätungen und keine weiteren exogen induzierten Störungen Berücksichtigung finden.

### IV.5.2 Ergebnisse der Experimentation

Um in Echtzeit zu verwertbaren Aussagen über die „aktuelle“ Qualität einzelner Dispositionsstrategien zu gelangen, muss die Simulationskomponente vor allem in ausreichend kurzer Zeit Ergebnisse liefern. Daher wurden einige Geschwindigkeitstests für die Simulation einfacher Dispositionsstrategien durchgeführt. Der Graph in Abbildung 40 zeigt, dass die Simulationsdauer im Wesentlichen konstant bleibt. Der Kurvenverlauf wird lediglich dadurch verzerrt, dass beim Start des ersten Simulationslaufs der Fahrplan aus der Datenbank eingelesen

wird, was jedoch beim zweiten Lauf bereits entfallen kann. In der Praxis sollte der Fahrplan mit allen Solldaten bereits im Voraus und komplett eingelesen werden. Auf diese Weise müssen zum Start des Simulators lediglich die aktuellen Verspätungen und Passagierzahlen initiiert werden. Eine weitere Möglichkeit zur Geschwindigkeitssteigerung wäre wiederum die Verteilung der Simulation; in diesem Fall kann eine zu simulierende Strategie als logischer Prozess aufgefasst werden. Auch ein Verzicht auf niederrangige Zugtypen kann bei Anwendung mit Echtzeitanforderung erwogen werden: Der zweite Graph in Abbildung 40 belegt, dass sich beim Verzicht auf S-Bahnen die Geschwindigkeit signifikant erhöhen lässt. Da diese i. Allg. ohnehin eine hohe Taktung aufweisen, ist eine Berücksichtigung nicht zwingend erforderlich.

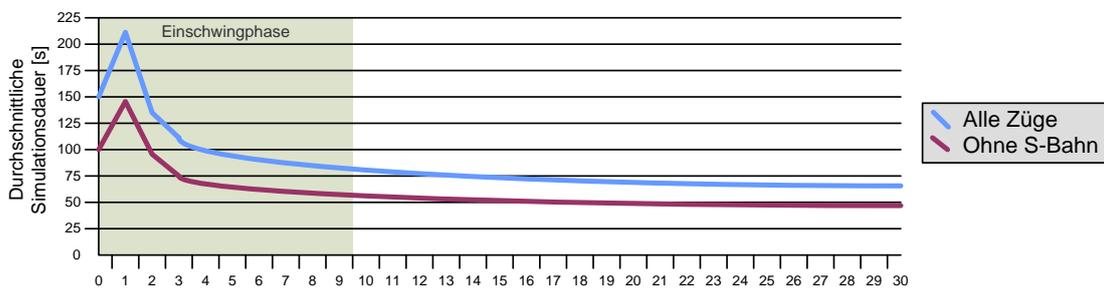


Abbildung 40: Durchschnittliche Simulationsdauern für einfache Dispositionsstrategien

Eine weitere wesentliche Fragestellung dieses Ansatzes ist der zu wählende zeitliche Horizont eines Simulationslaufs. Einerseits sollte er nicht zu lang gewählt werden, weil die Prognoseunsicherheit sich mit zunehmendem zeitlichen Abstand des prognostizierten Ereignisses erhöht, andererseits können bei einem zu kurzen Horizont verspätete Züge nicht lange genug beobachtet werden, um sinnvolle Schlüsse auf die Auswirkungen einer Verspätung zu ziehen. Im schlimmsten Fall stoppt dann ein Zug nur einmal während der Simulation. In der Experimentation stellte sich in Abhängigkeit von der Fahrplanzeit ein Zeithorizont von einer bis drei Stunden als sinnvoll heraus.

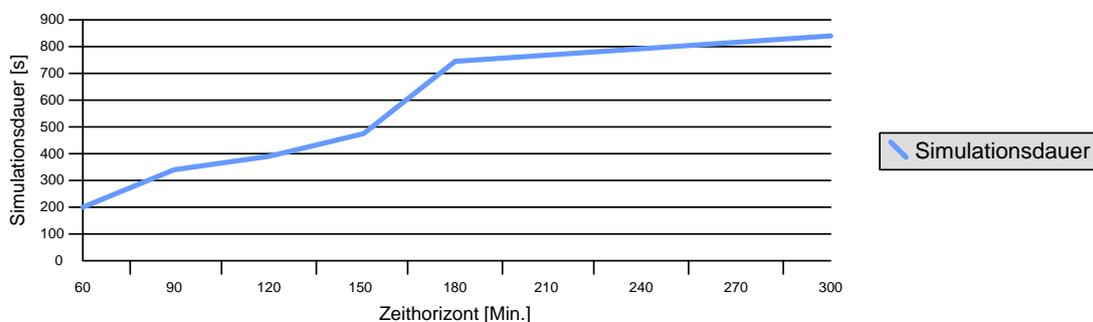


Abbildung 41: Auswirkung eines veränderten Zeithorizontes des Simulationsmodells

Abbildung 41 zeigt die Auswirkung eines veränderten Zeithorizonts auf die Simulationsdauer. Es wird deutlich, dass die Zunahme der Dauer ab einem gewissen Zeithorizont moderat ausfällt. Dies liegt in dieser Konfiguration darin begründet, dass ab diesem Zeitpunkt die Menge zu verarbeitender Züge konstant bleibt, sodass nur noch die zusätzliche Simulationszeit ins Gewicht fällt.

## IV.6 Entscheidungsunterstützung durch mathematische Optimierung

Eine interessante Alternative zu heuristischen Dispositionsstrategien liefert wie gesagt die Verwendung exakter Verfahren. Nachfolgend wird anhand der mathematischen Programmierung aufgezeigt, wie eine exakt optimierende Lösungsstrategie in die Dispositionslogik einfließen kann. Dabei sind, wie oben erwähnt, prinzipiell zwei Verwendungsarten denkbar:

- 1) Als Entscheidungsunterstützung für die Online-Disposition im Sinne einer Online-Dispositionsstrategie. Dabei ist zu beachten, dass in das Optimierungsmodell Prognosewerte eingehen, sodass die Optimierung aufgrund der Prognoseunsicherheit nicht automatisch bessere Entscheidungen liefert, als es einfache Heuristiken tun. Diese Einsatzform wird innerhalb dieses Abschnitts ausführlich behandelt.
- 2) Als Offline-Algorithmus zur ständigen Überprüfung und Weiterentwicklung von Dispositionsheuristiken mit deterministischer Laufzeit: Primärstörungen werden in das System eingegeben, und es wird a posteriori entschieden, welche Warteentscheidungen unter Berücksichtigung von Passagierströmen optimal gewesen wären. Diese Betrachtungsweise wird in Abschnitt IV.7 besprochen.

Während es für den Online-Ansatz nur zu zeigen gilt, *dass überhaupt* auch exakt optimierende Verfahren je nach Detaillierungsgrad des Modells durchaus in der Lage sind, in Echtzeit Verwendung zu finden, soll mit der Experimentation in Abschnitt IV.7 demonstriert werden, wie gut die vorgestellten einfachen Strategien im Vergleich zu einem Offline-Optimalen Verfahren tatsächlich sind. Dazu mussten zum einen Anpassungen des Offline-Modells gegenüber dem Online-Modell vorgenommen werden. Zum anderen wurde aus Gründen der Vergleichbarkeit die Kostenfunktion der einfachen Strategien leicht abgeändert.

### IV.6.1 Das Bahnsystem als mathematisches Programm

In diesem Abschnitt wird, basierend auf der in Abschnitt beschriebenen Modellierung, nachfolgend ein gemischt-ganzzahliges Optimierungsmodell des Bahnsystems hergeleitet, welches durchaus zur Online-Disposition verwendet werden kann, vor allem aber zur Offline-Analyse der in IV.4 beschriebenen Dispositionsheuristiken gedacht ist.

#### IV.6.1.1 Annahmen und Vereinbarungen bei der Bildung des Modells

Für die Mathematische Programmierung gilt in vielleicht noch stärkerem Maße als für die Simulation: Es ist weder möglich noch sinnvoll, *alle* Aspekte eines Systems zu modellieren; es ist vielmehr nach einem geeigneten Abstraktions- bzw. Detaillierungsgrad zu suchen, da

kleinere Modelle zwar nicht immer, aber sehr oft auch kleinere Probleme bei der Lösung verursachen. Demnach sollte auf die Beschreibung bestimmter Systemeigenschaften, die nicht zur Problemlösung beitragen, verzichtet werden. Im Folgenden werden die im Prozess der Bildung des mathematischen Modells getroffenen Annahmen über Struktur und Verhalten des Systems Bahn beschrieben.

- *Abschätzung stochastischer Parameter durch ihre Erwartungswerte:* Bei bestimmten Modellparametern, insbesondere bei den zukunftsbezogenen Daten, wie zum Beispiel Fahrzeiten zwischen zwei Stationen oder Faktoren zum Aufholen von Verspätungen handelt es sich um stochastische Daten, für die bestenfalls Wahrscheinlichverteilungen bestimmt werden können. Im Modell werden alle Parameter, die stochastischen Einflüssen unterliegen, durch ihre Erwartungswerte (punkt-) geschätzt. Auf diese Weise wird ein stochastisches Modell durch ein (pseudo-) deterministisches approximiert.
- *Aggregation von Passagierrouen:* Im mathematischen Modell wird unterstellt, dass ein Passagier im Falle eines verpassten Anschluss keine neue Route bekommt, sondern vielmehr auf den nächsten Takt der gleichen Linie warten muss<sup>163</sup>. Dies ist eine notwendige Vereinfachung, da durch die getroffenen zeitlichen und räumlichen Beschränkungen des Modellierungsgebiets sehr oft ohnehin keine neue Route berechnet werden kann. Zudem würden Modelle prohibitiv groß werden, wenn modellendogen für einige tausend Passagiere neue Routen berechnet werden müssten<sup>164</sup>. In der Realität wird ein Passagier mit hoher Wahrscheinlichkeit im Falle eines verpassten Anschluss aktiv eine neue Verbindung suchen, wenn er seinen Anschluss verpasst hat. Da dies Zeit in Anspruch nimmt und er die aktuellen Zuglagen im Netz nicht kennt, wird er nicht immer die bestmögliche Alternativroute finden, erfahrungsgemäß jedoch kaum auf den nächsten Takt warten müssen. Deswegen wird im Modell unterstellt, dass er nur einen bestimmten Anteil der Zeit bis zum nächsten Takt, bspw. nur 35 Minuten statt einer Stunde Taktzeit, warten muss.
- *Modellierungstiefe:* Bei der Modellierung wird zeitlich und räumlich nur ein Ausschnitt des gesamten Netzes betrachtet. *Räumliche Abschnitte* sind definiert durch eine Untermenge der Bahnhöfe, bspw. alle einem Zuständigkeitsbereich einer Transportleitung zugehörigen Stationen. Dies beschränkt nicht nur die Zahl notwendiger Entscheidungsvariablen, sondern gibt i. Allg. auch die Realität korrekt wieder, selbst wenn dadurch (gesamt-) suboptimale Lösungen impliziert werden. Der *Modellierungszeitraum* sollte nicht zu groß gewählt werden und nicht mehr als 0,5 bis 1,5 Stunden betragen. Ein erheblich größerer Modellierungszeitraum liefert aufgrund der prinzipiellen Un-

---

<sup>163</sup> Vgl. auch [Suhl et al. 2001a] zu dieser Modellierung.

<sup>164</sup> Wollte man das mathematische Modell um solche Aspekte erweitern, würden bei Wahl bspw. eines Set-Covering-Ansatzes zur Ressourcenplanung pro Passagier mindestens eine mögliche Alternativroute, falls er seinen Anschluss verpasst, und damit mindestens eine Binärvariable zusätzlich im Modell integriert werden. Diese Routen wären mittels des Passagierrouers (vgl. Abschnitt III.1.7) für jede aktuelle Netzlage neu zu bestimmen. Allein das schließt eine Verwendung solcher Modelle in Echtzeit a priori aus.

vorhersagbarkeit von Primärstörungen und sonstiger starker stochastischer Einflüsse nicht unbedingt bessere Ergebnisse, sodass an dieser Stelle guten Gewissens die Problemgröße reduzierbar ist. Zusätzlich zu zeitlichen und räumlichen Einschränkungen besteht je nach Optimierungsziel<sup>165</sup> die Möglichkeit, nur eine Teilmenge der Züge oder eben nur aggregierte Passagierinformationen zu betrachten. Besonders bei Echtzeitanwendungen muss, wie gesagt, die Modellierungstiefe so angepasst werden, dass optimale Lösungen *schnell* geliefert werden können.

- *Netztopologie und Züge*: Für die Berechnung des Routings von Zügen oder zur Streckenbelegungsplanung reicht die grobe, durch den Fahrplan gegebene, Netzwerkstruktur nicht aus; der Detaillierungsgrad der Beschreibung sollte höher gewählt werden. Bei der Modellbildung wird zunächst angenommen, dass eine Strecke mindestens zwei Gleise enthält, so dass die Streckenbelegungsplanung für entgegengesetzte Richtungen unabhängig erfolgen kann.
- *Passagierströme*: Im Rahmen des nachfolgend beschriebenen mathematischen Modells werden nur die folgenden Passagierinformationen berücksichtigt, die sich aus den als bekannt vorausgesetzten Routen der Passagiere extrahieren lassen:
  - Anzahl der bei der Abfahrt im Zug sitzenden Passagiere und
  - Anzahl an Übergangsreisenden für jeden Anschluss.
- *Disposition*: Im Modell werden nur Anschlusssicherung und Haltezeitverkürzungen als die Passagiere betreffenden Dispositionsmaßnahmen betrachtet. Um eine Vergleichbarkeit mit den Wartezeitregeln der Deutschen Bahn zu gewährleisten, wird diese Strategie als Standardstrategie parametrisiert vorgegeben, sodass auch ein kompletter Verzicht auf Regelwartezeiten erfolgen kann.
- *Bewertungskriterien*: Die Qualität der Dispositionsentscheidungen wird im Grundmodell aus Gründen der Einfachheit der Zielfunktion hauptsächlich durch Akkumulation der Anzahl der Passagierwarteminuten charakterisiert. Dabei werden zunächst nur die Wartezeit am Gleis und die Wartezeit im Zug unterschiedlich, aber mit linear steigenden Kosten, bewertet. In einer Erweiterung muss berücksichtigt werden, dass die Unzufriedenheit der Reisenden überproportional mit steigender Wartezeit wächst. Im Modell kann relativ einfach eine Begrenzung der Anzahl der „Warten“-Entscheidungen integriert werden. Wenn dies nicht geschieht, könnte es dazu kommen, dass kein einziger Zug mehr nach dem Fahrplan fährt.<sup>166</sup> Weitere Kriterien können alle denkbaren, im Abschnitt IV.2 definierten, Maßstäbe „guter“ Disposition sein, bspw. die Anzahl der Folgekonflikte, die Zahl der an die angrenzende Transportlei-

---

<sup>165</sup> Wird bspw. eine Streckenbelegungsplanung durchgeführt, sind zwangsweise *alle* Züge (inkl. Sonder- und Güterzüge) zu betrachten.

<sup>166</sup> Eine Begrenzung dieser Anzahl wird dann besonders wichtig, wenn das Modell zur Bewertung von Dispositionsentscheidungen realer Disponenten verwendet werden soll, da Disponenten realiter nur eine begrenzte Anzahl von Entscheidungen pro Zeiteinheit treffen können. Kann ein Disponent bspw.  $n$  Entscheidungen in einer Stunde treffen, sollten dem Optimierungssystem ebenfalls  $n$  Entscheidungen pro Stunde gestattet werden.

tung weitergegebenen Verspätungen etc. Die Gewichtung dieser Kriterien ist jedoch kein triviales Problem und soll aus Gründen der Vergleichbarkeit mit den anderen Strategien, die sich im Wesentlichen an der Passagierwartezeit orientieren, entfallen.

#### IV.6.1.2 Mathematisches Modell

In diesem Abschnitt wird zunächst ein Grundmodell vorgestellt, welches das Dispositionsproblem abbildet. Im Anschluss werden verschiedene Modellerweiterungen diskutiert.

#### IV.6.1.3 Grundmodell

##### IV.6.1.3.1 Annahmen des Grundmodells

Prinzipiell wird im Grundmodell unterstellt, dass Züge nach dem Fahrplan fahren, solange keine Störungen auftreten. Fahrtzeiten zwischen den Bahnhöfen sind konstant und vom Fahrplan vorgegeben; Aufholen von Verspätungen findet (noch) nicht statt. Die Aufenthaltszeiten in den Bahnhöfen sind ebenfalls konstant und aus dem Fahrplan entnommen. M. a. W.: Wenn ein Zug eine Verspätung bekommt, behält er diese *im gesamten Verlauf der Zugfahrt*. Handlungsspielraum besteht nur bei eigentlichen Anschlusskonflikten. Zielkriterium ist die kumulierte Wartezeit der Passagiere, die es für den Disponenten zu minimieren gilt.

Das Modell verfügt über den kompletten statischen Fahrplan sowie über alle in einem bestimmten Zeithorizont eingegangenen Zuglaufmeldungen. Zusätzlich werden die Anzahl der Übergangsreisenden in Zu-/Abbringer-Relationen sowie für jeden Zughalt die Anzahl der im Zug sitzenden Passagiere berücksichtigt.

##### IV.6.1.3.2 Grundmodell: Mathematische Formulierung

###### IV.6.1.3.2.1 Mengen

Die (bijektive) Zubringer/Abbringer-Relation sei nun wie folgt definiert:

Ein Zug  $z$  ist Zubringer eines Zugs  $z'$  (bzw.:  $z'$  ist Abbringer von  $z$ ) genau dann, wenn gilt:

$$\exists e_i \in F(z), e_j \in F(z') : b_i = b_j \wedge t_i + \text{müz}(z, z', b_i) < t_j \wedge \text{typ}_i = an \wedge \text{typ}_j = ab \}, \quad \text{wobei}$$

$\text{müz}(z_1, z_2, b)$  wiederum die Standard-Mindestübergangszeit eines Passagiers, die dieser an einem Bahnhof  $b$  zum Umstieg von Zug  $z_1$  in Zug  $z_2$  benötigt, bezeichne.

Beachte: Es wird zunächst kein Zeitintervall, nach dem ein Zug nicht mehr als Abbringer eines anderen angesehen wird, vorgegeben.

Es seien die Mengen der Abbringer bzw. Zubringer eines Zugs  $z$  an einer Station  $b$  damit wie folgt definiert:

$$\text{Abb}(z, b) = \{z' \mid \exists e_i \in F(z), e_j \in F(z') : b_i = b_j = b \wedge t_i + \text{müz}(z, z', b) < t_j \wedge \text{typ}_i = an \wedge \text{typ}_j = ab\} \quad \text{bzw.}$$

$$\text{Zub}(z', b) = \{z \mid \exists e_i \in F(z), e_j \in F(z') : b_i = b_j = b \wedge t_i + \text{müz}(z, z', b) < t_j \wedge \text{typ}_i = an \wedge \text{typ}_j = ab\}$$

Alle Abbringer von  $z$  werden auch *Anschlüsse* von  $z$  genannt.

Die Menge aller Anschlüsse sei mit  $Abb$  bezeichnet.

#### IV.6.1.3.2.2 Variablen

Es sei  $Z' \subseteq Z$  die Menge der betrachteten Züge. Für jedes Ereignis  $e$  aus  $F(z)$  von Zügen  $z$  aus  $Z'$  werden Entscheidungsvariablen  $T_{i,j}^{typ}$  derart definiert, dass  $i$  den Index der aktuellen Station des Zugs,  $j$  den Index des Zugs selbst und  $typ \in \{An, Ab\}$  die Art des Ereignisses bestimmt.

Wenn keine Verspätungsmeldungen vorliegen, stimmen die optimalen Werte dieser Entscheidungsvariablen mit den durch den Fahrplan vorgegebenen Eintrittszeiten  $t(e)$  der jeweiligen Ereignisse  $e$  überein, die nachfolgend als  $t_{i,j}^{typ}$  bezeichnet seien.

Eine optimale Lösung liefert damit einen Vektor „durchzuführender“ Ereigniseintritte: Soll bspw. ein Zug für fünf Minuten im Bahnhof angehalten werden, wird seine Abfahrtszeit  $T$  um fünf höher sein als im Fahrplan vorgesehen.<sup>167</sup>

Seien weiter  $Y_{i,j,k}$  binäre Variable: Für alle  $k$  aus  $Abb(z_j, b_i)$  erreichen  $umst_{i,j,k}$  Übergangsreisende ihren Anschluss genau dann, wenn  $Y_{i,j,k} = 1$  ist. Hat  $Y_{i,j,k}$  den Wert 0, dann ist der Anschlusszug abgefahren, bevor die Passagiere umsteigen konnten. Diese Variable entspricht demnach in etwa der Wartefunktion bei den einfachen Dispositionsstrategien.

Zusammengefasst ergibt sich:

$$T_{i,j}^{An} \quad \forall z_j \in Z', \forall b_i \in B(z_j) \text{ als Ankunftszeit des Zugs } j \text{ im Bahnhof } i$$

$$T_{i,j}^{Ab} \quad \forall z_j \in Z', \forall b_i \in B(z_j) \text{ als Abfahrtszeit des Zugs } j \text{ im Bahnhof } i^{168} \text{ und}$$

$$Y_{i,j,k} \quad \forall z_k \in Z', \forall b_i \in B(z_k), \forall z_j \in Zub(z_k, b_i) \text{ mit}$$

$$Y_{i,j,k} := \begin{cases} 1 & k \text{ fährt nicht früher als } T_{i,j}^{An} + mü_{z_i,j,k} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

#### IV.6.1.3.2.3 Kostenfunktion

In erster Annäherung der oben erläuterten Bewertungsmaßstäbe wird die gewichtete Summe der durch Verspätungen und ihre Auswirkungen verursachten Passagierwarteminuten minimiert. Die Kategorien „Warten im Zug“ und „Warten am Gleis“ werden mit den Faktoren  $\alpha$  bzw.  $\beta$  gewichtet. Offensichtlich widersprechen sich dabei die Einzelziele: wird nur die Wartezeit im Bahnhof minimiert ( $\beta = 0$ ), ist es am besten, alle Züge auf ihre verspäteten Zubringer warten zu lassen, wird nur die Wartezeit im Zug in der Zielfunktion betrachtet ( $\alpha = 0$ ), ist

<sup>167</sup> Durch die konstante Verspätungsausbreitung verzögert sich die Ankunftszeit des angehaltenen Zugs im nächsten Bahnhof in diesem Modell ebenfalls um 5 Minuten.

<sup>168</sup> Wobei vereinfachend das Endereignis eines Zugs als spezielles Ankunftsereignis bzw. das Start- als spezielles Abfahrtsereignis betrachtet wird.

es optimal, überhaupt nicht zu warten. D. h., was in einem konkreten Fall optimal ist, hängt stark von den jeweiligen Werten für die Faktoren  $\alpha$  und  $\beta$  ab. Unter der Annahme, dass Wartezeit im Zug subjektiv als angenehmer als am Bahnsteig empfunden wird, sollte  $\beta \geq \alpha$  gewählt werden. Zur Lösung brauchen nur diejenigen Wartezeiten berücksichtigt werden, die durch die Disposition direkt beeinflussbar sind: Ist  $Y_{i,j,k} = 0$ , dann haben  $umst_{i,j,k}$  Passagiere den Anschlusszug  $k$  verpasst und müssen  $takt_{i,k}$  Minuten auf den nächsten Zug in gewünschter Richtung warten, wodurch zusätzliche Passagierwarteminuten in Höhe von  $umst_{i,j,k} \cdot takt_{i,k}$  anfallen, wobei  $takt_{i,k}$  die Wartezeit bis zum nächsten vergleichbaren Anschluss bezeichne. Wenn der Zug  $k$  warten musste, haben  $in_{i,k}$  im Zug sitzende Passagiere eine zusätzliche Reiseverzögerung von  $(T_{i,k}^{Ab} - \max\{T_{i,k}^{An} + maz_{i,k}, t_{i,k}^{Ab}\})$ , wobei  $maz_{i,k}$  die Mindestaufenthaltszeit des Zugs  $k$  im Bahnhof  $i$  bestimme. Vereinfachend kann jedoch  $(T_{i,k}^{Ab} - t_{i,k}^{Ab})$  als Schätzer für die zusätzliche Reiseverzögerung verwendet werden, da für diese Online-Modellierung nur ein kleiner Zeithorizont berücksichtigt wird und somit eventuelle Mehrfachverrechnungen der Warteminuten beschränkt sind.

Unter Berücksichtigung der Gewichte  $\alpha$  und  $\beta$  ergibt sich folgende Kostenfunktion  $C$ :

$$C = \sum_{z_k \in Z', b_i \in B(z_k)} in_{i,k} \cdot (T_{i,k}^{Ab} - t_{i,k}^{Ab}) \cdot \alpha + \sum_{z_j \in Z', b_i \in B(z_j), z_k \in Abb(z_j, b_i)} umst_{i,j,k} \cdot (1 - Y_{i,j,k}) \cdot takt_{i,k} \cdot \beta \quad (1)$$

Eine Minimierung der Funktion (1) ist äquivalent zur Minimierung des variablen Anteils ( $C'$ ) dieser Funktion. Die tatsächliche Anzahl der Passagierwarteminuten wird nach der Optimierung aus dem optimalen Wert von  $C'$  durch Berücksichtigung des konstanten Anteils  $\Delta$  nach der Formel (4) ermittelt.

$$C' = \sum_{z_k \in Z', b_i \in B(z_k)} in_{i,k} \cdot T_{i,k}^{Ab} \cdot \alpha - \sum_{z_j \in Z', b_i \in B(z_j), z_k \in Abb(z_j, b_i)} umst_{i,j,k} \cdot Y_{i,j,k} \cdot takt_{i,k} \cdot \beta \quad (2)$$

$$\Delta = - \sum_{z_k \in Z', b_i \in B(z_k)} in_{i,k} \cdot (t_{i,k}^{Ab}) \cdot \alpha + \sum_{z_j \in Z', b_i \in B(z_j), z_k \in Abb(z_j, b_i)} umst_{i,j,k} \cdot takt_{i,k} \cdot \beta \quad (3)$$

$$C = C' + \Delta \quad (4)$$

#### IV.6.1.3.2.4 Restriktionen

*Fahrplaneinhaltung:* Trivialerweise werden die Ankunfts- und Abfahrtszeiten der Züge durch den gegebenen Fahrplan beschränkt. Die folgenden Ungleichungen (5) und (6) gewährleisten, dass ein Zug in einem Bahnhof weder früher ankommt als geplant noch diesen eher verlässt. Dies ist eine zulässige Vereinfachung der Realität: ein Zug könnte durchaus auch früher als geplant ankommen, muss aber ohnehin mindestens warten, bis er nach Fahrplan abfahren darf.

$$T_{i,k}^{An} \geq t_{i,k}^{An} \quad (5)$$

$$T_{i,k}^{Ab} \geq t_{i,k}^{Ab} \quad (6)$$

*Aktueller Zustand:* Die Gleichungen (7) und (8) initialisieren die Ankunfts- oder Abfahrtszeiten aller relevanten Züge in der jeweils aktuellen Station, ggf. inklusive einer vorliegenden Verspätung. Für die Züge, für die keine Verspätungsmeldungen vorliegen, werden die Werte aus dem Fahrplan unterstellt ( $\tau$  sei entsprechend definiert).

$$T_{akt_k,k}^{An} = \tau_{akt_k}^{An} \quad \forall k \in Z' \quad (7)$$

$$T_{akt_k,k}^{Ab} = \tau_{akt_k}^{Ab} \quad \forall k \in Z' \quad (8)$$

*Aufenthalts- und Fahrtdauer:* Planmäßige Aufenthaltszeiten und Fahrtzeiten von Zügen werden aus dem Fahrplan übernommen. Aufenthaltszeiten ergeben sich zu  $(t_{i,k}^{Ab} - t_{i,k}^{An})$ , und die Fahrtzeiten betragen  $(t_{i2_s,k}^{An} - t_{i1_s,k}^{Ab})$ . Beides wird durch die Ungleichungen (9) bzw. (10) im Modell berücksichtigt.

$\forall z_k \in Z, \forall i \in B(z_k):$

$$T_{i,k}^{Ab} \geq T_{i,k}^{An} + (t_{i,k}^{Ab} - t_{i,k}^{An}) \quad (9)$$

$$T_{i2_s,k}^{An} = T_{i1_s,k}^{Ab} + (t_{i2_s,k}^{An} - t_{i1_s,k}^{Ab}) \quad (10)$$

*Anschlussicherung:* Um den Bahnhof  $i$  zu verlassen, braucht Zug  $k$  eine Abfahrtserlaubnis vom Disponenten. Falls sich einer der Zubringerzüge von  $k$  verspätet, entscheidet der Disponent, ob der Anschluss trotzdem gesichert wird. Seien  $j$  und  $k$  Zubringer und Abbringer im Bahnhof  $i$ . Umsteigende Passagiere können in den Anschlusszug  $k$  frühestens zum Zeitpunkt  $(T_{i,j}^{An} + \text{müz}_{i,j,k})$  einsteigen, d. h., der Anschluss kommt genau dann zustande, wenn der Abbringer nicht früher abfährt, also wenn  $T_{i,k}^{Ab} \geq T_{i,j}^{An} + \text{müz}_{i,j,k}$  oder  $Y_{i,j,k} = 1$  ist (s. oben). Diese Äquivalenz wird durch die Restriktionen (11) und (12) ausgedrückt.  $M_1$  und  $M_2$  müssen dabei so gewählt werden, dass das Ergebnis des Ausdrucks  $(T_{i,k}^{Ab} - T_{i,j}^{An} + \text{müz}_{i,j,k})$  für  $Y_{i,j,k} = 0$  nicht durch (11) und für  $Y_{i,j,k} = 1$  nicht durch (12) eingeschränkt wird<sup>169</sup>:

$$(Y_{i,j,k} = 1) \Leftrightarrow (T_{i,k}^{Ab} - T_{i,j}^{An} + \text{müz}_{i,j,k} \geq 0)$$

$$T_{i,k}^{Ab} - T_{i,j}^{An} - \text{müz}_{i,j,k} \geq M_1 * (Y_{i,j,k} - 1) \quad \forall (i, j, k) \in Abb \quad (11)$$

<sup>169</sup> Bspw. könnte der Zeithorizont der Modellierung als Obergrenze gewählt werden.

$$T_{i,k}^{Ab} - T_{i,j}^{An} - müz_{i,j,k} \leq M_2 * Y_{i,j,k} \quad \forall (i, j, k) \in Abb \quad (12)$$

*Wartezeitregelungen:*<sup>170</sup> Die Wartezeitregelungen der Deutschen Bahn AG können schließlich wie folgt integriert werden: Bekäme ein Abbringer  $k$  durch Warten auf den Zubringer  $j$  eine Verspätung im Bahnhof  $i$ , die nicht länger als die vorgegebene Regelwartezeit  $rwz_{i,j,k}$  ist, muss  $k$  auf  $j$  warten, und seine Verspätung betrüge  $(T_{i,j}^{An} + müz_{i,j,k} - t_{i,k}^{Ab})$ . Die Aussage „Zug  $k$  muss auf Zug  $j$  im Bahnhof  $i$  warten“ ist äquivalent zu  $(Y_{i,j,k} = 1)$ . Eine Reiseverzögerung liegt im Rahmen der Regelwartezeit genau dann, wenn  $(rwz_{i,j,k} - (T_{i,j}^{An} + müz_{i,j,k} - t_{i,k}^{Ab})) \geq 0$  gilt.

Die Wartezeitregelungen können nun als Implikationen (13) modelliert werden. Mit

$$((rwz_{i,j,k} - (T_{i,j}^{An} + müz_{i,j,k} - t_{i,k}^{Ab})) \geq 0) \Rightarrow (Y_{i,j,k} = 1)$$

gilt:

$$rwzEin \cdot (rwz_{i,j,k} - (T_{i,j}^{An} + müz_{i,j,k} - t_{i,k}^{Ab})) \leq M_3 \cdot Y_{i,j,k} \quad \forall (i, j, k) \in Abb \quad (13)$$

Durch das Setzen des Parameters  $rwzEin$  auf 0 kann diese Restriktion unwirksam gemacht werden, falls die gesamtoptimale Lösung im betrachteten Netzausschnitt gesucht ist. Ist  $rwzEin = 1$ , dann werden die Regelwartezeiten in der Problemlösung eingehalten. Parameter  $M_3$  in (13) sollte analog zu  $M_2$  groß genug gewählt werden, um bei  $Y_{i,j,k} = 1$  den Wertebereich des Ausdrucks  $(rwz_{i,j,k} - (T_{i,j}^{An} + müz_{i,j,k} - t_{i,k}^{Ab}))$  nicht einzuschränken.

#### IV.6.1.4 Erweiterung des Grundmodells

In das vorgestellte Grundmodell können weitere Restriktionen integriert werden, um das Dispositionsproblem detaillierter – und damit realitätsnäher – zu beschreiben. In diesem Abschnitt werden folgende Erweiterungen des Grundmodells als gemischt-ganzzahlige lineare Probleme formuliert:

- Nichtlineare Kostenfunktionen
- Aufholen von Verspätungen
- Berücksichtigung von Prognosen
- Streckenbelegungsplanung und kapazitierte Strecken
- Begrenzte Anzahl an Dispositionsmaßnahmen

---

<sup>170</sup> Dieser „Schalter“ wurde ursprünglich zur Validierung eingefügt und ist hier der Vollständigkeit halber aufgeführt.

#### IV.6.1.4.1 Nichtlineare Zielfunktion

Im vorgestellten Grundmodell wurden in der Zielfunktion die gewichteten Passagierwarteminuten minimiert. Dabei wurde im Gegensatz zum Vorgehen bei einfachen Dispositionsstrategien lediglich zwischen „Warten am Bahnhof“ und „Warten im Zug“ unterschieden. Nun wird das Modell gemäß der Bewertungsmaßstäbe um einen nichtlinearen Zielfunktionsverlauf erweitert, weil geringe Wartezeiten für viele sicherlich besser im Sinne der Disposition sind als hohe Wartezeiten für wenige – es wird also eine überproportional wachsende Zielfunktion unterstellt.

Eine solche Funktion kann mit quasi beliebiger Genauigkeit als stückweise lineare Funktion approximiert werden, wobei die Genauigkeit mit der Anzahl der Eckpunkte wächst.<sup>171</sup> In Abbildung 42 rechts ist eine mögliche Linearisierung der links abgebildeten Funktionen dargestellt.

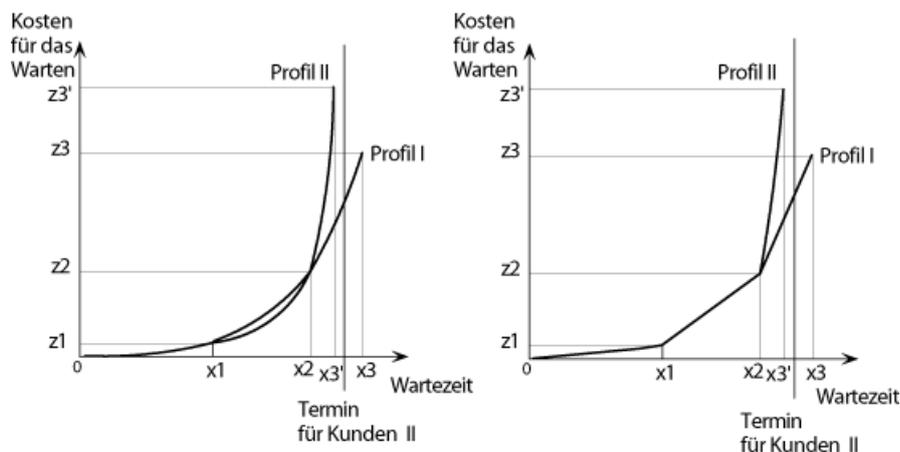


Abbildung 42: Verschiedene Warteprofile und ihre lineare Approximation

Darüber hinaus ist, wie in Abschnitt IV.2 beschrieben, eine Aufteilung der Reisenden in Kategorien denkbar, weil beispielsweise die Reisen unterschiedliche Dringlichkeitsstufen haben können. Die Kosten für das Warten der Reisendengruppen unterschiedlicher Kategorien (s. ebenfalls Abbildung 42) werden durch unterschiedliche Parameter beschrieben und in der resultierenden Kostenfunktion zusammengefasst.

Zur Darstellung stückweise linearer Zielfunktionen werden miteinander verbundene Strecken (mit konstanter Steigung) betrachtet. Seien  $L^1$  bzw.  $L^2$  die Anzahl solcher Intervalle in der Approximation der Kosten für die Wartezeit im Zug bzw. am Gleis. Die Intervalle seien ferner durch die Eckpunkte  $(x^{l^1}, z^{l^1})$  bzw.  $(y^{l^2}, w^{l^2})$  begrenzt. Das Argument (hier: Wartezeit) einer stückweise linearen Zielfunktion wird dann als Linearkombination zweier benachbarter Eckpunkte dargestellt. Für jeden Eckpunkt wird eine dedizierte Variable, deren Wert in  $[0,1)$  liegen darf, eingeführt:

<sup>171</sup> In der Praxis geht diese Genauigkeit zulasten der Lösbarkeit, weil stückweise Linearitäten mittels zusätzlicher Binärvariablen ( $\in \{0,1\}$ ) modelliert werden.

Es seien  $U_{l^1,i,k}$  die Variablen für die Darstellung der Wartezeit im Zug und  $V_{l^2,i,j,k}$  diejenigen für die Darstellung der Wartezeit am Gleis. Das ursprüngliche Model wird um folgende Restriktionen ergänzt:

$$T_{i,k}^{Ab} - t_{i,k}^{Ab} = x_1 \cdot U_{1,i,k} + \dots + x_{L^1} \cdot U_{L^1,i,k} \quad (14)$$

$$(1 - Y_{i,j,k}) \cdot takt_{i,k} = y_1 \cdot V_{1,i,j,k} + \dots + y_{L^2} \cdot V_{L^2,i,j,k} \quad (15)$$

$$\sum_{l^1=1..L^1} U_{l^1,i,k} = 1 \quad (16)$$

$$\sum_{l^2=1..L^2} V_{l^2,i,j,k} = 1 \quad (17)$$

Die Variablen  $U_{l^1,i,k}$  bzw.  $V_{l^2,i,j,k}$  bilden in der Reihenfolge der  $l^1$  bzw.  $l^2$ -Indizes ein *Special Ordered Set* vom Typ 2 (SOS2)<sup>172</sup>.

Die Kosten ergeben sich zu der gewichteten Summe der Passagierwartezeiten, welche aus den insgesamt ( $L^1 + L^2$ ) verschiedenen Wartezeitkategorien berechnet werden:

$$\begin{aligned} &\text{minimize} \\ C = &\sum_{B(z_k)} (in_{i,k} \cdot \sum_{l^1=1..L^1} z_{l^1} \cdot U_{l^1,i,k}) \cdot \alpha + \sum_{(i,j,k) \in Abb} (umst_{i,j,k} \cdot \sum_{l^2=1..L^2} w_{l^2} \cdot V_{l^2,i,j,k}) \cdot \beta \end{aligned} \quad (18)$$

#### IV.6.1.4.2 Aufholen von Verspätungen

Verspätungen können – im Gegensatz zur bisherigen Modellierung – sowohl auf der Strecke als auch im Bahnhof aufgeholt werden.

*Aufholen durch schnelleres Fahren:* Zum Aufholen einer vorhandenen Verspätung kann die fahrplanmäßige Fahrzeit zwischen zwei Stationen verkürzt werden. Die minimale Fahrzeit  $d_{s,k}$  des Zugs  $k$  auf der Strecke  $s$  kann dazu aus den Streckeneigenschaften der Strecke  $s$  und den statischen Eigenschaften des Zugs  $k$  (bzw. der Zuggattung von  $k$ ) berechnet werden; ggf.

<sup>172</sup> Special Ordered Sets sind spezielle Restriktionstypen: Eine SOS1-Menge „ist eine Menge von Variablen (kontinuierlich oder ganzzahlig) von denen genau eine Variable ungleich 0 sein muss“ (vgl. [Williams 1999], S. 165, eigene Übersetzung). SOS1-Mengen können verwendet werden, um mehrfache Auswahlmöglichkeiten, z. B. bei der Standortplanung, zu modellieren. Eine SOS2-Menge „ist eine Menge von Variablen von denen höchstens zwei ungleich 0 sein dürfen. Diese zwei Variablen müssen aufeinander folgend nach der vorgegebenen Ordnung der Menge sein“ (vgl. [Williams 1999], S. 165, eigene Übersetzung). SOS2-Mengen werden z. B. verwendet, um wie hier stückweise lineare Zielfunktionen zu modellieren. Sowohl die SOS1- als auch die SOS2-Bedingungen lassen sich nach [Williams 1999], S. 165ff., mit Hilfe von 0/1-Variablen als gemischt-ganzzahlige Programme formulieren. Durch modifizierte Branch&Bound-Algorithmen können große Effizienzsteigerungen bei der Lösung von Programmen, die SOS-Bedingungen enthalten, erreicht werden (vgl. [Beale/Tomlin 1969]). Daher bieten einige Optimierungssysteme eine spezielle Behandlung von SOS-Bedingungen oder erkennen diese im Preprocessing automatisch.

müssen zudem temporäre Gegebenheiten oder das Geschwindigkeits- bzw. Bremsverhalten berücksichtigt werden. In Restriktion (10) des Grundmodells kann nun die auf diese Weise ermittelte minimale Fahrzeit statt der planmäßigen Fahrzeit berücksichtigt werden:

$$T_{i2_s,k}^{An} \geq T_{i1_s,k}^{Ab} + d_{s,k} \quad (19)$$

*Aufholen durch einen verkürzten Aufenthalt im Bahnhof:* Eine Verspätung kann wie gesehen durch eine Haltezeitverkürzung kompensiert werden. Die Untergrenze für die Aufenthaltszeit des Zugs im Bahnhof sei definiert als dessen Mindestaufenthaltszeit (*maz*). Die Mindestaufenthaltszeit des Zugs *k* im Bahnhof *i* hängt dabei vom Typ des Zugs *k*, von der Größe des Bahnhofs *i* und von der Anzahl der einsteigenden und aussteigenden Passagiere ab. Diesen Wert als bekannt (bspw. als Erfahrungswert oder technische Gegebenheit) vorausgesetzt, kann die Restriktion (9) folgendermaßen modifiziert werden:

$$T_{i,k}^{Ab} \geq T_{i,k}^{An} + maz_{i,k} \quad (20)$$

Denkbar ist die Bestimmung einer Mindestaufenthaltszeit zur Laufzeit, unter Berücksichtigung der aktuellen Passagierströme. Dieser Wert müsste dann als Modellvariable *Max* definiert werden, der bspw. mit den Werten der entsprechenden Parameter *maz* initialisiert würde und im Modell den sich tatsächlich ergebenden Wert annimmt. Die Restriktion (9) des Grundmodells wird in diesem Fall durch die Restriktion (21) ersetzt.

$$T_{i,k}^{Ab} \geq T_{i,k}^{An} + Max_{i,k} \quad (21)$$

*Modellierung mittels Aufholfaktoren:* Können die genauen Fahrzeiten auf allen Strecken für alle Züge nicht ermittelt werden, so kann das Aufholen von Verspätungen mit zug- und streckenspezifischen Aufholfaktoren modelliert werden. Die Werte dieser Faktoren basieren auf Erfahrungen und können bspw. durch Befragung von Expertenbefragung und/oder Zugführern oder durch Analyse von Vergangenheitsdaten ermittelt werden.

Restriktion (22) zeigt die entsprechende Formulierung: Ein Zug der Zuggattung *g* kann auf der Strecke *s*  $a_{g,s}$  Minuten pro 100 Kilometer oder Minuten pro Stunde Sollfahrzeit aufholen. Alternativ dazu ermöglicht die Bedingung (23), dass der Zug *k*  $\eta_{g,s} \cdot 100$  % seiner Verspätung auf der Strecke *s* aufholen kann. Selbstverständlich ist auch eine zugspezifische Modellierung denkbar.

$$T_{i2_s,k}^{An} \geq T_{i1_s,k}^{Ab} + (t_{i2_s,k}^{An} - t_{i1_s,k}^{Ab}) \cdot (1 - a_{k,s}) \quad (22)$$

$$T_{i2_s,k}^{An} - t_{i2_s,k}^{An} \geq (T_{i1_s,k}^{Ab} - t_{i1_s,k}^{Ab}) \cdot \eta_{s,k} \quad (23)$$

Die Gleichungen (19) – (23) erweitern damit das Modell um eine andere als die Propagation konstanter Verspätungen.<sup>173</sup>

<sup>173</sup> Diese Aufholfaktoren unterliegen in der Praxis diversen Einflüssen, z. B. dem Wetter, was für den Einsatz im Realsystem immer zu beachten wäre.

#### IV.6.1.4.3 Berücksichtigung von Prognosedaten

Eine Möglichkeit für die Prognose der Verspätungsentwicklung ist das regelbasierte Schätzen einer Aufholwahrscheinlichkeit, bspw. in Form von Aussagen wie: „Ein ICE-Zug kann *höchstens* 5 Minuten der Verspätung pro 30 Minuten einer Fahrt aufholen“ oder („Zug  $k$  hat zu 90 % in Berlin Zoo eine Verspätung von 20 Minuten“, können bspw. Trends integriert werden. Dabei ist unerheblich, auf welche Weise solche Daten ermittelt werden. Sei  $\theta_{i,j}^{An/Ab}$  die prognostizierte Abweichung der Ankunft bzw. der Abfahrt des Zugs  $j$  im Bahnhof  $i$ , und sei  $\pi_{i,j}^{An/Ab}$  die Wahrscheinlichkeit dieser Prognose. Durch die Restriktionen (24) bzw. (25) werden diese Informationen im Modell als Trend berücksichtigt:

$$T_{i,k}^{An} \geq t_{i,k}^{An} + \theta_{i,k}^{An} \cdot \pi_{i,k}^{An} \quad (24)$$

$$T_{i,k}^{Ab} \geq t_{i,k}^{Ab} + \theta_{i,k}^{Ab} \cdot \pi_{i,k}^{Ab} \quad (25)$$

#### IV.6.1.4.4 Streckenbelegungsplanung

Selbst aufwändige Dispositionsaufgaben wie die Streckenbelegungsplanung sind relativ einfach zu modellieren. Denkbare Varianten sind dabei die Einhaltung von Sicherheitsabständen oder die – etwas realitätsnähere – Belegung von Streckenabschnitten.

*Streckenbelegungsplanung mit Sicherheitsabstand:* Soll ein zeitlicher Abstand  $h_{i,j,k}$  zwischen den fahrenden Zügen  $j$  und  $k$  beim Passieren der Stelle  $i$  eingehalten werden, kann dieser Schwellenwert als Implikation formuliert werden:

$$(T_{i,j}^{Ab} > T_{i,k}^{Ab}) \Rightarrow (T_{i,k}^{Ab} \geq T_{i,j}^{Ab} + h_{i,j,k})$$

Um dies als Restriktion modellieren zu können, wird zunächst eine neue binäre Variable  $\psi_{i,j,k}$ , welche die Reihenfolge der Züge an der Stelle  $i$  beschreibt, eingeführt:

$$(T_{i,j}^{Ab} \leq T_{i,k}^{Ab}) \Leftrightarrow (\psi_{i,j,k} = 1)$$

$$(\psi_{i,j,k} = 1) \Rightarrow (T_{i,j}^{Ab} + h_{i,j,k})$$

Die Restriktionen (26) und (27) bilden dann die Reihenfolge der Züge  $j$  und  $k$  an der Stelle  $i$  mithilfe der binären Variablen  $\psi_{i,j,k}$  ab. Die Restriktion (28) garantiert: Passiert der Zug  $k$  die Stelle  $i$  später als der Zug  $j$  – ist also  $\psi_{i,j,k} = 1$  – dann liegen diese Ereignisse mindestens  $h_{i,j,k}$  Minuten auseinander.

$$T_{i,k}^{Ab} - T_{i,j}^{Ab} \leq \psi_{i,j,k} \cdot M_4 \quad (26)$$

$$T_{i,k}^{Ab} - T_{i,j}^{Ab} \geq (\psi_{i,j,k} - 1) \cdot M_5 \quad (27)$$

$$T_{i,k}^{Ab} - T_{i,j}^{Ab} - h_{i,j,k} \geq (\psi_{i,j,k} - 1) \cdot M_6 \quad (28)$$

*Belegungsplanung auf Streckenabschnitten:* Es seien die Strecken in Streckenabschnitte derart unterteilt, dass sich in jedem Streckenabschnitt zu einem beliebigen Zeitpunkt nur ein

Zug befinden kann<sup>174</sup>. Zug  $j$  kann die Stelle  $i$  nur dann passieren, wenn der Streckenabschnitt bis zum nächsten Signal frei ist. Dieser Streckenabschnitt ist frei, wenn alle vor dem Zug  $j$  fahrenden Züge diesen Abschnitt verlassen bzw. die Stelle  $(i+1)$ , welche das Ende des Abschnittes  $i$  markiert, passiert haben. Es muss also die folgende Implikation gelten:

$$(T_{i,k}^{Ab} \geq T_{i,j}^{Ab}) \Rightarrow (T_{i,k}^{Ab} \geq T_{i+1,j}^{Ab})$$

Die Reihenfolge der Ereignisse wird durch entsprechende Restriktionen festgelegt. Dazu wird ebenfalls die binäre Variable  $\psi_{i,j,k}$ , die die Reihenfolge der Züge an der Stelle  $i$  beschreibt, benötigt. Folgende drei Implikationen beschreiben die Belegung der Streckenabschnitte:

$$(\psi_{i,j,k} = 1) \Rightarrow (T_{i,k}^{Ab} \geq T_{i,j}^{Ab})$$

$$(T_{i,k}^{Ab} \geq T_{i,j}^{Ab}) \Rightarrow (\psi_{i,j,k} = 1)$$

$$(\psi_{i,j,k} = 1) \Rightarrow (T_{i,k}^{Ab} \geq T_{i+1,j}^{Ab})$$

Diese drei Implikationen werden wiederum durch drei entsprechende Restriktionen modelliert: Die Restriktionen (29) und (30) bilden analog zu den Restriktionen (26) und (27) die Reihenfolge der Züge  $j$  und  $k$  an der Stelle  $i$  mittels der binären Variable  $\psi_{i,j,k}$  ab. Falls  $\psi_{i,j,k}$  gleich eins ist, wird durch die Bedingung (31) gewährleistet, dass der Zug  $k$  den Streckenabschnitt  $i$  erst befahren darf, nachdem der Zug  $j$  diesen Abschnitt verlassen hat. Die Parameter  $M_4$  bis  $M_9$  sind in den Restriktionen (26) bis (31) ausreichend groß zu wählen.

$$T_{i,k}^{Ab} - T_{i,j}^{Ab} \geq (\psi_{i,j,k} - 1) \cdot M_7 \quad (29)$$

$$T_{i,k}^{Ab} - T_{i,j}^{Ab} \leq \psi_{i,j,k} \cdot M_8 \quad (30)$$

$$T_{i,k}^{Ab} - T_{i+1,j}^{Ab} \geq (\psi_{i,j,k} - 1) \cdot M_9 \quad (31)$$

Diese Modellierung erhöht die Komplexität des Modells enorm, sodass bestenfalls nur sehr geringe Zeithorizonte exakt geplant werden können.

*Streckenkapazitäten:* Sollen Strecken kapazitiert werden, kann dies wie in den vorigen Restriktionen geschehen; es handelt sich lediglich um eine Verallgemeinerung des Spezialfalls eines Zugs auf einem Streckenabschnitt zur gleichen Zeit. Die Strecke wird dazu in so viele fiktive Streckenabschnitte unterteilt, wie es die Kapazität dieser Strecke vorgibt. Nun kann für die Menge der Züge, die die Strecke im relevanten Zeitraum befahren, eine Streckenbelegungsplanung durchgeführt werden. Die dafür notwendigen Restriktionen sind die Restriktionen (29) bis (31). Sie werden für die Menge der Züge, die diese Strecke befahren und für alle fiktiven Strecken, in die sie unterteilt wurde, gebildet.

---

<sup>174</sup> Dies könnte in Echtzeit auch eine virtuelle Einteilung sein, wenn die Zugortung nur genau genug funktioniert.

#### IV.6.1.4.5 Beschränkung der Anzahl der „Warten“-Entscheidungen

Zu Stoßzeiten kann es wie gesagt sinnvoll sein, die Zahl der Warteentscheidungen für einen Disponenten zu beschränken, um die Übersichtlichkeit für einen menschlichen Disponenten zu erhalten. Dazu können eine (weiche) obere Schranke für die Anzahl der berechneten Abfahrtsverzögerungen sowie Strafkosten für die Überschreitung dieser Schranke eingeführt werden. Es sei dazu  $H_{i,k}$  wie folgt definiert: Wenn der Zug  $k$  im Bahnhof  $i$  auf einen verspäteten Zubringer wartet, wird  $H_{i,k}$  auf eins gesetzt. Die Abfahrt des Zugs  $k$  wird im Bahnhof  $i$  genau dann verzögert, wenn folgende strikte Ungleichung erfüllt ist:

$$T_{i,k}^{Ab} > T_{i,k}^{An} + (t_{i,k}^{Ab} - t_{i,k}^{An})$$

Diese Ungleichung kann unter Benutzung eines genügend kleinen, streng positiven Parameters  $\varepsilon$  umformuliert werden:

$$T_{i,k}^{Ab} \geq T_{i,k}^{An} + (t_{i,k}^{Ab} - t_{i,k}^{An}) + \varepsilon$$

(Da alle Zeiten im Fahrplan minutengenau angegeben sind, kann  $\varepsilon$  bspw. gleich einer Minute angenommen werden.)

Es soll gelten:

$$(H_{i,k} = 1) \Leftrightarrow (T_{i,k}^{Ab} \geq T_{i,k}^{An} + (t_{i,k}^{Ab} - t_{i,k}^{An}) + \varepsilon)$$

Diese Äquivalenz wird durch die Bedingungen (32) und (33) garantiert.

$$T_{i,k}^{Ab} - (T_{i,k}^{An} + (t_{i,k}^{Ab} - t_{i,k}^{An}) + \varepsilon) \leq H_{i,k} \cdot M_{10} \quad (32)$$

$$T_{i,k}^{Ab} - (T_{i,k}^{An} + (t_{i,k}^{Ab} - t_{i,k}^{An}) + \varepsilon) \geq (1 - H_{i,k}) \cdot M_{11} \quad (33)$$

Die Anzahl der Warten-Entscheidungen entspricht der Summe der  $H_{i,k}$ -Variablen, welche in der folgenden Restriktion durch einen Parameter *MaxAnzWarten* beschränkt wird:

$$\sum_{i,k} H_{i,k} \leq \text{MaxAnzWarten} \quad \dots(34)$$

Es kann sinnvoll sein, diese Restriktion „weich“ zu modellieren, sodass mehr Warten-Entscheidungen erlaubt sind als *MaxAnzWarten* vorgibt. Zusätzliche Warten-Entscheidungen werden dann jedoch mit Strafkosten  $\gamma$  in der Zielfunktion belegt. Dafür wird eine neue Variable  $\delta$  benötigt, die nicht explizit als ganzzahlige Variable definiert werden muss und die in der Kostenfunktion enthalten ist. Durch diese Variable wird die rechte Seite der Restriktion (35) erweitert:

$$\sum_{i,k} H_{i,k} \leq \text{MaxAnzWarten} + \delta \quad (35)$$

Die modifizierte Kostenfunktion lautet:

$$\begin{aligned} & \text{minimize} \\ C_2 = & \sum_{(i,k) \in B(z_k)} in_{i,k} \cdot (T_{i,k}^{Ab} - t_{i,k}^{Ab}) \cdot \alpha + \sum_{(i,j,k) \in Abb} um_{i,j,k} \cdot (1 - Y_{i,j,k}) \cdot takt_{i,k} \cdot \beta + \delta \cdot \gamma \end{aligned} \quad (36)$$

Durch diese Erweiterung erhält das Modell eine ambivalente Zielsetzung: mehrere Ziele konkurrieren. Damit gibt es keine optimale Lösung im eigentlichen Sinne. Eine einfache Addition ist wenig sinnvoll, da die beiden Größen – Passagierwarteminuten und Anzahl der Entscheidungen – unterschiedliche Maßeinheiten besitzen. Welche Lösung optimal ist, hängt stark von den für die konkurrierenden Zielsetzungen gesetzten Prioritäten oder Gewichtungen ab.

## IV.6.2 Implementierung des Optimierungsagenten

Im Laufe der vorliegenden Arbeit wurden mehrere Versionen des zuvor beschriebenen Optimierungsmodells implementiert. Ihnen allen gemeinsam ist der prinzipielle Aufbau, der deswegen zunächst kurz dargestellt wird. Die anschließenden Implementierungsdetails betreffen aber lediglich die aktuellste (und umfassendste) Ausführung.

### IV.6.2.1 Aufbau eines Optimierungssystems

Ein Optimierungssystem besteht i. Allg. aus den folgenden zwei Hauptkomponenten, nämlich *Modell-* oder *Matrixgenerator* und *mathematisches Optimierungssystem*.

Der Modellgenerator wird in der Regel individuell für das zu lösende Problem bzw. für die zu lösende Problemklasse entwickelt, während für die mathematische Optimierung selbst i. d. R. eine Standardsoftware zur LP- bzw. MIP-Optimierung eingesetzt wird, bspw.

- MOPS (vgl. [Suhl 1994] bzw. [MopS 2005]) oder
- CPLEX (vgl. [CPLEX 2005]).

Dieser modulare Aufbau verbindet die Flexibilität des Modellgenerators mit den Vorzügen einer ausgereiften und schnellen Standardsoftware zur mathematischen Optimierung.

Der Modellgenerator erzeugt aus den vorhandenen Modelldaten und –parametern ein mathematisches Modell in einem für das Optimierungssystem verständlichen Format. Dies kann ein Standardformat (i. Allg. MPS-Format<sup>175</sup>) oder auch ein proprietäres Datenformat sein. Aus diesem Modell berechnet der mathematische Optimierer mit Hilfe eines geeigneten Lösungsverfahrens (vgl. Abschnitt IV.1.1.1) eine Lösung. Falls der Optimierer als Modul in das Optimierungssystem integriert wird, kann das Modell auch mittels API<sup>176</sup>-Aufrufen an den Optimierer übergeben oder direkt in dessen Speicher geschrieben werden. Zur Vereinfachung der Bedienung sollten die Steuerung und Datenmanipulation in eine Softwareanwendung (ggf. mit graphischer Oberfläche) eingebettet werden. Der generelle Aufbau eines Optimierungssystems ist in Abbildung 43 beschrieben.

Der hier entwickelte Optimierungsagent kapselt den beschriebenen Aufbau. Er berechnet zusätzlich lediglich konkrete Passagierzahlen (Einsteiger, Aussteiger, Umsteiger) und Infor-

---

<sup>175</sup> Das MPS-Format ist das am weitesten verbreitete Standardformat zur Speicherung von mathematischen (linearen und gemischt-ganzzahligen) Modellen und wird praktisch von allen kommerziellen und vielen nicht-kommerziellen Optimierungssystemen unterstützt (vgl. [Fourer 2000]).

<sup>176</sup> Bei der API (*Application Programming Interface*) handelt es sich um die (Programmier-) Schnittstelle einer Anwendung oder Programmbibliothek.

mationen über Zubringer und Abbringer vor Beginn über geeignete Anfragen aus den vorliegenden Passagierrouuten, um das Modell direkt erstellen zu können.

Als Standardsoftware zur Lösung der Optimierungsmodelle standen die mathematischen Optimierer MOPS (Version 6.32) und CPLEX (Version 9.0.0) zur Verfügung. MOPS lag als Dynamic Link Library (DLL) für die Win32-Plattform vor, die quasi direkt in den Optimierungsagenten integriert werden kann; CPLEX ist in dieser Form nur als externe Anwendung nutzbar.

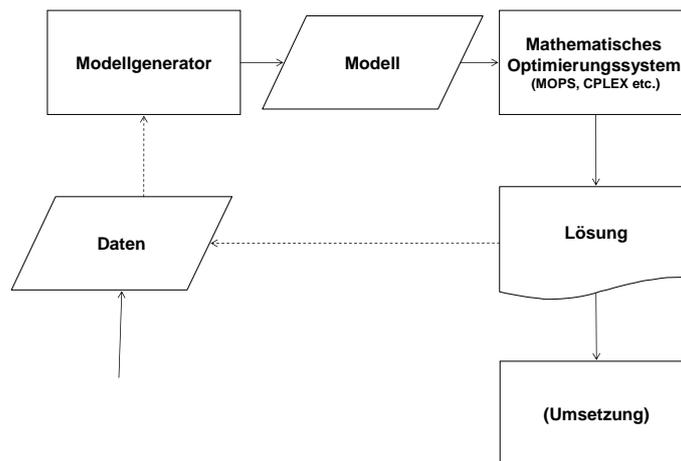


Abbildung 43: Allgemeiner Aufbau eines Optimierungssystems

#### IV.6.2.2 Systemspezifikation und Implementierungsdetails

Eine Übersicht der logischen Bestandteile des Optimierungssystems gibt Abbildung 44.

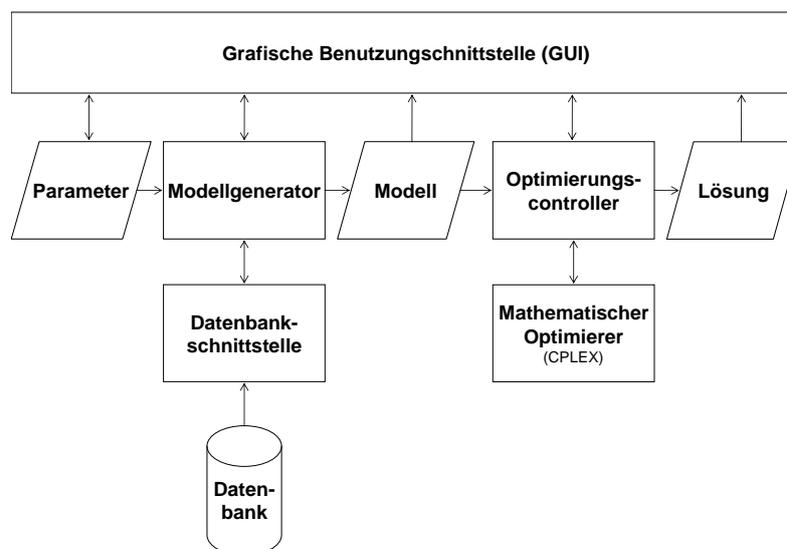


Abbildung 44: Aufbau des Optimierungssystems (Systemspezifikation)

Der Modellgenerator des Optimierungssystems soll Instanzen der in IV.6.1 und IV.7.1 besprochenen mathematischen Modelle erzeugen können. Dazu muss der Modellgenerator über eine Datenbankschnittstelle verfügen, über die die benötigten Modelldaten geladen werden können. Das Optimierungssystem unterstützt beide o. g. Optimierer.

Die Benutzungsoberfläche dient sowohl zur Eingabe der Modellparameter, zur Steuerung des Optimierungsablaufs und der Ergebnispräsentation.

#### IV.6.2.2.1 Implementierung

Das komplette System wurde wiederum in der Programmiersprache JAVA implementiert, wobei allerdings zu Testzwecken ein spezielles Logging-Framework (log4j der Apache Software Foundation) eingebunden wurde, welches Meldungen des Programms (Fehlermeldungen, Warnungen, Informationen) ausgibt und komfortabel auswerten kann (vgl. [ASF 2005]).

MOPS wurde in JAVA gekapselt und damit quasi direkt in das System integriert; CPLEX kann nur über den Umweg der Ausgabe einer Datei eingebunden werden.

#### IV.6.2.3 Bedienung

Die Benutzungsoberfläche des Optimierungsagenten besteht aus mehreren Masken, die zur Eingabe der Modellparameter und zur Ausgabe von Informationen dienen. Ein Beispiel dafür ist in Abbildung 45 dargestellt.

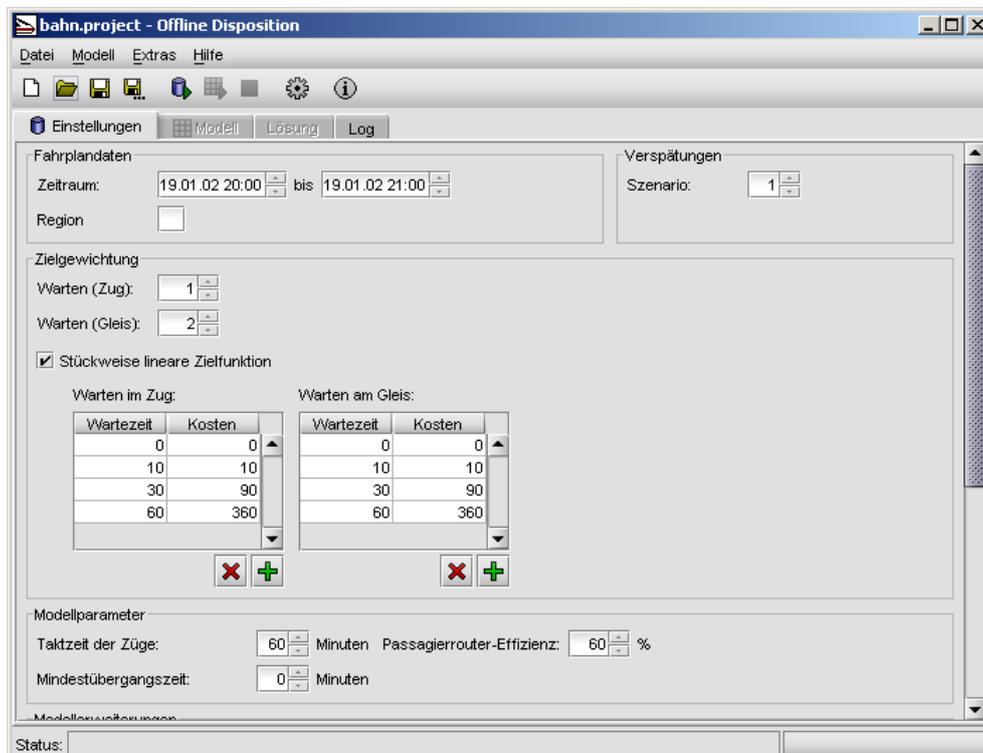


Abbildung 45: Benutzungsoberfläche der Maske „Projekteinstellungen“

In dieser Maske können globale Parameter eingestellt werden, bspw. Betrachtungszeitraum, Verspätungsszenario, Zielgewichtung und Eckpunkte der stückweise linearen Kosten-

funktion, Taktzeit oder auch Mindestübergangszeit, die mangels Verfügbarkeit genauerer Daten als konstant für die Berechnung unterstellt wird. Auch das Aufholen von Verspätungen und die Beachtung von Regelwartezeiten kann von hier aus gesteuert werden.

In der Maske „Modell“ werden nach Abschluss der Modellgenerierung Informationen zum generierten Modell, z. B. die Modelldimensionen, angezeigt. Nachdem das Modell generiert wurde, kann es als Datei im MPS-Format exportiert oder intern mit MOPS gelöst werden. Im letzteren Fall wird nach Abschluss der Optimierung das Ergebnis in der Maske Lösung angezeigt. Über den Fortschritt der Optimierung gibt die Maske „Log“ Auskunft; weitere Einstellungen sind über andere Masken vorzunehmen. All diese Eingaben können im Agentensystem auch durch andere Agenten ausgelöst werden.

### IV.6.3 Ergebnisse der Experimentation

Bei der Generierung der in den nachfolgenden Tabellen enthaltenen Probleminstanzen wurden verschiedene Parameterwerte verwendet. Die in allen Modellausprägungen einheitlich benutzten Parameter sind Fahrplantage, verwendete Zugkategorien (D, EC, IC, ICE, IR, RB, RE) und Takt (60 Minuten). Störungen wurden in diesen Versuchen wiederum als gleichverteilt über die Menge der Züge und exponentialverteilt in ihrer Dauer generiert.

Ziel der Untersuchungen ist, das Modell auf seine Nutzung als Echtzeit-Anwendung zu testen. Der Kennwert dafür ist in diesem Modell die Dauer der MIP-Optimierung. Dazu werden die verschiedenen Einflussfaktoren auf die Optimierungsdauer und deren Zusammenhänge untereinander betrachtet. Außerdem wird das Modell auf sein Verhalten bei Extrembelastungen untersucht. Die nachfolgenden Tabellen enthalten charakteristische Ergebnisse, die jeweils aus mehreren Testdurchläufen resultieren.

#### IV.6.3.1 Einfluss der Modellgröße auf die Lösungszeit

Die Dimension der Optimierungsmatrix wird durch die Größe des zu modellierenden Realitätsausschnitts bestimmt, konkret durch den Zeithorizont, die berücksichtigten Zugkategorien und die Größe der Planungsregion, also des betrachteten Fahrplanausschnitts. In den ersten Experimenten wird nur der Bereich Frankfurt/Main mit den o. a. Zugkategorien untersucht; Unterschiede in Modelldimensionen kommen daher nur durch unterschiedliche Planungszeiträume zustande. Die in Tabelle 13 aufgelisteten Ergebnisse wurden unter Einhaltung der Wartezeitregeln und mit einer erwarteten Verspätungshöhe von 20 Minuten durchgeführt. Außerdem wurde das Aufholen von Verspätungen mit fünf Minuten pro Stunde berücksichtigt.

Alle Optimierungsläufe sind in diesem Szenario ausreichend kurz, um die Echtzeitbedingung zu erfüllen. Es wird deutlich, dass weder die Erhöhung noch die Verringerung des Planungszeitraums in einem eindeutigen Zusammenhang mit der Zeitdauer der IP-Optimierung stehen. Bei einem Vergleich der Parametersätze 1.1 und 1.2 fällt auf, dass sich bei einer Erhöhung der Modellierungszeit von einer auf vier Stunden die Modellgröße annähernd vervierfacht. Das größere Modell wird trotzdem sehr viel schneller gelöst, sodass insgesamt keine valide Aussage über den Zusammenhang zwischen Modellgröße und Lösungsdauer möglich ist.

Tabelle 13: Einfluss der Modellgröße auf die Optimierungsdauer<sup>177</sup>

	Horizont	Störungen	Passagiere	Umsteiger	Restr.	Var.	davon Integer	Nichtnullelemente <sup>178</sup>	Optimierungsdauer
Nr.	[Std.]								(MIP in [s])
1 #1	1	5	100	20	5125	4211	1243	11493	65,153
1 #2	4	5	100	20	21479	17034	5283	48241	3,875
1 #3	8	5	100	20	30635	24590	7190	68460	78,352

#### IV.6.3.2 Einfluss des Passagieraufkommens

Ceteris paribus wird nun nur die Anzahl der Passagiere im Zug variiert. Alle Testläufe werden unter Berücksichtigung der Wartezeitregeln, der Möglichkeit des Aufholens von Verspätungen und mit einer Verspätungshöhe von 20 Minuten pro Störung durchgeführt.

Tabelle 14: Einfluss der Passagiere auf die Optimierungsdauer

	Horizont	Störungen	Passagiere	Umsteiger	Restr.	Var.	davon Integer	Nichtnullelemente	Optimierungsdauer
Nr.	[Std.]								(MIP in [s])
2 #1	0,5	5	100	20	2202	1935	491	4895	2,203
2 #2	0,5	5	1000	20	2202	1935	491	4895	0,961
2 #3	0,5	5	10000	20	2202	1935	491	4895	0,941
2 #4	0,5	5	50000	20	2202	1935	491	4895	0,941
2 #5	0,5	5	2186846	20	2202	1935	491	4895	0,941

Es zeigt sich dabei, dass die reine Erhöhung der Passagierzahl im vorliegenden Modell keinen Einfluss auf die Lösungszeit hat, sodass es anscheinend in dieser Problemstruktur keinen direkten Zusammenhang zwischen Passagieranzahl und Lösungsdauer gibt. Tabelle 14 zeigt einige charakteristische Effekte bei der Erhöhung der Passagierzahl, wobei es sicherlich in praxi unrealistisch ist, bei einer Erhöhung der Anzahl Reisender die Umsteiger konstant niedrig zu lassen. Das Verhältnis beider Zahlen wird daher im Anschluss betrachtet.

<sup>177</sup> Dabei geben die Zahlen in der Rubriken „Passagiere“ und „Umsteiger“ jeweils Zahlen pro Zug an.

<sup>178</sup> Mit Nichtnullelementen werden diejenigen Elemente der Matrix  $A$  der Restriktionen eines Mathematischen Programms  $Ax = b$  bezeichnet, die sich von Null unterscheiden. Die Anzahl der Nichtnullelemente ist einer der Gradmesser für die Schwierigkeit eines Problems. Normalerweise ist die Matrix  $A$  dünnbesetzt (*sparse*), d. h., die Besetzungsdichte liegt maximal im niedrigen Prozentbereich.

Tabelle 15: Einfluss Passagiere/Umsteiger auf die Optimierungsdauer

	Horizont	Störungen	Passagiere	Umsteiger	Restr.	Var.	davon Integer	Nichtnull-elemente	Optimierungsdauer
Nr.	[Std.]								(MIP in [s])
<b>3 #1</b>	1	5	100	1	5125	4211	1243	11493	3,294
<b>3 #2</b>	1	5	100	10	5125	4211	1243	11493	7,771
<b>3 #3</b>	1	5	100	20	5125	4211	1243	11493	65,153
<b>3 #4</b>	1	5	100	50	5125	4211	1243	11493	30,824
<b>3 #5</b>	1	5	100	70	5125	4211	1243	11493	114,805
<b>3 #6</b>	1	5	100	100	5125	4211	1243	11493	50,452

### IV.6.3.3 Einfluss der Rate Passagiere/Umsteiger

Für diese Versuchsreihe werden Modellierungszeitraum und Anzahl Störungen derart gewählt, dass Struktur und Größe der Probleminstanzen ähnlich (respektive gleich) sind. In Tabelle 15 ist zu beobachten, dass alle Parametersätze unterschiedliche Lösungszeiten für die IP-Optimierung aufweisen, wobei tendenziell ein positiver Zusammenhang zwischen der Höhe der Passagier/Umsteiger-Rate und der Lösungsdauer zu beobachten ist. Dieser bestätigt sich auch in anderen Messreihen und erreichte bei 70 Umsteigern pro Anschluss und 100 Passagieren die größte Optimierungsdauer.

### IV.6.3.4 Einfluss von Wartezeitregelungen und Verspätungsaufholen

Diese Messreihe soll bestimmen, welche Parameterwerte für die Wartezeitregelung und das Aufholen von Verspätungen in den nachfolgenden Untersuchungen zu wählen sind. Der Einfluss beider Parameter wurde für verschiedene Verspätungshöhen getestet; Tabelle 16 enthält einige Beispiele für die beobachteten Auswirkungen.

Allgemein impliziert das Weglassen von Restriktionen eine Erweiterung des Lösungsraums eines Problems. Auch hier bewirkt das Weglassen der Restriktion RWZ eine vereinfachte Problemstruktur und damit eine geringere Optimierungsdauer. Ähnliche Ergebnisse ergeben sich für das Aufholen auf der Strecke. Eine Nichtberücksichtigung dieser Restriktion bewirkt ebenfalls bei allen Testläufen eine Reduktion der Optimierungsdauer. Um am System weitere Belastungstests durchzuführen, werden in den nachfolgenden Untersuchungen sowohl die Regelwartezeiten als auch das Aufholen von Verspätungen berücksichtigt; beides war auch die Einstellung in den vorigen Messreihen.

Tabelle 16: Einfluss von Wartezeitregelungen und Verspätungsaufholen

	Hori- zont	Stör- ungen	Passa- gierere	Um- steiger	Verspä- tungs- höhe	RWZ	Auf- holen	Restr.	Var.	davon Integer	Nichtnull- elemente	Optimie- rungs- dauer
Nr.	[Std.]											(MIP in [s])
4 #1	1	5	100	20	5	ja	ja	5125	4211	1243	11493	0,55
4 #2	1	5	100	20	5	nein	ja	5125	4211	1243	11493	0,411
4 #3	1	5	100	20	5	ja	nein	5125	4211	1243	11493	0,57
4 #4	1	5	100	20	5	nein	nein	5125	4211	1243	11493	0,421
4 #5	1	5	100	20	20	ja	ja	5125	4211	1243	11493	65,153
4 #6	1	5	100	20	20	nein	ja	5125	4211	1243	11493	31,765
4 #7	1	5	100	20	20	ja	nein	5125	4211	1243	11493	1,512
4 #8	1	5	100	20	20	nein	nein	5125	4211	1243	11493	1,392
4 #9	1	5	100	20	40	ja	ja	5125	4211	1243	11493	7,491
4 #10	1	5	100	20	40	nein	ja	5125	4211	1243	11493	7,961
4 #11	1	5	100	20	40	ja	nein	5125	4211	1243	11493	6,469
4 #12	1	5	100	20	40	nein	nein	5125	4211	1243	11493	6,008

#### IV.6.3.5 Einfluss von Gewichtungsfaktoren und Mindestaufholzeit

In Tabelle 17 sind die Auswirkungen unterschiedlicher Gewichtungsfaktoren auf die MIP-Optimierungsdauer dargestellt; Tabelle 18 zeigt den Einfluss verschiedener Mindestaufholzeiten auf die Lösungsdauer.

Tabelle 17: Einfluss der Gewichtungsfaktoren

	Hori- zont	Stör- ungen	Passa- gierere	Um- steiger	War- ten am Zug	Warten am Bahn- steig	Restr.	Var.	davon Integer	Nichtnull- elemente	Optimie- rungs- dauer
Nr.	[Std.]										(MIP in [s])
5 #1	1	5	100	20	1	1	5125	4211	1243	11493	65,153
5 #2	1	5	100	20	1	2	5125	4211	1243	11493	27,569
5 #3	1	5	100	20	1	10	5125	4211	1243	11493	23,654
5 #4	1	5	100	20	2	1	5125	4211	1243	11493	7,811
5 #5	1	5	20	20	10	1	5125	4211	1243	11493	5,037
5 #6	1	5	20	20	3	3	5125	4211	1243	11493	54,098

Tabelle 18: Einfluss der Mindestaufholzeit

	Hori- zont	Stör- ungen	Passa- giere	Um- steiger	Aufho- len [Min]	Restr.	Var.	davon Integer	Nichtnull- elemente	Optimierungs- dauer (MIP in [s])
Nr.	[Std.]									
6 #1	1	5	100	20	5	5125	4211	1243	11493	65,153
6 #2	1	5	100	20	4	5125	4211	1243	11493	13,619
6 #3	1	5	100	20	2	5125	4211	1243	11493	8,002
6 #4	1	5	100	20	1	5125	4211	1243	11493	8,403
6 #5	1	5	100	20	6	5125	4211	1243	11493	22,994
6 #6	1	5	100	20	10	5125	4211	1243	11493	7,38

Bei den Gewichtungsfaktoren wird wie erwähnt zwischen „Warten am Gleis“ und „Warten im Zug“ unterschieden. Es zeigt sich, dass jedes Abgehen von einer gleichen Gewichtung beider Wartezeitkategorien die Optimierungsdauer verkürzt. Eine Veränderung beider Parameter auf einen anderen gemeinsamen Wert bewirkt ebenfalls eine geringe Reduktion der Optimierungszeit. Die Begründung liegt offensichtlich darin, dass beide Faktoren in der Zielfunktion enthalten sind. Die einseitige Veränderung des Parameters bewirkt eine schnellere Entscheidung zugunsten des anderen Gewichtungsfaktors bzw. bei der Lösungssuche zu einer sinnvolleren Variablenauswahl für die Lösung. In den Folgeanalysen wird zwecks Belastungsprüfung für beide Gewichtungsfaktoren ein gleicher Wert unterstellt.

Ein ähnliches Ergebnis zeigt sich beim Einfluss der Mindestaufholzeit (vgl. Tabelle 18). Tendenziell gilt: Je weiter die Parameterwerte vom Standardwert 5 abweichen, desto geringer ist die Optimierungsdauer. Eine mögliche Erklärung könnte darin bestehen, dass bei schnellerem oder langsamerem Aufholen einfacher entschieden werden kann, ob es besser ist zu Warten oder nicht: Wenn viel aufgeholt werden kann, kann ein Zug länger warten, falls wenig aufzuholen ist, sollte er schneller losfahren.

#### IV.6.3.6 Auswirkungen des Proportion Passagiere/Umsteiger

Die nun durchgeführten Tests weiten die Untersuchungen in Tabelle 15 auf verschiedene Modellgrößen mit einer unterschiedlichen Anzahl an Störungen aus. Dabei wird gezeigt, dass die Optimierungsdauer bei einer proportionalen Veränderung von Passagieren und Umsteigern gleich bleibt.

Die beobachteten Ergebnisse sind in Tabelle 19 dargestellt. In allen Versuchen beträgt das Passagiere/Umsteiger-Verhältnis 5:1, wobei ein Zeithorizont von einer halben bis zu zwei Stunden betrachtet wird. Bis zu einer Stunde werden die Testläufe mit zehn Störungen durchgeführt, danach mit fünf. Es lässt sich feststellen, dass für die Höhe der Optimierungsdauer nicht die Anzahl der Passagiere oder Umsteiger ausschlaggebend sind. Vielmehr ist augen-

scheinlich das Verhältnis zwischen beiden Parameterwerten der entscheidende Einflussfaktor auf die Dauer; unabhängig von der Modellgröße und der Anzahl der Störungen. Offensichtlich wirkt sich die absolute Anzahl eingestreuter Störungen sehr stark aus, sie wird daher nachfolgend näher betrachtet.

Tabelle 19: Proportionalität Passagiere/Umsteiger

	Horizont	Störungen	Passagiere	Umsteiger	Restr.	Var.	davon Integer	Nichtnull-elemente	Optimierungsdauer
Nr.	[Std.]								(MIP in [s])
7 #1	0,5	10	25	5	2202	1935	491	4895	10,185
7 #2	0,5	10	100	20	2202	1935	491	4895	10,185
7 #3	0,5	10	400	80	2202	1935	491	4895	10,135
7 #4	1	10	25	5	5125	4211	1243	11493	235,469
7 #5	1	10	100	20	5125	4211	1243	11493	238,393
7 #6	1	10	400	80	5125	4211	1243	11493	241,026
7 #7	1,5	5	25	5	8128	6555	1994	18250	40,328
7 #8	1,5	5	100	20	8128	6555	1994	18250	40,508
7 #9	1,5	5	400	80	8128	6555	1994	18250	40,428
7 #10	2	5	25	5	11239	8963	2800	25278	21,18
7 #11	2	5	100	20	11239	8963	2800	25278	21
7 #12	2	5	400	80	11239	8963	2800	25278	21,13

#### IV.6.3.7 Modellverhalten in Abhängigkeit von der Anzahl Störungen

In Tabelle 20 wird das Modellverhalten für 100 Passagier (-gruppen) und 70 Umsteigern dargestellt, weil diese Kombination in Tabelle 15 die höchste Optimierungsdauer benötigte. Zur besseren Beurteilung und Vergleichbarkeit der Ergebnisse werden zwei weitere Testreihen durchgeführt: Tabelle 21 zeigt die Auswirkungen für 100 Passagiere und 20 Umsteiger; Tabelle 22 für 4000 Passagiere und 50 Umsteiger. Bei allen Tests beträgt der Zeithorizont eine halbe Stunde, und die Anzahl der Störungen variiert zwischen 15 und 50. Die einzelnen Testläufe offenbaren ein ambivalentes Modellverhalten. Während zwischen 8#1 und 8#2 in Tabelle 20 die Anzahl der Störungen nur von 15 auf 20 erhöht wird, vertausendfacht sich die Dauer für die MIP-Optimierung. Eine weitere Erhöhung der Anzahl auf 30 in 8#3 zeigt jedoch eine deutliche Reduktion der Optimierungsdauer. Diese Unterschiede lassen sich nur so erklären, dass einige Störungen Folgekonflikte induzieren, die eine größere Auswirkung auf das Bahnnetz haben und somit eine größere Optimierungszeit beanspruchen als andere. Ist

bspw. der Frankfurter Hauptbahnhof betroffen, sind in der Regel gleich mehrere Anschlusszüge involviert. In diesem Versuch ist das Modell bei einer Anzahl von 50 Störungen nicht mehr optimal zu lösen gewesen.

Tabelle 20: Einfluss von Störungen auf die Optimierungsdauer, I

	Horizont	Störungen	Passagiere	Umsteiger	Restr.	Var.	davon Integer	Nichtnull-elemente	Optimierungsdauer
Nr.	[Std.]								(MIP in [s])
8 #1	0,5	15	100	70	2202	1935	491	4895	2,994
8 #2	0,5	20	100	70	2202	1935	491	4895	3320,033
8 #3	0,5	30	100	70	2202	1935	491	4895	462,203
8 #4	0,5	33	100	70	2202	1935	491	4895	41,941
8 #5	0,5	34	100	70	2202	1935	491	4895	152,65
8 #6	0,5	50	100	70	2202	1935	491	4895	-

Tabelle 21 und Tabelle 22 bestätigen diese Erkenntnisse. Die maximale Optimierungsdauer ist in beiden Testreihen ebenfalls bei 20 Störungen zu beobachten. Im Unterschied zu den Tests in Tabelle 20 weisen alle Parametersätze bei einer gleichen Anzahl von Störungen eine geringere Optimierungsdauer auf, was durch das andere Passagier/Umsteiger-Verhältnis zu begründen ist. Anhand Tabelle 15 ist erkennbar, dass bei 70 Umsteigern von 100 Passagieren die benötigte Lösungszeit höher ist; dies wird an dieser Stelle erneut bestätigt. Bei einer Anzahl von 50 Störungen liefert das Modell wiederum keine optimale Lösung.

Tabelle 21: Einfluss von Störungen auf die Optimierungsdauer; II

	Horizont	Störungen	Passagiere	Umsteiger	Restr.	Var.	davon Integer	Nichtnull-elemente	Optimierungsdauer
Nr.	[Std.]								(MIP in [s])
9 #1	0,5	15	100	20	2202	1935	491	4895	2,724
9 #2	0,5	20	100	20	2202	1935	491	4895	1007,229
9 #3	0,5	30	100	20	2202	1935	491	4895	278,18
9 #4	0,5	33	100	20	2202	1935	491	4895	14,461
9 #5	0,5	34	100	20	2202	1935	491	4895	86,354
9 #6	0,5	50	100	20	2202	1935	491	4895	-

Tabelle 22: Einfluss von Störungen auf die Optimierungsdauer; III

	Horizont	Störungen	Passagiere	Umsteiger	Restr.	Var.	davon Integer	Nichtnull-elemente	Optimierungsdauer
Nr.	[Std.]								(MIP in [s])
10 #1	0,5	15	400	50	2202	1935	491	4895	2,464
10 #2	0,5	20	400	50	2202	1935	491	4895	154,211
10 #3	0,5	30	400	50	2202	1935	491	4895	38,495
10 #4	0,5	33	400	50	2202	1935	491	4895	3,566
10 #5	0,5	34	400	50	2202	1935	491	4895	10,746
10 #6	0,5	50	400	50	2202	1935	491	4895	-

#### IV.6.3.8 Modellverhalten in Abhängigkeit von Modellgröße und Störungsanzahl

Bei diesen Optimierungsläufen sollen die Auswirkungen der Modellgröße in Zusammenhang mit den Störungen auf die Optimierungsdauer aufgezeigt werden. Außerdem werden die einzelnen Zeiten in Bezug auf eine Verwendung des Modells im realen Betrieb untersucht.

In den Versuchen wird ein Zeithorizont zwischen 0,5 und 2 Stunden betrachtet. Für jeden Zeitraum werden die Auswirkungen bei unterschiedlichen Anzahlen verspäteter Züge untersucht. Die Anzahl variiert je nach Modellgröße zwischen 5 und 50 Störungen. Im Zug befinden sich 400 Passagiere; von denen 50 umsteigen wollen. Tabelle 23 enthält die einzelnen Beobachtungen der Versuche.

In allen Modellierungszeiträumen zeigt sich wieder, dass mit zunehmender Störungsanzahl auch die Zeitdauer der MIP-Optimierung ansteigt. Bspw. benötigt das Modell für eine optimale Lösung (Zeithorizont = 0,5 Stunden) bei 25 Störungen 86,420 Sekunden und bei 10 Störungen 2,243 Sekunden. Wird allerdings Tabelle 22 berücksichtigt, bestätigt sich diese Abhängigkeit nicht. In 10#2 ist zu erkennen, dass 20 Störungen eine größere Optimierungsdauer induzieren als 25, wobei aber die sonstigen Annahmen beider Testreihen gleich waren. Daraus ist abzuleiten, dass die Optimierungsdauer primär von der Störungsverteilung und nur sekundär von deren Anzahl abhängt. Bis zu einer Anzahl von 25 Störungen ist die Dauer bis zur Lösung sogar für die Echtzeit-Optimierung vertretbar, darüber hinaus ist daran nicht mehr zu denken. Die Ergebnisse zeigen, dass bei einer Anzahl von 20 Störungen die Lösungsdauer durchaus für eine Verwendung des Modells im realen Bahnbetrieb geeignet wäre. Ab 25 Störungen und einer Modellierungszeit von einer Stunde liefert das Modell im Beispiel jedoch keine optimale Lösung für die MIP-Optimierung mehr. Auch scheint sich wiederum die *Störungsverteilung* auszuwirken. Alles in allem ist es demnach durchaus sinnvoll, innerhalb begrenzter Realitätsausschnitte die Lösung des mathematischen Modells zu versuchen. In jedem Fall sollte jedoch eine Verfahrensalternative zur Verfügung stehen, falls die Optimierung zu keinem Ergebnis führt.

Tabelle 23: Einfluss von Modellgröße und Störungen auf die Optimierungsdauer

	Hori- zont	Stör- ungen	Passa- giere	Um- steiger	Restr.	Var.	davon Integer	Nichtnull- elemente	Optimierungs- dauer
Nr.	[Std.]								(MIP in [s])
11 #1	0,5	10	400	50	2202	1935	491	4895	2,243
11 #2	0,5	25	400	50	2202	1935	491	4895	86,42
11 #3	0,5	45	400	50	2202	1935	491	4895	2805,635
11 #4	0,5	50	400	50	2202	1935	491	4895	-
11 #5	1	5	400	50	5125	4211	1243	11493	8,712
11 #6	1	10	400	50	5125	4211	1243	11493	33,929
11 #7	1	15	400	50	5125	4211	1243	11493	-
11 #8	1	20	400	50	5125	4211	1243	11493	184,786
11 #9	1	25	400	50	5125	4211	1243	11493	-
11 #10	1,5	5	400	50	8128	6555	1994	18250	26,688
11 #11	1,5	10	400	50	8128	6555	1994	18250	13,219
11 #12	1,5	15	400	50	8128	6555	1994	18250	202,021
11 #13	1,5	20	400	50	8128	6555	1994	18250	273,793
11 #14	1,5	25	400	50	8128	6555	1994	18250	-
11 #15	2	5	400	50	11239	8963	2800	25278	21,381
11 #16	2	10	400	50	11239	8963	2800	25278	21,66
11 #17	2	15	400	50	11239	8963	2800	25278	261,065
11 #18	2	20	400	50	11239	8963	2800	25278	-

## IV.7 Offline-Analyse mittels mathematischer Optimierung

Nachdem gezeigt wurde, auf welche Weise die mathematische Optimierung als Online-Algorithmus Verwendung finden kann, soll nun die Offline-Variante zur Bewertung von Dispositionsstrategien herangezogen werden. Dazu sind einige Anpassungen vonnöten, die nachfolgend beschrieben werden. Die Implementierung dieses Modells erfolgt analog der Online-Version, sodass sie hier nicht weiter beschrieben wird. Ergebnisse einiger Experimente zur Bewertung einfacher Dispositionsheuristiken bilden den Abschluss dieses Abschnitts.

## IV.7.1 Anpassung des mathematischen Modells

Im Vergleich zu dem in Abschnitt IV.6.1 vorgestellten Modell ändert sich in der Offline-Version wenig; im Prinzip ist lediglich die Zielfunktion anzupassen:

Es ist bei einem längeren Betrachtungszeitraum nicht sinnvoll, die sich in einem Zug befindlichen verspäteten Passagiere an jedem Bahnhof erneut als verspätet zu bewerten, sodass jetzt nur die wirklich ankommenden Passagiere  $an_{i,j}$  mit ihren ungeplanten Verspätungsminuten  $an_{i,j} \cdot (T_{i,j}^{An} - t_{i,j}^{An})$  einzubeziehen.

In den entsprechenden Kostenfunktionen aus Abschnitt IV.6.1 sind demnach lediglich die Parameter  $in_{i,j}$  durch die entsprechenden  $an_{i,j}$  zu ersetzen, um ein mit den Online-Strategien besser vergleichbares Ergebnis zu erzielen.

## IV.7.2 Ergebnisse der Experimentation

### IV.7.2.1 Simulationsparameter

Für die Offline-Analyse wurde eine Reihe von Experimenten durchgeführt, bei denen die folgenden Parameter verändert wurden

- Untersuchungszeitraum
- Dispositionsstrategie (nur Online Disposition) und
- Taktzeit

*Untersuchungszeitraum:* Es wurden Untersuchungszeiträume mit der Länge von einer bis zwei Stunden ausgewählt, da diese Zeiträume groß genug sind, um aussagekräftige Ergebnisse zu liefern. Die Tabelle 24 zeigt die Größen von Modellen mit unterschiedlich langem Zeithorizont.

Als Eingabedaten für die mathematische Optimierung wurden die wie in Abschnitt III.2.2.1.1 beschriebenen generierten Passagierrouen und Verspätungen kleineren Ausmaßes für einen Fahrplantage verwendet.

Damit die Simulation mit höchster Wahrscheinlichkeit eingeschungen ist, wurden Untersuchungen für die Zeiträume zwischen 15 und 16 Uhr, 20 und 21 Uhr sowie von 20 und 22 Uhr durchgeführt.

*Dispositionsstrategie:* Als Dispositionsstrategien zum Benchmark wurden zwei der in Abschnitt IV.4 vorgestellten und untersuchten Strategien angewendet. Bei beiden wird die Dispositionsentscheidung anhand von Passagierverhältnissen getroffen, und beide erzielen relativ gute Ergebnisse. Bei *Strategie 13* wartet ein Zug auf sämtliche Zubringer, in denen sich Umsteiger befinden, wenn die Summe der Umsteiger aller verspäteten Züge mindestens  $q \cdot 100$  % der im abfahrereiten Zug anwesenden Passagiere darstellt. Bei *Strategie 16* wartet ein Zug auf einen verspäteten Zubringer, sofern die Anzahl deren Umsteiger mindestens  $q \cdot 100$  % der Reisenden im wartenden Zug zzgl. Der bereits wartenden Zustieger an Folgebahnhöfen übersteigt.

Tabelle 24: Modellgrößen

<b>Zeitraum von</b>	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
<b>bis</b>	9.00	9.00	10.00	14.00	20.00
<b>Länge</b>	1 h	1 h	2 h	6 h	12 h
<b>Regelwartezeiten</b> <sup>179</sup>	aus	ein	aus	aus	aus
<b>Züge</b>	3010	3010	4439	10121	18115
<b>Zugstationen</b>	19261	19261	38048	112994	219810
<b>Zubringer</b>	11899	11899	30886	108598	206380
<b>Verspätungen</b>	450	450	1022	3712	8406
<b>Strukturvariablen</b>	185248	185248	373318	1125544	2184670
<b>davon binär</b>	69682	69682	145030	447580	865810
<b>Restriktionen</b>	194137	206036	399765	1224041	2372935
<b>Nichtnullelemente</b>	566160	589958	1165686	3569190	6917110

Beide Strategien wurden gewählt, da sie gute Ergebnisse bezüglich des Laufzeitverhaltens, der Ankunftspünktlichkeit, der Gesamtverspätungen der Passagiere und bei den gewichteten Passagierwartezeiten erzielt haben. Das Vorgehen zum Benchmark beliebiger anderer Strategien ist jedoch auf alle anderen Strategien übertragbar.

Zum Vergleich werden auch die beiden Strategien mit allgemeineren Wartevorgaben (Globale Regelwartezeiten [RWZ], Niemals Warten), welche sich im realen Einsatz oder zumindest im Praxistest befinden, herangezogen. Alle vier Strategien gehören zur Klasse der deterministischen Online-Algorithmen.

*Taktzeit:* Die Taktzeit ist die Wartezeit, die ein Passagier zusätzlich erhält, falls er seinen Anschluss verpasst. Es werden Untersuchungen für Taktzeiten von 60 Minuten und 24 Minuten durchgeführt. Die Taktzeit von 60 Minuten entspricht der Zeit, die ein Passagier oftmals auf den nächsten *vergleichbaren* Zug in derselben Richtung warten muss. Der Taktzeit von 24 Minuten liegt die Überlegung zu Grunde, dass ein Passagier nicht auf den nächsten Zug derselben Linie warten wird, sondern vielmehr eine andere Route wählt, um seine persönliche Verspätung zu minimieren.

<sup>179</sup> Die Anzahl der Restriktionen erhöht sich bei Beachtung der Regelwartezeiten um die Anzahl der Anschlüsse, die Anzahl der Nichtnullelemente erhöht sich um die zweifache Anzahl der Anschlüsse.

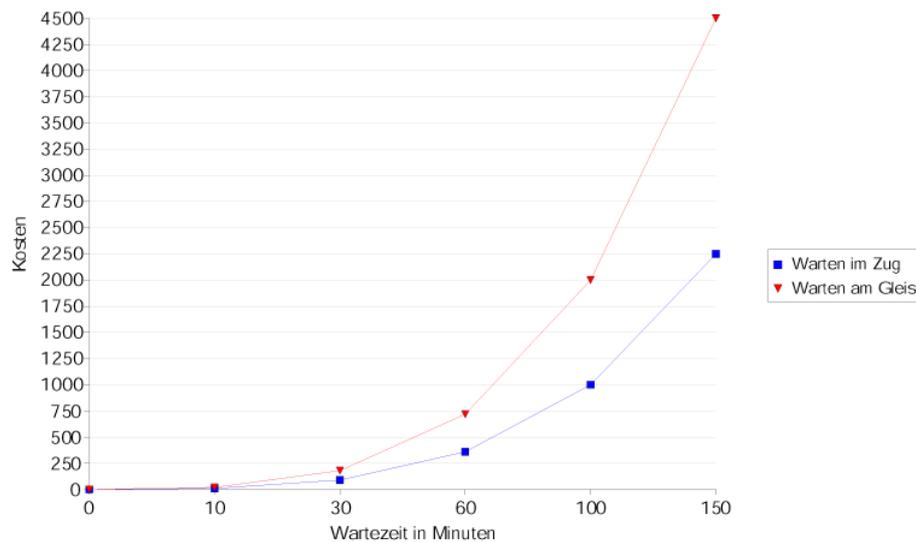


Abbildung 46: Kostenfunktionen

Die Taktzeit hat bei den ausgewählten Dispositionsstrategien keinen Einfluss auf die Dispositionsentscheidung; sie wird lediglich zur Berechnung der Passagierwarteminuten für Passagiere, die ihren Anschluss verpasst haben, benutzt. Daher können die Auswirkungen unterschiedlicher Taktzeiten auf das Ergebnis der Online-Disposition ohne zusätzliche Simulation rein rechnerisch ermittelt werden.

Die in der Dispositionskomponente des Simulators implementierten Kostenfunktionen eignen sich aufgrund ihrer Nichtlinearität allerdings nicht für die Verwendung in dem hier vorgestellten Modell, sodass nun auch während der Simulation dieselbe stückweise lineare Kostenfunktion wie bei der Offline-Analyse (s. u.) verwendet wird, wodurch auch die Vergleichbarkeit der Ergebnisse erhöht wird.

#### IV.7.2.2 Bewertungskriterium

Als Bewertungskriterium für den Vergleich der Ergebnisse der Online Disposition mit denen der Offline-Analyse wurden wiederum die gewichteten ungeplanten Passagierwarteminuten herangezogen. Als Gewichtungsfunktion wurde eine stückweise lineare Funktion mit den Eckpunkten (0, 0), (10, 10), (30, 90), (60, 360), (100, 1000) und (150, 2250) verwendet. Die Kurve wird mit der Steigung des letzten Abschnittes bis zur Unendlichkeit verlängert. Die Wartezeit, die durch das Verpassen eines Anschlusses (Warten am Gleis) entsteht, wurde zusätzlich mit dem Faktor 2 gewichtet. Der Verlauf der Kostenfunktionen für das Warten im Zug und das Warten am Gleis wird in Abbildung 46 graphisch veranschaulicht.

#### IV.7.2.3 Simulation der Online-Disposition

Es werden mehrere Simulationen mit unterschiedlichen Parametersätzen durchgeführt (s. Tabelle 25). Die gewichteten Passagierwarteminuten für unterschiedliche Taktzeiten lassen sich rechnerisch aus den Simulationsergebnissen ermitteln.

Jede Simulation wird mit einer Einschwingphase von vier Stunden durchgeführt, damit die Züge zu Beginn des Betrachtungszeitraums mit Passagieren mit hoher Wahrscheinlichkeit vollständig gefüllt sind.

Tabelle 25: Parameter der Simulation

Parametersatz	1.1.x	1.2.x	1.3.x	1.4.x	2.1.x	2.2.x	2.3.x	2.4.x
Zeitraum	15 – 16 Uhr				20 – 21 Uhr			
Strategie	13	16	RWZ	Nie Warten	13	16	RWZ	Nie Warten
Quote	0,7	0,3	-	-	0,7	0,3	-	-
Taktzeit	jeweils 24 bzw. 60 Minuten							
Laufzeit [Minuten]	138	133	140	138	120	122	127	120

Die Simulation wird ohne den Einsatz des Passagierrouters durchgeführt, um eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit den Ergebnissen der Offline-Analyse zu gewährleisten. Dies unterschätzt letztlich zwar die maximale Qualität der eingesetzten Online-Strategien, ist aber aufgrund extrem groß werdender mathematischer Modelle bei inhärenter Berücksichtigung des Re-Routing von Passagieren notwendig. Für die Passagiere, die einen Anschluss verpassen, wird deswegen eine zusätzliche Verspätung in Höhe der Taktzeit angenommen.

#### IV.7.2.4 Offline-Analyse

Für die Offline-Analyse werden Modelle mit verschiedenen Parametersätzen, die in Tabelle 26 dargestellt sind, generiert und gelöst. Dabei werden Parameter gewählt, die möglichst genau den Einstellungen der Simulation entsprechen. Regelwartezeiten werden bei der Offline-Analyse nicht beachtet, da sie den Lösungsraum für die Optimierung unnötig einschränken.

Da für die Offline-Optimierung dieselben zufällig generierten Verspätungen wie für die Simulation verwendet werden konnten, kann der Offline-Algorithmus als *diffuse adversary* (vgl. Abschnitt II.4.2) betrachtet werden.

Die Optimierungsmodelle wurden mit dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Optimierungssystem erzeugt, in das MPS-Format exportiert und mit dem mathematischen Optimierer CPLEX gelöst. Alle Optimierungsläufe wurden auf einem Dualprozessorsystem mit zwei 2,2 GHz Intel Xeon Prozessoren und insgesamt 4 GB Arbeitsspeicher durchgeführt.

Tabelle 26: Parameter der Offline-Analyse

Parametersatz	1.x.1	1.x.2	2.x.1	2.x.2	3.x.1	3.x.2
Zeitraum	15.00 – 16.00 Uhr		20.00 – 21.00 Uhr		20.00 – 22.00 Uhr	
Taktzeit	24 min	60 min	24 min	60 min	24 min	60 min
Generierung	6,58 s	5,63 s	6,02 s	4,07 s	9,45 s	7,77 s
Lösungszeit	23,89 s	18,62 s	591,53 s	94,31 s	11798,98 s	11468,13 s

### IV.7.2.5 Auswertung

#### IV.7.2.5.1 Parameterkalibrierung

Zunächst wird der in beiden Strategien enthaltene Parameter  $q$  auf einen in dieser Konfiguration guten Wert gesetzt, um beide Strategien testen zu können. Um Aussagen über die Auswirkung von  $q$  auf beide Strategien treffen zu können, werden für diese Strategien innerhalb des betrachteten Szenarios zunächst Sensitivitätsanalysen vorgenommen.

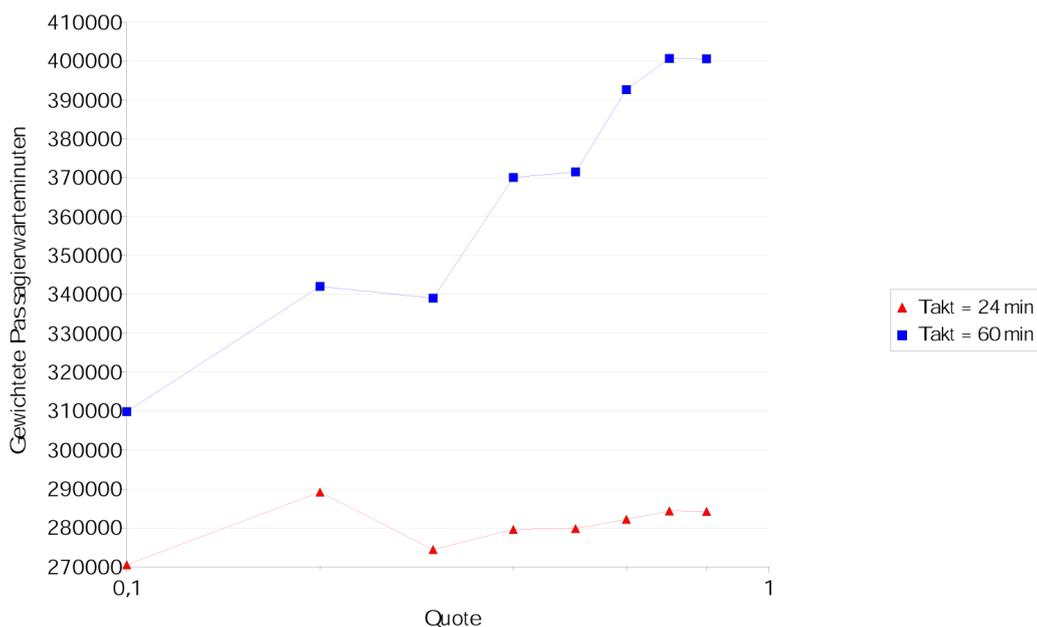


Abbildung 47: Verhalten der Strategie 13 für verschiedene Parameter  $q$  im Zeitraum 1

*Strategie 13:* Für  $q$  lassen sich beliebige positive Werte einsetzen. Ist  $q = 0$ , warten sämtliche Züge immer auf ihre Zubringer; wählt man für  $q$  ausreichend große Werte, warten Züge grundsätzlich nicht auf verspätete Zubringer. Die gewichteten Passagierwarteminuten, die aufgrund verpasster Anschlüsse entstehen, werden also mit höheren Werten für  $q$  steigen, während die gewichteten Passagierwarteminuten, die durch verspätete Züge entstehen, mit steigenden Werten für  $q$  fallen werden.

Es ist anzunehmen, dass die Summe dieser beiden gegenläufigen Funktionen einen in etwa u-förmigen Verlauf der gesamten Kostenfunktion impliziert.

Die erste Sensitivitätsanalyse wurde für den Zeitraum 1 (von 15.00 bis 16.00 Uhr, 1 Stunde) durchgeführt. Das Ergebnis dieser Analyse für Taktzeiten von 24 und 60 Minuten zeigt das Diagramm in Abbildung 47.  $q$  ist auf einer logarithmischen Skala abgetragen.

Die beiden Graphen zeigen allerdings nur zwischen  $q = 0,2$  und  $q = 0,8$  annähernd den erwarteten Verlauf. Die abfallenden Werte für  $q < 0,2$  lassen sich jedoch nicht ausreichend durch die oben angesprochene Überlagerung der beiden Teilfunktionen erklären. An dieser Stelle wirkt sich anscheinend die kurze Laufzeit von einer Stunde aus, wodurch Sekundärverspätungen nicht ausreichend zu berücksichtigen sind.

Deswegen ist es in diesem Fall günstiger als bei einem längeren Betrachtungszeitraum, auf verspätete Zubringer zu warten. Dieser Effekt wirkt sich bei einer Taktzeit von 60 Minuten natürlich noch stärker aus als bei einer Taktzeit von 24 Minuten, da in diesem Fall Passagiere ohne Anschluss ohnehin schon stärker negativ bewertet werden.

Für die zweite Messreihe wurde deswegen ein längerer Untersuchungszeitraum von zwei Stunden verwendet (Zeitraum 3, 20.00 bis 22.00 Uhr). Die Ergebnisse dieser Experimente werden in Abbildung 48 dargestellt. Der Graph für die Taktzeit von 60 Minuten weist jetzt deutlich erkennbar eine U-Form auf. Das Minimum wird bei einem Wert von  $q = 1,1$  erreicht, zwischen  $q = 1,0$  und  $q = 3,0$  liegen die Werte nur maximal um 1 % höher als das Minimum. Der waagerechte Verlauf der Kurve für  $q > 6$  lässt darauf schließen, dass sich die untersuchte Dispositionsstrategie *in diesem Szenario* und *ab diesem Wert* wie die Strategie „Niemals Warten“ verhält.

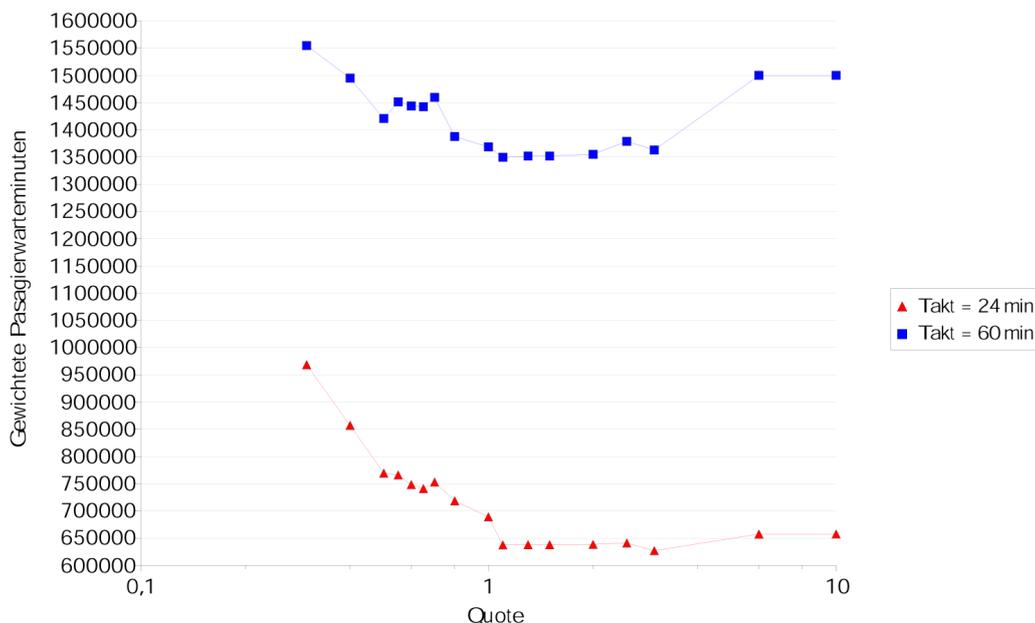


Abbildung 48: Verhalten der Strategie 13 für verschiedene Parameter  $q$  im Zeitraum 3

Bei der Kurve für die Taktzeit 24 Minuten ist die U-Form zwar nicht so stark ausgeprägt wie bei der Kurve für die Taktzeit 60 Minuten, sie ist aber trotzdem erkennbar. Das Minimum liegt hier bei einem Wert von  $q = 3$ .

Tabelle 27: Ergebnisse für Strategie 13 bei wechselndem  $q$  in Zeitraum 1

Quote	Passagiere ohne Anschluss	gewichtete PWM ohne Berücksichtigung der verpassten Anschlüsse	gewichtete PWM bei Takt	
			24 Minuten	60 Minuten
0,1	67	261641	270485	309881
0,2	90	277289	289169	342089
0,3	110	259883	274403	339083
0,4	154	259262	279590	370142
0,5	156	259216	279808	371536
0,6	188	257369	282185	392729
0,7	198	258188	284324	400748
0,8	198	258085	284221	400645

Nicht nur das Minimum, sondern die gesamte Kurve hat sich nach rechts in Richtung der höheren Quoten verschoben. Diese Beobachtung verdeutlicht den Einfluss der angenommenen Taktzeit auf die zu wählende Quote: je größer die Taktzeit ist, desto kleiner sollte die Quote gewählt werden. Dieser Zusammenhang erscheint plausibel, da bei einer niedrigeren Quote weniger Passagiere ihren Anschluss verpassen und dadurch eine Wartezeit in Höhe der Taktzeit erhalten (vgl. Tabelle 27 und Tabelle 28).

Tabelle 28: Ergebnisse für Strategie 13 bei wechselndem  $q$  in Zeitraum 1

Quote	Passagiere ohne Anschluss	gewichtete PWM ohne Berücksichtigung verpasster Anschlüsse	gewichtete PWM bei Takt	
			24 Minuten	60 Minuten
0,3	997	884	968488	1554724
0,4	85	866	857086	1495066
0,5	108	946	769202	1420706
0,55	166	893	765805	1451413
0,6	183	39	748195	1443799
0,65	193	547	741023	1442507
0,7	202	199	752863	1459639
0,8	138	199	718415	1387559

1	156	249	688841	1368569
1,1	211	488	637340	1349408
1,3	214	624	637872	1351704
1,5	214	661	637909	1351741
2	219	320	638228	1355000
2,5	255	264	640924	1378864
3	252	558	626822	1362998
6	433	169	657325	1499929
10	433	184	657340	1499944

*Strategie 16:* Auch bei Strategie 16 wird zunächst ein besserer Wert des Parameters  $q$  unter den gegebenen Voraussetzungen gesucht. Für  $q$  sind wieder beliebige positive Werte zulässig; ebenso wie bei Strategie 13 bedeuten kleinere Werte für  $q$ , dass die Anschlüsse häufiger bzw. immer (bei  $q = 0$ ) auf verspätete Züge warten, während bei größerem  $q$  seltener oder gar nicht mehr gewartet wird. Es ist also wieder mit einem u-förmigen Verlauf des Graphen zu rechnen.

Tabelle 29: Ergebnisse für Strategie 16 bei wechselndem  $q$  in Zeitraum 3

		gewichtete PWM ohne Berücksichtigung verpasster Anschlüsse	gewichtete PWM bei Takt	
Quote	Passagiere ohne Anschluss		24 Minuten	60 Minuten
0,1	979	1273784	403012	1978664
0,15	895	813808	931948	1458208
0,25	992	560851	691795	1275091
0,3	983	560142	689898	1267902
0,4	042	537544	675088	1287784
0,5	169	476827	631135	1318507
0,6	171	475146	629718	1318266
0,7	208	474934	634390	1344694
0,8	208	474692	634148	1344452
1,0	374	468913	650281	1458193
1,5	374	468779	650147	1458059

Die Tabelle 29 zeigt die Ergebnisse der Experimente, die in Abbildung 49 graphisch veranschaulicht werden. Dort ist bei einer angenommenen Taktzeit von 60 Minuten deutlich die erwartete U-Form zu erkennen; bei einer Taktzeit von 24 Minuten ist sie weniger stark ausgeprägt, aber trotzdem vorhanden. Am rechten Rand zeigen die Kurven einen konstanten Verlauf, was darauf zurückzuführen ist, dass für  $q > 1$  derselbe Effekt wie bei der Strategie „Niemals Warten“ erzielt wird.

Der Unterschied zwischen der Strategie „Niemals Warten“ und dem optimalen Ergebnis der Strategie 16 fällt, wie zu erwarten, bei der Taktzeit 24 Minuten deutlich geringer aus als bei der höheren Taktzeit von 60 Minuten. Ein guter Wert für  $q$  bei einer Taktzeit von 60 Minuten liegt bei  $q = 0,3$ , bei der Taktzeit 24 Minuten liegt er dagegen bei  $q = 1$ .

Diese Ergebnisse bestätigen auch die Ergebnisse der Untersuchung von Strategie 13: Die Taktzeit hat erheblichen Einfluss auf die Güte einer Dispositionsstrategie. Anders formuliert, muss bei der Auswahl einer geeigneten Dispositionsstrategie die Taktzeit (bzw. die Verspätung, die ein Passagier durch einen verpassten Anschluss erhält) unbedingt berücksichtigt werden. Somit ist belegt, dass die kundenorientierte Disposition für Zugtypen mit hoher Taktung nicht unbedingt relevant ist.

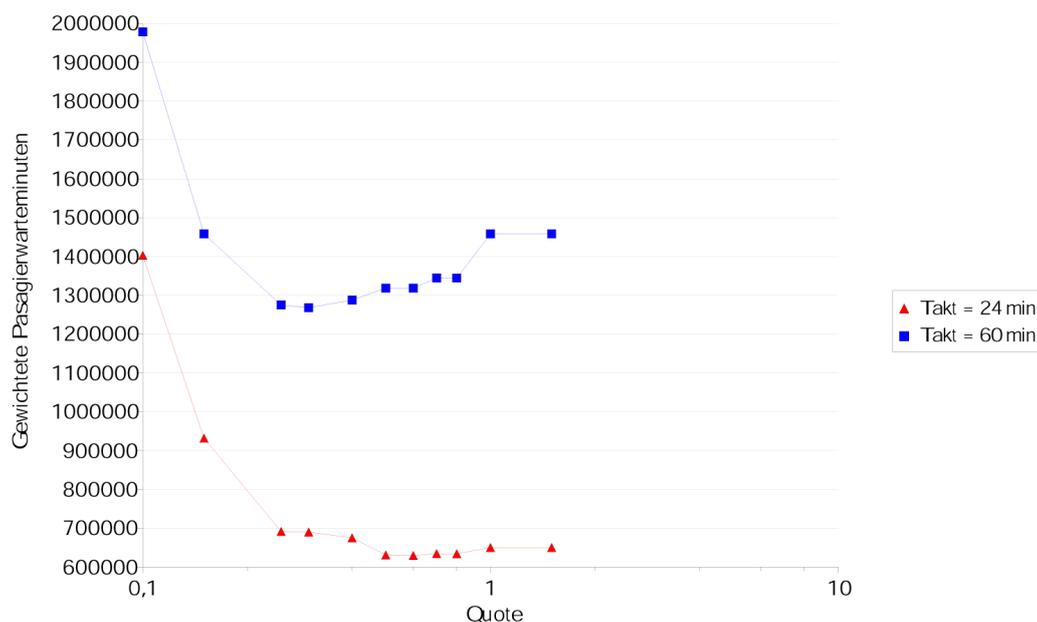


Abbildung 49: Verhalten der Strategie 16 bei wechselndem  $q$  (Zeitraum 3)

#### IV.7.2.5.2 Vergleich von Online- und Offline-Disposition

Für den Vergleich Online/Offline wurden für die Strategien 13 und 16 Quoten  $q$  gewählt, bei denen aufgrund der durchgeführten Sensitivitätsanalysen ein gutes Ergebnis zu erwarten ist; erwartungsgemäß liefert die Offline-Analyse die besten Ergebnisse.

Tabelle 30: Ergebnisse (Zeitraum 1)

Strategie	13	16	RWZ	Niemals Warten	Offline- Analyse
	(q=0,3)	(q=0,3)			
<b>Gewichtete Passagierwarteminuten</b>					
<b>Takt = 24 min</b>	274403	278711	316941	284315	184650
<b>Takt = 60 min</b>	339083	367499	430425	400739	186643
<b>Abweichung vom Optimum</b>					
<b>Takt = 24 min</b>	48,61 %	50,94 %	71,64 %	53,98 %	-
<b>Takt = 60 min</b>	81,67 %	96,90 %	130,61 %	114,71 %	-
<b>Passagiere ohne Anschluss</b>	110	151	193	198	-

Insgesamt wurden drei Versuchsreihen für die drei genannten unterschiedlichen Untersuchungszeiträume durchgeführt:

*Versuchsreihe 1:* In Abbildung 50 sind die Ergebnisse für den Zeitraum 1 (15.00 bis 16.00 Uhr) dargestellt. Für jede untersuchte Dispositionsstrategie (und die Offline-Analyse) zeigen jeweils zwei Balken die gewichteten Passagierwarteminuten für die Taktzeiten 24 und 60 Minuten (zugehörige Zahlenwerte s. Tabelle 30) in der zusätzlich noch die Anzahl der Passagiere, die ihren Anschluss verpasst haben, sowie die prozentuale Abweichung der Ergebnisse von der optimalen Lösung der Offline-Analyse aufgeführt sind.

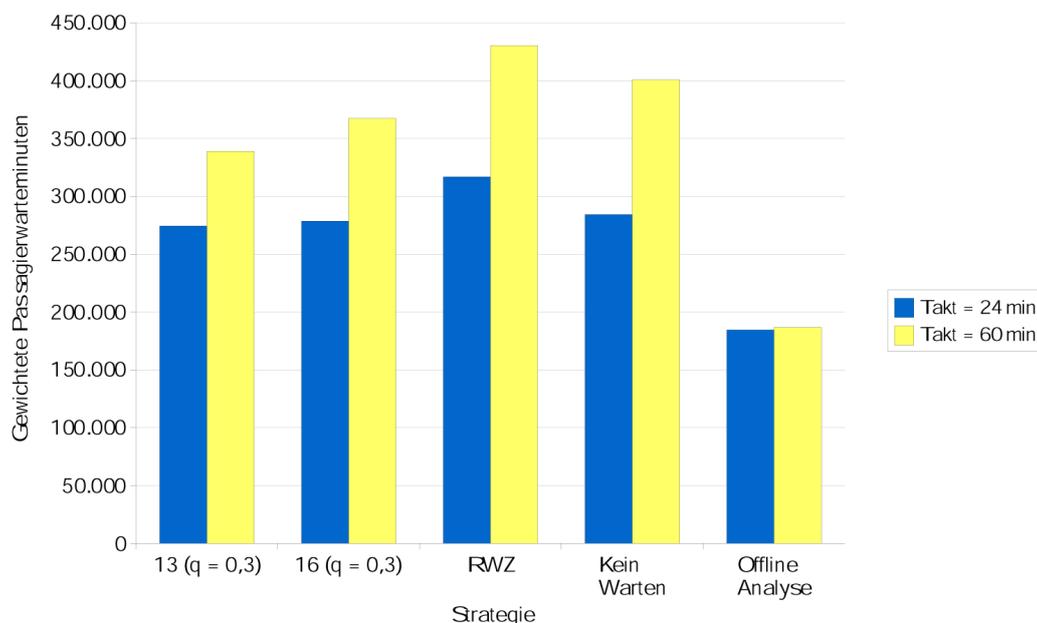


Abbildung 50: Vergleich zwischen Online- und Offline-Disposition (Zeitraum 1)

Im Diagramm ist deutlich erkennen, dass die untersuchten Dispositionsstrategien bei der größeren Taktzeit von 60 Minuten im Vergleich zur Offline-Disposition deutlich schlechtere Ergebnisse liefern als bei einer Taktzeit von 24 Minuten. Während bei der kleineren Taktzeit die Ergebnisse der Online Disposition 49 % bis 72 % von der optimalen Lösung abweichen, sind es bei der größeren Taktzeit 82 % bis 131 %. Die Dispositionsstrategien, die die Warteentscheidung aufgrund von Passagierinformation treffen, erzielen dabei signifikant bessere Ergebnisse als die globalen Wartevorgaben.

*Versuchsreihe 2:* Die Ergebnisse der Versuchsreihe für den Zeitraum 2 (20.00 bis 21.00 Uhr) sind in Tabelle 31 wiedergegeben und in Abbildung 51 visualisiert.

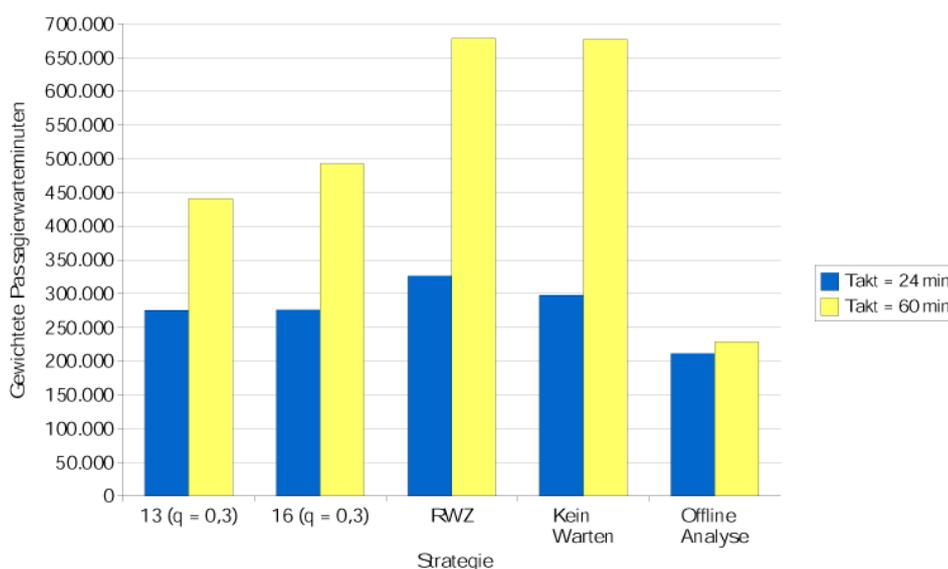


Abbildung 51: Vergleich zwischen Online- und Offline-Disposition (Zeitraum 2)

Tabelle 31: Ergebnisse (Zeitraum 2)

Strategie	13	16	RWZ	Niemals Warten	Offline-Analyse
	(q=0,3)	(q=0,3)			
<b>Gewichtete Passagierwarteminuten</b>					
Takt = 24 min	275371	275566	325968	297536	210977
Takt = 60 min	440599	492538	678180	676796	228383
<b>Abweichung vom Optimum</b>					
Takt = 24 min	30,52 %	30,61 %	54,50 %	41,03 %	-
Takt = 60 min	92,92 %	115,66 %	196,95 %	196,34 %	-
Passagiere ohne Anschluss	281	369	599	645	-

Die im ersten Experiment gemachten Beobachtungen werden durch die zweite Untersuchung bestätigt: Zum einen verschlechtern sich die Ergebnisse aller Strategien bei größerer

Taktzeit stärker als die Ergebnisse der Offline-Analyse. Bei 24 Minuten Taktzeit liegen die gewichteten Passagierwarteminuten der Offline-Disposition zwischen 31 % und 55 % über denen der Offline-Optimierung; bei 60 Minuten Taktzeit beträgt die Verschlechterung schon 93 bis 197 %. Zum anderen treten die Unterschiede zwischen den Strategien mit lokalen und globalen Warteregeln noch stärker hervor. Dies ist vermutlich auf die insgesamt höhere Anzahl von Passagieren in diesem Experiment zurückzuführen.

*Versuchsreihe 3:* In einer dritten Versuchsreihe (vgl. Tabelle 32 bzw. Abbildung 52) wurden die Experimente über einen größeren Untersuchungszeitraum von 2 Stunden durchgeführt. In dieser Versuchsreihe können die vier Dispositionsstrategien bei einer Taktzeit von 24 Minuten sehr gute Ergebnisse im Vergleich zur Offline-Analyse aufweisen; die Abweichungen liegen hier lediglich bei 7 % bis 19 %. Betrachtet man allerdings die Ergebnisse für die Taktzeit 60 Minuten, stellt sich die Situation wieder ganz anders dar: Die Strategien, die Passagierverhältnisse berücksichtigen, führen zu 76 % bzw. 87 % mehr gewichteten Passagierwarteminuten als die optimale Lösung, bei den Strategien mit globalen Regelsystemen sind es dagegen etwa um 108 %.

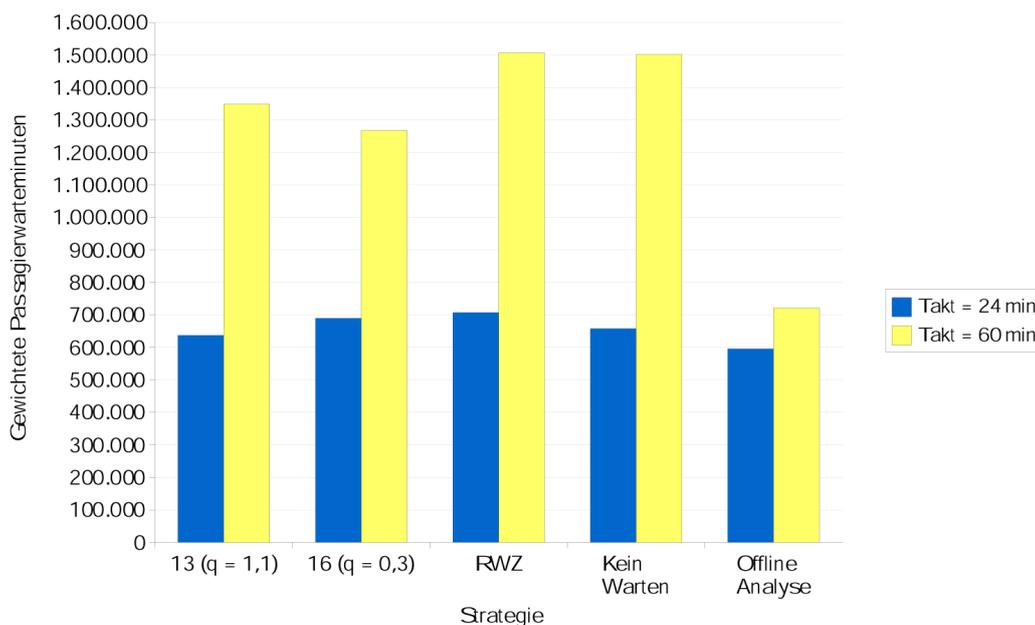


Abbildung 52: Vergleich zwischen Online- und Offline-Disposition (Zeitraum 3)

Es fällt insgesamt auf, dass sich die Strategien „Regelwartezeiten“ und „Niemals Warten“ bei den verursachten gewichteten Passagierwarteminuten kaum unterscheiden, obwohl bei der Strategie „Regelwartezeiten“ die Anzahl der Passagiere ohne Anschluss verkleinert wird. Dies mag sich vermutlich aufgrund des insgesamt relativ kurzen Betrachtungszeitraums und der hohen Taktung in dieser Konfiguration nicht weiter auswirken.

Tabelle 32: Ergebnisse (Zeitraum 3)

<b>Strategie</b>	<b>13</b>	<b>16</b>	<b>RWZ</b>	<b>Niemals Warten</b>	<b>Offline-Analyse</b>
	<b>(q=1,1)</b>	<b>(q=0,3)</b>			
<b>Gewichtete Passagierwarteminuten</b>					
<b>Takt = 24 min</b>	637340	689898	707413	657848	595813
<b>Takt = 60 min</b>	1349408	1267902	1507093	1502216	721502
<b>Abweichung vom Optimum</b>					
<b>Takt = 24 min</b>	6,97 %	15,79 %	18,73 %	10,41 %	-
<b>Takt = 60 min</b>	87,03 %	75,73 %	108,88 %	108,21 %	-
<b>Passagiere ohne Anschluss</b>	1211	983	1360	1436	-



## V Kundenseitige Informations- und Kommunikationsprozesse der kundenorientierten Disposition

*Die wahre Kunst der Kommunikation liegt darin, nicht nur das Richtige am richtigen Ort zur richtigen Zeit zu sagen, sondern das Falsche im verlockenden Augenblick ungesagt zu lassen.*

Dorothy Nevel

Der letzte wichtige Baustein kundenorientierter Disposition ist gleichzeitig Protagonist derselben: der Passagier. Dabei ist die letzte zu klärende Voraussetzung, die gleichzeitig Anforderungen an das zu konzipierende System darstellt, die prinzipielle Erfassbarkeit, Erreichbarkeit, Steuerbarkeit und Beeinflussbarkeit des Reisenden selber. Wie bereits erwähnt können Kunden in Bahnhöfen und Zügen über Reiseverzögerungen informiert werden, aber die spezifischen Interessen und das Verhalten eines Kunden während der Fahrt sind für den Disponenten nicht verfügbar. Wenn aber die These verfolgt wird, dass sich dies mittels verfügbarer und verbreiteter Information- und Kommunikationstechnologie ändern lässt, muss ein Reisender auf seiner Fahrt direkt erreicht werden können – egal, wo er sich gerade befindet.

Wie gesehen, können Züge zum großen Teil bereits heute automatisiert erfasst werden; die so erhobenen Daten bilden die Grundlage für das RIS der Deutschen Bahn AG und werden stetig weiter verbessert, bis irgendwann alle Züge satellitengestützt erfasst werden. Mit weitaus mehr Problemen sind Erfassung, Verfolgung und Interaktion mit Passagieren im Bahnsystem *während der Reise*<sup>180</sup> behaftet:

- Die Zahl an Passagieren ist weitaus größer als die von Zügen und relativ stark schwankend. Diesem Umstand ist Rechnung zu tragen durch effiziente Methoden zur kundenorientierten Disposition, skalierbare Rechnerarchitekturen, die flexibel auf Schwankungen reagieren können und intelligente Verteilungsmechanismen. Das in den vorigen Kapiteln dargelegte System kann dies leisten.
- Die Kommunikationsmöglichkeiten mit Passagieren richten sich nach der jeweils verfügbaren Technologie, und Ortungstechnologien sind nur begrenzt verfügbar. Kommunikationsschnittstellen müssen demnach flexibel genug gestaltet werden, um rasch technische Neuerungen und wachsende Möglichkeiten integrieren zu können.
- Datenschutzrechtliche Aspekte werden bei der Erfassung von Reisedaten eine Rolle spielen. Aller Voraussicht nach werden nie *alle* Reisenden einer Erfassung zustimmen; diese muss freiwillig geschehen und darf kein Zwang sein.

Um mit den Reisenden während der Fahrt kommunizieren zu können bzw. mit ihnen zu interagieren, müssen zwei Voraussetzungen zwingend erfüllt sein:

---

<sup>180</sup> Vor der Reise ist, wie bereits in Kapitel 1 gesehen, jegliche Interaktion mit dem Passagier möglich, sei es am Schalter oder per Internet.

- *Technologische Erreichbarkeit*: Es müssen mobile Endgeräte vorhanden sein, die zur Interaktion genutzt werden können. Im einfachsten Fall können dann auf ein Gerät personalisierte Informationen übertragen werden, die ein Kunde nutzt – oder nicht. Besser wären Geräte, die eine echte Interaktion unterstützen, die also dem Kunden die Möglichkeit zur Antwort auf eine Information ermöglichen. Idealerweise können Kunden automatisiert geortet und somit ganz im Stile eines Navigationssystems im Automobil durch das Netz gesteuert werden<sup>181</sup>.
- *Ausreichende Marktdurchdringung*: Die Geräte müssen nicht nur verfügbar, sondern auch *weit verbreitet* sein, damit möglichst schnell eine kritische Anzahl von Reisenden einen Dienst wie die kundenorientierte Disposition nutzen *können*.<sup>182</sup>

Der Verdacht liegt nahe, dass heutzutage fast jeder Bahnreisende zumindest ein Mobiltelefon besitzt: Der „Handy-Boom“ gegen Ende der 90-er Jahre belegte eindrucksvoll, dass ein starkes Bedürfnis nach mobiler Kommunikation besteht. Der Mensch möchte jederzeit erreichbar bleiben und andere erreichen können. Es werden dazu immer mehr Notebooks, PDAs und Mobiltelefone eingesetzt. Die Entwicklung neuer Geräte nimmt dabei ein immer schnelleres Tempo an. Auf diese Weise werden Dienste möglich, die vor einigen Jahren noch undenkbar waren – wie die Disposition von Reisenden im Bahnnetz.

## V.1 Theoretische Grundlagen

In den nächsten Abschnitten wird zunächst aufgezeigt, welche grundsätzlichen technischen Möglichkeiten des *Mobile Computing* zur Interaktion mit und zur generellen Verfolgbarkeit von Reisenden im Netz existieren. Anschließend wird ein kurzer Überblick über die Marktsituation gegeben, um eine Entscheidungshilfe zu geben, welche Technologievarianten unterstützt werden sollten.

### V.1.1 Grundkonzepte des Mobile Computing

Der Begriff „Mobile Computing“ wird als Schlagwort für den mobilen Umgang mit mobiler Informationstechnologie in den unterschiedlichsten Zusammenhängen verwendet, obwohl keine wirklich einheitliche Definition existiert. Vielmehr subsumiert der Begriff eine Fülle von Konzepten, wie z. B. (vgl. [Roth 2002], S. 4ff.):

- *Allgegenwärtige Computer*: Nach Weiser können drei Phasen der Computernutzung unterschieden werden: die Phase der Mainframes, die Phase der PCs und die Phase der allgegenwärtigen Computer. In der letzteren treten Computer immer mehr in den Hin-

---

<sup>181</sup> Diese Vision ist in der Tat nicht allzu weit entfernt – existieren doch schon seit einiger Zeit mobile Satellitenortungssysteme für Personal Digital Assistants (PDAs), die mittlerweile in Supermarktketten und per Internet preisgünstig vertrieben werden.

<sup>182</sup> Ein genereller Fehler vieler innovativer Dienstleistungen im Bereich des sog. M-Commerce war in der Vergangenheit der, nicht auf die Verbreitung der tauglichen Endgeräte zu achten. Kaum ein Kunde wird sich nach Meinung des Autors nur wegen eines verhältnismäßig kleinen Nutzens – z. B., weil es eine neue Schnittstellentechnologie bietet, ein neues Mobiltelefon kaufen. Eine integrierte Kamera mag eine andere Anreizwirkung haben.

tergrund und werden für den Benutzer unsichtbar. Sie sind überall verfügbar und können entweder stationär oder mobil eingesetzt werden. Weiser geht schon zu diesem frühen Zeitpunkt von einem weltweit vernetzten System aus, in dem Alltagsgegenstände Rechnerfunktionen übernehmen (vgl. [Weiser 1991]).

- *Nomadic Computing*: Nomadic Computing beschreibt den Umgang mit der Mobilität des Anwenders. Es befasst sich mit den Anforderungen an die Geräte und den Problemen bei der mobilen Kommunikation. Es betont u. a. auch die Probleme am Zielort einer Reise.
- *Personal Computing*: Von Personal Computing wird gesprochen, um die persönliche Natur der Verwendung mobiler Endgeräte zu betonen. PDAs und Notebooks können persönliche Daten (Termine, Telefonnummern etc.) enthalten. Sie werden in der subjektiven Wahrnehmung der Nutzer eher als „persönlich“ betrachtet als stationäre Geräte – möglicherweise aufgrund ihres Charakters als ständiger Begleiter im täglichen Leben.
- *Tragbare Computer*: Bei diesem Aspekt steht die Mobilität der Endgeräte im Vordergrund. Es wird zwischen tragbaren PCs (Notebooks), Handhelds (PDAs) und Wearables, also am Körper tragbaren Geräten (z. B. Uhren oder „Intelligente“ Kleidung zur Überwachung von Körperfunktionen), unterschieden.
- *Ad-hoc-Vernetzung* ist die kurzfristige und spontane Vernetzung von Geräten ohne aufwendige Konfiguration. Dies kann zum z. B. beim Datenaustausch zwischen mehreren mobilen oder einem mobilen und einem stationären Gerät der Fall sein. Häufig werden dazu drahtlose Technologien wie WLAN, IrDA oder Bluetooth verwendet. Eine Erläuterung dieser Technologien findet sich im nächsten Abschnitt.
- *Embedded Networking*: Werden Geräte mit eingebetteten Systemen, wie z. B. Haushaltsgeräte oder ein Navigationssystem für Fahrzeuge, in ein Netzwerk integriert, wird von Embedded Networking gesprochen. Ein bekanntes Beispiel ist der „Internetfähige Kühlschrank“, der selbständig den Bestand an Speisen überwacht und bei Bedarf nachbestellt.
- *Mobilkommunikation*: Der Begriff Mobilkommunikation beschränkt die Sicht auf die reine Kommunikation. Der Bedarf nach Mobilkommunikation entsteht dann, wenn ein Gerät zwischen verschiedenen Netzwerken bewegt wird.

## V.1.2 Netzwerk-Technologien für mobile Endgeräte

Offensichtlich bedarf jegliche Datenkommunikation einer Trägertechnologie. Die für die Kommunikation mit Passagieren verwendbaren Technologien bzw. Standards sind naturgemäß kabellos und werden nachfolgend skizziert.

### V.1.2.1 Global System for Mobile Communication

Das Global System for Mobile Communication (GSM) ist ein etablierter europäischer Standard für den digitalen Mobilfunk, der 1989 von dem European Telecommunication Standards Institute (ETSI) vorgestellt wurde. Das System wurde im Gegensatz zu den damals vor-

handenen analogen Systemen so ausgelegt, dass viele Millionen Kunden pro Netzwerk versorgt werden können. Damit war es für den Massenmarkt geeignet (vgl. [Roth 2002], S. 49). Mit den D-Netzen D1 und D2 wurde 1992 diese Technik in Deutschland eingeführt, zwei Jahre später folgte das E-Netz. Die GSM-Netze arbeiten mit einem Frequenzbereich von 900 (D-Netz) bzw. 1800 MHz (E-Netz). Oft werden sie auch als Mobilfunknetze der zweiten Generation bezeichnet

Da bei der Entwicklung des Standards keine Rücksicht auf bestehende analoge Netze genommen werden musste, entstand ein sehr modernes, effizientes und noch immer zukunfts-trächtiges Landfunknetz (vgl. [Krutwig/Tolksdorf 2001], S. 189). Es erlaubt die Nutzung derselben Fläche durch mehrere Mobilfunkanbieter ohne gegenseitige Störung. Durch sich überschneidende, zellulare Netzbereiche wird in der Regel eine vollständige Flächenabdeckung erzielt. Zwischen den Zellen wird durch das sog. *Handover* sichergestellt, dass ein sich bewegend Teilnehmer von der jeweils nächsten Basisstation übernommen wird. Verlässt ein Teilnehmer das Netz eines Anbieters, kann durch *Roaming* seine Erreichbarkeit unter derselben Rufnummer auch innerhalb des Fremdnetzes sichergestellt werden. Dazu haben die Netzbetreiber ein spezielles Abkommen getroffen.

Die nur sehr niedrige Datenübertragungsrate von 9600 Bit/s, die GSM zur Verfügung stellt, lies bald den Ruf nach Weiterentwicklungen laut werden. Vor allem für die Nutzung von Datendiensten wie WAP werden höhere Bandbreiten benötigt. In der Folge wurden drei Verfahren konzipiert, die oft als Zwischenstufe zwischen zweiter und dritter Mobilfunkgeneration gesehen werden. Sie werden auch als die Generation 2+ bezeichnet. Diese sind:

- *High Speed Circuit Switched Data (HSCSD)*: Beim HSCSD-Verfahren werden durch bessere Kodierungsverfahren 14.400 Bit/s pro Kanal erreicht. Durch Bündelung von bis zu acht Kanälen ist somit eine theoretische Bandbreite von 115,2 Kbit/s möglich.<sup>183</sup> Dabei wird verbindungsorientiert abgerechnet: Auch, wenn keine Daten zur Übertragung anstehen, entstehen Kosten, was das Verfahren zu teuer für dialogorientierte Anwendungen wie den Zugriff auf das World Wide Web oder das Lesen von E-Mails macht. Es eignet sich insbesondere dann, wenn große Datenmengen in einer zeitlich begrenzten Sitzung ausgetauscht werden müssen, bspw. beim Datentransfer mit dem unternehmenseigenen Intranet. Es wird daher oft eingesetzt, um einen mobilen PC mit dem Mobilfunknetz zu verbinden.
- *General Packet Radio Service (GPRS)*: Im Unterschied zu HSCSD arbeitet GPRS paketvermittelt und erlaubt damit eine bessere Ausnutzung vorhandener Übertragungskapazitäten, vor allem bei schwankenden Datenmengen. Bei optimalem Empfang und acht gebündelten Kanälen ist eine theoretische Datenrate von 171,2 Kbit/s möglich, die im Betrieb befindlichen Netze erreichen allerdings momentan diese Raten nicht. Durch die Paketvermittlung ist eine völlig neue Art des Zugangs möglich; nachdem das Endgerät eingebucht ist, besteht eine permanente Verbindung („always online“).

<sup>183</sup> Dies werden die Mobilfunkbetreiber aber nur selten zulassen, da die Funkressourcen dafür zu knapp sind.

Seit dem Jahr 2001 wird GPRS in allen deutschen Mobilfunknetzen angeboten. Es werden spezielle Endgeräte benötigt, da das bestehende GSM-Netz beträchtlich für paketorientierte Kommunikation angepasst werden musste. Mittlerweile sind jedoch quasi alle am Markt verfügbaren Endgeräte GPRS- (und auch HSCSD-) –fähig.

- *Enhanced Data Rates for GSM Evolution (EDGE)*: EDGE ist eine Weiterentwicklung von HSCSD und GPRS zur Erhöhung der Bandbreite unter Beibehaltung der GSM-Infrastruktur. Durch ein verändertes Modulationsverfahren können 3 Bit pro Takt statt einem Bit übertragen werden. Pro Kanal wird eine Datenrate von maximal 59,2 Kbit/s erreicht, bei acht gebündelten Kanälen sind 473,6 Kbit/s möglich. Bei schlechter Empfangsqualität sinkt diese Rate jedoch rapide.

EDGE benötigt ebenfalls spezielle Endgeräte und sollte zunächst als Übergangslösung bis zur Einführung von UMTS (s. u.), dem ersten Mobilfunksystem der dritten Generation dienen. Dabei wurde allerdings der Bedarf an mobiler Datenkommunikation überschätzt; nach Wissen des Autors sind, wenn überhaupt, nur wenige EDGE-fähige Endgeräte am Markt verfügbar.

GSM stellt, vor allem mit den genannten Erweiterungen zur Datenübertragung, aber – in Grenzen – auch schon durch den Short Message Service (SMS) alle für die kundenorientierte Disposition benötigten Kommunikationsdienste bereit. Kurz vor einer flächendeckenden Einführung steht jedoch auch schon der nachfolgend beschriebene Standard.

### V.1.2.2 Universal Mobile Telecommunications System

Um den Anforderungen von zukünftigen mobilen Anforderungen gerecht zu werden, muss ein neues Mobilfunknetz der dritten Generation entstehen. Unter dem Namen IMT-2000 (International Mobile Telecommunications at 2000 MHz) wurden deshalb von verschiedenen Gruppen Vorschläge für diesen neuen Standard eingereicht. Die Anforderungen an diesen Standard waren (vgl. [Roth 2002], S. 67):

- Verschiedene Zugangsvarianten, sei es per Mobilfunk oder per Satellit, sollen möglich sein. Zwischen den Zugangsmöglichkeiten muss ein nahtloser Übergang bestehen.
- Neben der Sprachübertragung soll Datenübertragung und Internetzugang mit einer Bandbreite von 2 Mbit/s integriert sein.
- Sowohl paket- als auch leitungsvermittelte Übertragungen sowie asymmetrischer Datenverkehr werden unterstützt.
- Zugänge zu weiteren Netzen wie ISDN und TCP/IP sind gegeben.
- Es sollen sog. *Virtual Home Environments* (VHE), die von jedem Ort den Zugang auf die gleichen Dienste ermöglichen, eingerichtet werden.
- Roaming und Handover soll auch mit den Mobilfunksystemen der zweiten Generation funktionieren.

Diese Anforderungen erfüllt das von dem ETSI vorgeschlagene *Universal Mobile Telecommunications System* (UMTS), welches oft als Synonym für Mobilfunksysteme der dritten Generation verwendet wird. Endgeräte mit Farbdisplays, WAP- und Internetbrowsern sollen

völlig neuartige mobile Anwendungen ermöglichen. Beispiele dafür sind nach [Roth 2002], S. 67:

- *Internet/Informationsdienste*: World Wide Web, Buchungen, Reservierungen, Ticketbestellungen, News-Ticker, Wetterbericht
- *Unterhaltung*: E-Books, Music-on-Demand, Videoclips, Netzwerkspiele
- *Ortabhängige Dienste*: Navigation, Abfragen lokaler Informationen, Logistik- und Flottenmanagement, Ferndiagnose
- *Finanzdienste*: Onlinebanking, Micro- und Macropayment, Home-Shopping, Abfragen von Börsenkursen
- *Kommunikation*: Sprachtelefonie, Videotelefonie, E-Mail und SMS, Instant Messaging, Video-Postkarten

Weniger aufgrund der Möglichkeiten von UMTS als vielmehr aufgrund der enormen Geldsummen (versunkenen Kosten), die in den Aufbau einer Kommunikationsinfrastruktur gesteckt werden, wird UMTS in den nächsten Jahren den GSM-Standard nach und nach ersetzen; aktuell existieren in Deutschland einige Hunderttausend Benutzer. Eine Alternative zu Mobilfunkanwendungen sind konventionelle, drahtlose Computernetzwerke, die nach und nach sogar in Zügen Verbreitung finden.

### V.1.2.3 Wireless Local Area Network

Wireless Local Area Network (WLAN) wird meist als Sammelbegriff für alle drahtlosen lokalen Netzwerke verstanden, der Begriff steht aber auch für den Standard IEEE 802.11 für Funknetzwerke (vgl. [Roth 2002], S. 79). Diese Technik nimmt immer mehr Einzug in lokale Netzwerke, da durch das Fehlen von Verkabelung eine ganze Reihe von Vorteilen entsteht: Neben den ersparten Kosten können nun auch Gebäude – oder eben auch Züge –, bei denen die Verkabelung schwierig oder unmöglich ist, vernetzt werden. Die lokalen Netze zweier Gebäude können ohne zusätzliche Erdarbeiten verbunden werden. Auch im mobilen Datenverkehr wird WLAN vermehrt eingesetzt. So können Anwender in Hotels, Flughäfen oder Bahnhöfen in sog. Hotspots verschiedener Anbieter drahtlos mit dem Internet verbunden werden, sodass mehr und mehr Anwender diese Technik auch nutzen werden.

Probleme dieser Technik sind die hohe Störanfälligkeit, hohe Hardwarekosten, Sicherheitsrisiken durch Abhörmöglichkeiten und die zurzeit gegenüber verdrahteten Netzen noch niedrige Bandbreite. Weiterentwicklungen des 802.11-Standards ermöglichen bereits Datenraten von 54 Mbit/s (802.11g), weit verbreitet ist aber zurzeit auch noch der 802.11b-Standard mit 11 Mbit/s. In der Planung steckt eine Weiterentwicklung des Standards hin zu Reichweite von mehreren Kilometern und Bandbreiten von bis zu 70 Mbit/s.

Ein großer Nachteil des WLAN, einen Laptop dabei haben zu müssen, um es nutzen zu können, wird nach und nach durch WLAN-fähige PDAs ausgeglichen.

#### V.1.2.4 Wireless Personal Area Network

Während die oben erwähnten WLANs hauptsächlich dazu dienen, stationäre PCs und Notebooks untereinander zu vernetzen oder in ein lokales Netzwerk einzubinden, werden *Wireless Personal Area Networks* (WPAN) meist für die Vernetzung von kleinen mobilen Endgeräten wie PDAs und Mobiltelefonen benutzt. Diese Netzwerke stellen niedrigere Anforderungen an die Endgeräte und haben i. Allg. eine kurze Reichweite von nur wenigen Metern (vgl. [Roth 2002] S. 119f.). Sie wurden für den Massen- und Konsummarkt konzipiert und bedürfen daher nur minimaler Konfiguration. Typische Anwendungen sind der Austausch von Daten zwischen zwei PDAs oder der Anschluss eines drahtlosen Headsets an ein Mobiltelefon.

Die wichtigsten Vertreter von WPANs sind die etablierten Standards IrDA und Bluetooth. Während IrDA auf Infrarotübertragung basiert, ist das neuere Bluetooth ein Funkübertragungsverfahren.

- *IrDA*: 1993 schlossen sich 30 Firmen zusammen, um gemeinsam einen Standard für die Infrarotübertragung zu definieren. Diese Gruppe nannte sich Infrared Data Association, das Kürzel IrDA steht sowohl für die Gruppe als auch ihren entwickelten Standard. IrDA unterstützt Datenraten bis 16 Mbit/s, ein Transportprotokoll übernimmt die Flusskontrolle und Segmentierung langer Nachrichten (vgl. [Roth 2002], S. 121f.).

Die Infrarot-Technik unterscheidet sich wesentlich von der Funk-Kommunikation. Da Infrarotlicht keine festen Gegenstände durchdringen kann, ist die Reichweite stark begrenzt. Die zu verbindenden Geräte müssen eine Sichtverbindung haben. Einfallendes Sonnenlicht kann zusätzlich die Übertragung erheblich stören. Vorteile der Infrarotübertragung sind vor allem der niedrigere Preis der Empfänger sowie die fehlenden hoheitlichen Beschränkungen. Bei der Funkübertragung müssen kostspielige Lizenzen für neue Netze beantragt werden, da ein großes Spektrum der Frequenzen bereits ausgenutzt wird.

- *Bluetooth*: Bluetooth ist ein Standard für die Funkübertragung zwischen benachbarten Geräten. Er wurde durch gemeinsame Bemühungen der Firmen Ericsson, Nokia, IBM, Intel und Toshiba entwickelt und nach dem Wikingerkönig Harald Blauzahn (10. Jahrhundert) benannt. Bluetooth unterstützt eine Datenrate von 1 Mbit/s, überbrückt Entfernungen bis zu 10 Meter und kann Geräte in Kommunikationsreichweite automatisch verbinden.

Die ersten Bluetooth-Geräte kamen im Jahr 2000 auf den Markt. Angewendet wird die Technologie vor allem bei PDAs und Mobiltelefonen, aber auch stationäre PCs haben Schnittstellen, um einen Datenabgleich zu ermöglichen. Ein wesentlicher Vorteil gegenüber IrDA ist die integrierte Authentifizierung und Verschlüsselung, denn gerade das Thema Sicherheit spielt in mobilen Netzen eine wichtige Rolle.

### V.1.3 Dienste für mobile Endgeräte

Für mobile Endgeräte stehen auf den vorgestellten Trägertechnologien implementierte Datendienste zur Verfügung, um die im betrachteten Kontext notwendigen Kurzmitteilungen an bzw. eine Interaktion mit den Passagieren zu ermöglichen.

#### V.1.3.1 Short Message Service

Mittels des Short Message Service können alphanumerische Punkt-zu-Punkt-Nachrichten bis zu einer Länge von 160 Zeichen zwischen einer Zentrale und einem mobilen Endgerät in einem GSM-Netz ausgetauscht werden (vgl. [Krutwig/Tolksdorf 2001], S. 189). Zur Übertragung der Nachrichten wird ein separater Signalisierungskanal verwendet, so dass die Dienste Telefonie und SMS gleichzeitig benutzt werden können. Durch das Store-and-forward-Prinzip muss keine unmittelbare Verbindung zwischen Sender und Empfänger der Nachricht bestehen. Ist der Empfänger vorübergehend nicht erreichbar, wird die Nachricht in der Zentrale gespeichert und bei wiedererlangter Verfügbarkeit übermittelt.

Anwendungen sind sowohl die individuelle Kommunikation zwischen zwei mobilen Endgeräten als auch die Bereitstellung von Informationsdiensten. Letzteres können kostenpflichtige Angebote, wie z. B. die Übermittlung von Aktienkursen, aber auch kostenlose Informationsdienste, wie die Abfluginformationen bei der Lufthansa sein. Es ist auch möglich, über das Internet SMS-Nachrichten an mobile Endgeräte zu verschicken. Diese Angebote werden meist durch Werbung, die an das Ende der Nachricht angehängt wird, finanziert. Für die Netzbetreiber ist SMS zu einem wesentlichen Geschäftsanteil geworden, insbesondere mit der zunehmenden Verbreitung und Vermarktung von Klingeltönen jeglicher Art.

#### V.1.3.2 Multimedia Messaging Service

Der Multimedia Messaging Service (MMS) ist ein neuerer Mitteilungsdienst für mobile Geräte wie Mobiltelefone und Smartphones, der vom WAP-Forum und dem 3<sup>rd</sup> Generation Partnership Program (3GPP) standardisiert wurde. Er ähnelt dem SMS-Dienst, MMS-Mitteilungen werden selbst erstellt und empfangene Nachrichten auf dem Mobiltelefon gespeichert. Sie sind jedoch nicht mehr auf 160 Zeichen beschränkt und können Bilder, Animationen und Töne enthalten. Mögliche Anwendungen sind dann auch animierte Wetterkarten, Stadtpläne mit Wegbeschreibungen und sonstige ortsbezogene Dienste.

Ähnlich wie beim SMS werden die Nachrichten über eine zentrale Vermittlungsstelle, dem sog. MMS-Center (MMSC) versandt. MMS-Server müssen jedoch weit mehr Funktionen und Anwendungen unterstützen als SMS-Server, da das MMSC zusätzliche Netzwerk- und Anwendungsschnittstellen für weitere Dienste und die Verknüpfung mit anderen Netzwerken bietet. Es existieren mittlerweile Routenplanungssysteme für den Automobilverkehr via MMS (vgl. [ECIN 2003]); die Idee einer personalisierten Routenplanung über den Mobilfunk wurde also bereits für andere Verkehrswege realisiert.

### V.1.3.3 Wireless Application Protocol

Das *Wireless Application Protocol* (WAP) ist das Ergebnis von Bemühungen der Telekommunikationsindustrie, einen gemeinsamen Standard einzuführen, der es Benutzern mit entsprechenden mobilen Endgeräten, wie Mobiltelefonen und PDAs, ermöglicht, jederzeit und überall auf Informationen und Dienste zurückzugreifen. Diese Unternehmen gründeten das WAP-Forum, welches genaue Spezifikationen für das Protokoll festlegte. Mittlerweile firmiert dieses Forum unter der neuen Bezeichnung *Open Mobile Alliance* (vgl. [OMA 2005])

Die ugrunde liegende Zielsetzung lag in der Positionierung von WAP am Schnittpunkt von drei schnell wachsenden Netzwerk-Technologien: drahtlose Netzwerke, Mobilfunk und Internet. Es sollte Möglichkeiten für die Erstellung neuer Informationsdienste und Anwendungen und damit zur Schaffung neuer Märkte bieten. Bis heute ist die Nutzung von WAP jedoch hinter den Erwartungen zurückgeblieben. Dies hat sicherlich vielschichtige Ursachen: Mobile Endgeräte haben geringere Rechenleistungen und Speichergrößen, die Displays sind deutlich kleiner, und es werden andere Eingabegeräte benutzt. Meist steht nur eine sehr einfache Tastatur mit zehn Ziffern und einigen Funktionstasten zur Verfügung. Außerdem muss der Stromverbrauch der Geräte berücksichtigt werden. Neben diesen Problemen, die mobile Endgeräte mit sich bringen, sind drahtlose Netzwerke i. Allg. weniger leistungsfähig. Sie haben meist geringere Bandbreiten, höhere Antwortzeiten und geringere Verbindungsstabilität und Verfügbarkeit. Es ist daher darauf zu achten, dass folgende Eigenschaften gewährleistet sind:

- *Interoperabilität*: Systeme verschiedener Hersteller müssen im mobilen Netzwerk kommunizieren können.
- *Skalierbarkeit*: Das Netzwerk kann einer erhöhten Nutzerzahl angepasst werden.
- *Effizienz*: Den Verhältnissen mobiler Netze entsprechend wird die Güte der Dienste garantiert.
- *Zuverlässigkeit*: Es wird eine konsistente und vorhersagbare Plattform für die Entwicklung von Diensten angeboten.
- *Sicherheit*: Die Geräte und Dienste müssen vor Missbrauch geschützt werden.

Inhalte, die von WAP-fähigen Endgeräten dargestellt werden sollen, müssen in der Beschreibungssprache WML (*Wireless Markup Language*) vorliegen, die für die Gestaltung von WAP-Inhalten benutzt wird. Sie beruht auf dem XML-Standard und wurde für die Darstellung von Inhalten auf Geräten mit kleinen Displays, Schmalbandanbindung und geringem Speicher optimiert. Ebenso wie bei HTML bilden eine feste Menge von Elementen („Tags“) die Basis für den Dokumentaufbau, der Sprachumfang ist jedoch geringer (vgl. [Roth 2002], S. 397ff.). Dabei ist WML durch die Abstammung von XML restriktiver als HTML. Um sicherzustellen, dass nur sprachkonforme Dokumente verwendet werden, wird in der *Document Type Definition* (DTD), d. h. der Definition der möglichen Sprachelemente, von WML eine genaue Grammatik festgelegt, die jedes WML-Dokument befolgen muss (vgl. [Krutwig/Tolksdorf 2001], S. 9f.). Die Darstellung der Inhalte erfolgt über einen WML-Browser,

der in WAP-fähigen Endgeräten integriert sein muss. Die Abfolge der Darstellung wird in Abbildung 53 verdeutlicht.

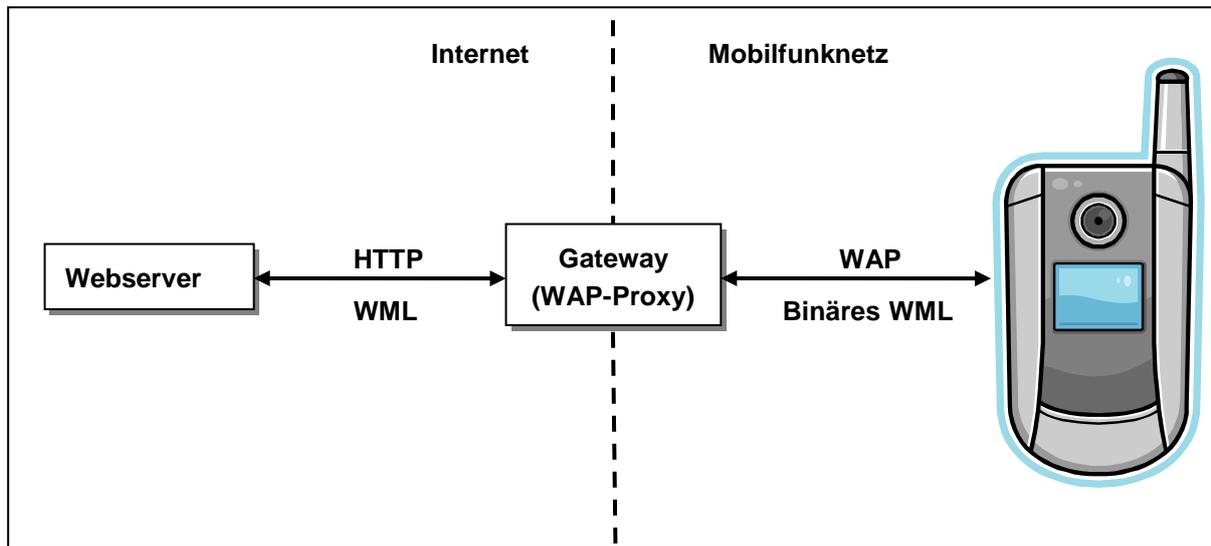


Abbildung 53: Die WAP-Infrastruktur

WML-Seiten werden typischerweise auf Webservern abgelegt. Vor der Übergabe in das Mobilfunknetz werden sie daher über das Internet mit Hilfe des Dispositionsstrategie-Protokolls übertragen. Fordert ein mobiles Endgerät eine WML-Seite an, wird diese durch einen WAP-Proxy in das kompaktere, binäre WML konvertiert, wodurch Bandbreite gespart wird. Für die Übertragung des binären WML wird dann das WAP-Protokoll benutzt.

#### V.1.3.4 i-Mode

Der japanische Mobilfunkbetreiber NTT DoCoMo richtete 1999 den proprietären Dienst i-Mode ein, welches ähnlich wie WAP den Zugriff auf das Internet über mobile Endgeräte ermöglicht. Im Jahr 2002 wurde i-Mode durch E-Plus auch in Deutschland eingeführt. Es konnte bisher jedoch nicht den gleichen Erfolg wie in Japan verzeichnen, wo inzwischen mehr als 30 Millionen Kunden regelmäßig i-Mode benutzen. Dieser Erfolg ist vor allem auf das fortgeschrittenere Trägernetz gegenüber dem europäischen GSM zurückzuführen. Die Übertragung und Abrechnung erfolgt paketorientiert, wodurch statt nach Zeit nach Volumen abgerechnet werden kann, was dem typischen Benutzungsverhalten entgegenkommt. Zusätzlich besteht eine permanente Verbindung („always online“).

Der Zugriff auf Internet-Inhalte erfolgt über ein i-Mode-Portal, das vom jeweiligen Mobilfunkbetreiber verwaltet wird und welches Verweise auf Inhalte anderer Anbieter beinhaltet. Die Seiten werden mit Hilfe von cHTML (compact HTML) beschrieben, welches eine Untermenge von HTML darstellt. Da i-Mode-fähige Geräte im Unterschied zu WAP-fähigen Geräten meist mehrzeilige hochauflösende Farbdisplays aufweisen, ist die Konvertierung von Webseiten in cHTML relativ problemlos. Unterschiede sind die fehlenden Tabellen und Fra-

mes, der eingeschränkte Satz von Schriftarten, Einschränkungen bei der Verwendung von Bildern und das Fehlen von Style Sheets (vgl. [Roth 2002], S. 404).

#### V.1.4 Klassen mobiler Endgeräte

Mobile Endgeräte ermöglichen einem Benutzer jederzeit und an jedem Ort die Dienste eines drahtlosen Netzwerkes zu nutzen. Die Bandbreite mobiler Endgeräte reicht dabei von Geräten für spezielle Anwendungen, wie z. B. einem Navigationssystem für Fahrzeuge, bis zu mobilen Rechnern, welche heutzutage fast die volle Leistungsfähigkeit stationärer Computer aufweisen.

Eine strenge Klassifizierung der Endgeräte in Kategorien fällt schwer, da die Entwicklung in diesem Gebiet in einem hohen Tempo fortschreitet. Häufig besitzen neue Endgeräte die kombinierten Eigenschaften mehrerer Klassen und wären folglich mehreren Kategorien zuzuordnen. Die hier vorgenommene Klassifikation folgt dem Vorschlag von Roth und teilt die Endgeräte in fünf Kategorien (vgl. [Roth 2002], S. 337f.) und ist in Tabelle 33 wiedergegeben.

Im Folgenden werden von dieser Auswahl nur die für diese Arbeit relevanten Kategorien Mobiler Standardcomputer und Handhelds betrachtet. Naturgemäß sind vor allem Notebooks, PDAs und Mobiltelefone geeignet, um auf ein Kundeninformationssystem zuzugreifen, da sie zur Interaktion mit dem Internet fähig sind und die erforderliche Möglichkeit zur Darstellung von Inhalten besitzen. Sie werden daher genauer betrachtet.

Tabelle 33: Klassifikation mobiler Endgeräte (nach [Roth 2002], S. 339)

Kategorie	Universalgerät	Spezialgerät
<b>Mobile Standard-computer</b>	Notebook	Spezielle mobile Computer, z. B. in der Vermessungstechnik, Kartografie und Archäologie
<b>Bordcomputer</b>	-	Bordcomputer in Fahr- und Flugzeugen, Computer in Satelliten
<b>Handhelds</b>	PDA	Elektronischer Kalender (nicht programmierbar), Lese-stift, E-Book, Web-Pad, mobiles Datenerfassungsterminal, GPS-Empfänger, Mobiltelefon, Pager, Digitalkamera
	Smart-Phone, Communicator, Mobile Spielkonsole, Programmierbarer Taschenrechner	
<b>Wearables</b>	Programmierbares Wearable	Armbanduhr Pulsmesser
<b>Chipkarten</b>	Smart Card	SIM-Karte, EC-Karte mit Bargeldfunktion, Telefonkarte, Identifikation zur Zeiterfassung, Karte für digitale Unterschrift

##### V.1.4.1 Mobiltelefone

Mobiltelefone eignen sich durch die Fähigkeit zu SMS, MMS, WAP oder i-Mode zur Interaktion mit einem Kundeninformationssystem. Bei Geräten der ersten Generation, die nur

SMS als Dienst anbieten, sind die Möglichkeiten aufgrund des geringen Umfangs von 160 Zeichen und der langen Antwortzeiten stark eingeschränkt. Der Kunde kann aber eine Anfrage gemäß einer Syntax an ein spezielles SMS-Gateway schicken. Die Anfrage wird dann durch das System verarbeitet, und die generierte Lösung wird an den Kunden verschickt. Durch MMS können zwar auch umfangreichere Nachrichten ausgetauscht werden, das Problem der Antwortzeit wird aber auch hier nicht gelöst. Besser geeignet sind WAP- oder i-Mode-fähige Geräte, die die gewünschten Informationen schneller verfügbar machen. Der Kunde benutzt dann den integrierten WAP/i-Mode-Browser, der die Navigation durch die übertragenen Inhalte ermöglicht. Diese Art der Kommunikation ist mit dem heutigen Bahninformationssystem möglich. Gravierende Nachteile während der Reise sind ein relativ hoher benötigter Zeitaufwand und der Zwang, sich als Reisender die benötigten Daten selbst zu beschaffen, sodass auf diesen Dienst nur bei genügend Zeit zurückgegriffen werden kann. Ein weiteres Problem sind die zusätzlichen Kosten, die einem WAP-Benutzer entstehen. Daher sollten zur Echtzeit-Information SMS- oder MMS-Mitteilungen verwendet werden, deren Kosten dem Versender berechnet werden.

Praktisch alle Mobiltelefone, die zurzeit in Deutschland betrieben und verkauft werden, sind inzwischen WAP-fähig. In den höheren Preiskategorien verfügen die Geräte über fortgeschrittenere Technologien wie z. B. GPRS oder i-Mode. Integrierte Terminkalender, umfangreiche Adressbücher und Synchronisationsmöglichkeiten mit dem stationären PC über Infrarotschnittstellen oder Bluetooth erweitern die Funktionen der neuen Modelle; eine „Bluetooth-Surfschnittstelle“ in Zügen ist durchaus vorstellbar, wenngleich aufwändig zu realisieren.



Abbildung 54: WAP-fähiges Mobiltelefon (Siemens S65)

#### V.1.4.2 Personal Digital Assistants (PDAs)

Diese Handhelds werden oft auch als Notepads oder Organizer bezeichnet und sind bzgl. der Anwendung Notebooks ähnlich. Sie verfügen jedoch über sehr reduzierte Prozessorleistungen und haben geringe Speicherkapazitäten. Meist bieten sie Programme zur Verwaltung von Adressen und Telefonnummern, einen Terminkalender und eine Notizbuchfunktion. Es

können aber auch neue Programme installiert werden, z. B. vereinfachte Office-Applikationen. Zusätzlich verfügen PDAs in der Regel über die Möglichkeit, ihre gespeicherten Daten mit einem stationären Computer über eine Infrarotschnittstelle oder Bluetooth abzugleichen. Als Eingabegeräte dienen kleine aufklappbare Tastaturen oder Touchscreens und spezielle Stifte, die handschriftliche Eingaben ermöglichen.

Die bekanntesten Vertreter dieser Technologie sind die Palm-Geräte von 3COM und die von Microsoft unterstützten Pocket-PCs von Herstellern wie Compaq, Casio, Hewlett Packard und vielen anderen.



Abbildung 55: Pocket-PC und Palm als Beispiele für Personal Digital Assistants

Die meisten Geräte bieten die Möglichkeit, mittels eines datenfähigen Mobiltelefons SMS und WAP zu nutzen. Dazu wird über die Infrarotschnittstelle das Mobiltelefon als Modem genutzt. In höheren Preisklassen ist bereits ein GSM-Modul enthalten, das eine direkte Verbindung ins Internet ermöglicht. Eine solche Kombination aus PDA und Mobiltelefon wird oft auch als Smartphone bezeichnet. Verstärkt werden auch Zugriffsmöglichkeiten auf WLANs integriert, sodass mittels spezieller Browser auch Internetabfragen möglich sind. Mit GPS-Modulen ausgestattete PDAs sind in großen Stückzahlen als Navigationssystem im Einsatz.

#### V.1.4.3 Notebooks

Notebooks besitzen nahezu dieselbe Leistungsfähigkeit wie stationäre Computer derselben Generation. Es werden – wenn überhaupt – nur leicht modifizierte Betriebssysteme und dieselbe Software eingesetzt. Dadurch wird der Austausch von Anwendungsdaten deutlich erleichtert. Da die Eingabegeräte und das Display mit denen stationärer Computer vergleichbar sind, kann jede Form von Internet-Inhalt abgerufen werden. Für die drahtlose Kommunikation wird ein entweder ein Mobiltelefon oder bei Verfügbarkeit eines drahtlosen Netzes eine Funknetzwerkkarte benutzt.

### V.1.5 Verbreitung mobiler Endgeräte

Nachdem geklärt ist, dass die für die Reisendeninteraktion notwendigen technologischen Grundlagen existieren und gezeigt wurde, welche prinzipiellen Dienste geeignet sind, bleibt offen, ob die Basistechnologie ausreichend weit verbreitet ist, um überhaupt nennenswerte Effekte bei der Passagierinformation zu erzielen. In erster Linie kann dies durch die enorme Anzahl der Handykunden bei den großen Mobilfunkanbietern belegt werden. So heißt es in einer Pressemitteilung eines Telefonieanbieters (vgl. [Talkline 2005]):

„Im vergangenen Jahr [2004] kletterten die Kundenzahlen auf dem deutschen Mobilfunkmarkt um mehr als 10 % auf etwa 72 Millionen Nutzer. Damit besitzen inzwischen statistisch gesehen neun von zehn Bundesbürgern ein Handy. Der Grad der Marktdurchdringung erreicht damit 87 %. Marktführer unter den vier deutschen Anbietern blieb im vergangenen Jahr die Telekom-Tochter T-Mobile mit etwa 28 Millionen Kunden. Allerdings dürfte sich der Abstand zum Branchenzweiten Vodafone verringert haben. Ende des dritten Quartals 2004 hatte T-Mobile 1,3 Millionen Kunden mehr im Netz als der Düsseldorfer Konkurrent. ... E-Plus zählte Ende 2004 etwa 9,5 Millionen Teilnehmer.“

Selbst wenn es unter den Mobilfunknutzern eine große Zahl von Kunden mit mehr als einem Vertrag, bisweilen sogar bei mehreren Anbietern gab, ist davon auszugehen, dass die Schnittmenge der Bahnkunden mit den Mobilfunknutzern immens groß ist, oder anders gesagt: Die Zahl der Bahnbenutzer mit Mobiltelefon ist signifikant groß, sodass ausreichend Potenzial für die Anwendung der Kundendisposition vorhanden ist. Als technisches Vehikel dafür wurde im Rahmen dieser Arbeit ein eigenes kleines Informations- und Kommunikationssystem entwickelt. Da dies, technologisch betrachtet, keine wirkliche Neuerung beinhaltet, wird es nachfolgend relativ kurz abgehandelt. Trotzdem bleibt zu betonen, dass die Kommunikation mit den Reisenden in Echtzeit mittels dieses Systems ermöglicht wird, wenngleich weiterführende Tests mit großen Passagiermengen und in der Praxis (mit echten SMS-Gateways) mangels entsprechender Ressourcen nicht stattgefunden haben.

## V.2 KIIS – Ein Kommunikationssystem für Reisende

Nachfolgend wird zur Abrundung ein im Rahmen dieser Arbeit entwickeltes Kommunikations- und Interaktionssystem für Reisende (KIIS) vorgestellt. Dieses System ist in der Lage, Störungsmeldungen zu filtern, Verspätungsmeldungen an betroffene Passagiere zu geben, ggf. Routenberechnungen anzustoßen und die Ergebnisse weiterzugeben.

Es liegt auf der Hand, dass für ein praxistaugliches System diverse weitere Spezifikationen bspw. für die genaue Syntax von Mitteilungen, die Bedingungen des Filtermechanismus oder diverse Plausibilitätsprüfungen (ist ein Zug wirklich verspätet, oder ist es ggf. nur seine *Verspätungsmeldung*), vonnöten sind, bevor ein solches System marktreif ist. Die prototypische Realisierung an dieser Stelle mit den geringen zur Verfügung stehenden Mitteln soll allerdings, ebenso wie das weiter unten noch erläuterte E-Info-System, eher die technische Machbarkeit des Konzepts beweisen.

### V.2.1 Ziele der Reisendenunterstützung

Reisende sollen in der Lage sein, mittels eines mobilen Endgerätes aktualisierte Fahrplaninformationen zu erhalten und bei Bedarf auf Änderungen reagieren zu können. Die zu unterstützenden Endgeräte seien dabei auf Notebooks, PDAs und geeignete Mobiltelefone beschränkt. Aufgrund der unterschiedlichen technischen Möglichkeiten der Geräte muss der Zugriff auf Informationen für jede Geräteklasse getrennt optimiert werden. Die Informationen sollen übersichtlich aufbereitet werden, um eine effektive Nutzung zu garantieren.

Die Kommunikation mit dem Kunden wird über zwei unterschiedliche Wege realisiert. Entweder wird er mittels E-Mail oder SMS direkt vom System nach dem Push-Prinzip benachrichtigt, oder der Kunde benutzt aus eigener Initiative heraus den Informationsdienst mittels eines Browsers (Pull-Prinzip) – je nach der zur Verfügung stehenden Zeit.

### V.2.2 Die System-Architektur des KIIS

Für den Pull-Mechanismus kann das System als „normales“ Client-Server-System konzipiert werden, bei der die integrierten Browser der mobilen Endgeräte als Clients fungieren. Ein Webserver macht die auf ihm abgelegten Inhalte über das Internet verfügbar.

Die statischen Daten wie Fahrpläne und Benutzerinformationen sowie die aktuellen Fahrplanänderungen sind wiederum in einer zentralen Datenbank abgelegt. Für die Präsentation der Inhalte werden Anfragen an den Server gestellt und die Ergebnisse dynamisch als Web-Inhalte dargestellt. In diesem Moment ist somit der Webserver Client des Daten-Servers. Das Schema in Abbildung 56 soll die Architektur verdeutlichen.

Das Informationssystem kann auch als mobiles Agentensystem aufgefasst werden. Für die Dauer einer Benutzer-Session wird ein mobiler Agent in Form einer dynamisch generierten Webseite an das Endgerät gesendet.

### V.2.3 Funktionsumfang

Im Kontext dieser Arbeit genügt es, wenn das das Informationssystem einige der angesprochenen Basisfunktionalitäten beinhaltet. Konkret sollen folgende Möglichkeiten der Information und Interaktion implementiert werden:

*Information über den Ausfall von Zugverbindungen oder Verspätungen:* Der Benutzer kann beliebige Verbindungen über Web-Formulare auf bekannte Störungen überprüfen lassen. Diese Methode setzt die Initiative des Kunden voraus. Alternativ kann durch das Anlegen eines Benutzerkontos, in welchem E-Mail Adresse oder Mobiltelefonnummer gespeichert sind, das Informationssystem von sich aus beim Auftreten einer Störung Benachrichtigungen verschicken. Dazu müssen die gebuchten Fahrten des Kunden jedoch zuvor im System abgelegt worden sein. Das kann entweder durch Eingaben des Kunden in sein Benutzerprofil, oder aber auch direkt bei der Buchung einer Verbindung geschehen.

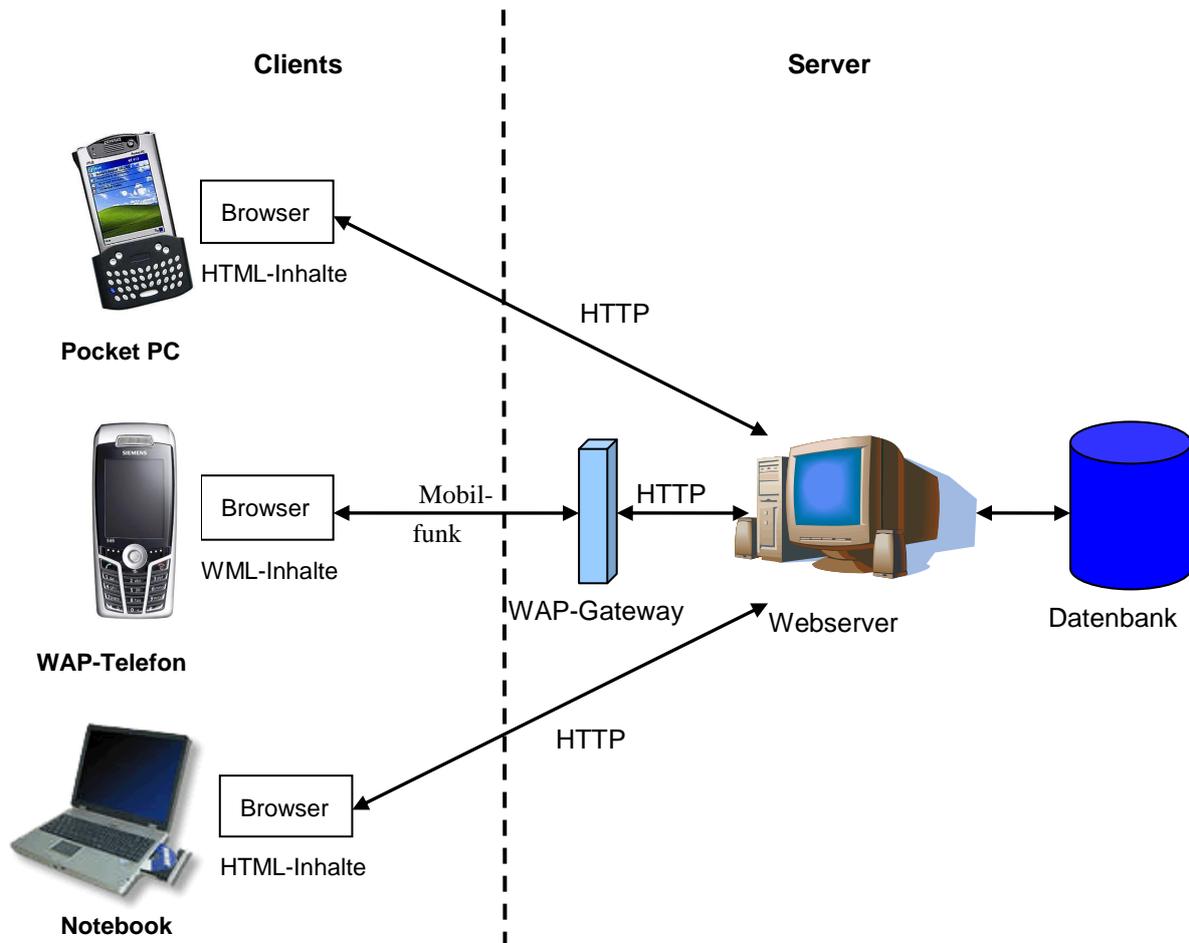


Abbildung 56: Systemarchitektur eines Informationssystems für Reisende

*Information über mögliche Anschlusszüge und Umsteigemöglichkeiten:* Tritt eine Störung auf, sollen dem Kunden die möglichen Handlungsalternativen vorgeschlagen werden. Das System sollte dabei möglichst den resultierenden Aufwand für den Kunden minimieren. So kann bei Ausfall eines Anschlusszugs eine Liste mit möglichen Ersatzzügen präsentiert werden, aus denen der Kunde wählen kann.

*Umbuchen von Verbindungen bei Störungen:* Ist eine Störung aufgetreten und existieren Alternativverbindungen, so soll der Kunde durch sein mobiles Endgerät in der Lage sein, ohne Mehraufwand seine Fahrkarte umzubuchen. Voraussetzung dafür ist, dass das Zugpersonal ständig in Verbindung mit dem Buchungssystem steht, da kurzfristig die Gültigkeit von Fahrkarten geändert werden könnte. Auch sollten keine unbefugten Umbuchungen geschehen können, was jedoch durch Integration geeigneter Sicherheitsmechanismen zu unterbinden ist.

*Gutschrift von Punkten in einem Bonussystem bei von der Bahn verschuldeten Störungen:* Um den Mehraufwand des Kunden bei einer Störung zu kompensieren, sollen Punkte in einem Bonussystem gutgeschrieben werden. Die Anzahl der Punkte hängt dabei von der Schwere der Folgen für den Kunden ab: bei der Umbuchung auf einen wenige Minuten später fahrenden Anschlusszug werden demnach nur wenige Punkte, beim Ausfall der letzten Verbindung eines Tages dafür deutlich mehr Punkte vergeben. Dieses Bonuskonto verlangt eben-

falls nach einem Benutzersystem, bei dem der Kunde sich mit Namen und Passwort registriert. Als Nachweis für das Anrecht auf eine Gutschrift könnte dabei die eindeutige Fahrkartenummer dienen. Gesammelte Punkte können anschließend gegen Rabatte für weitere Fahrkartenkäufe getauscht werden. Auch Kooperationen mit Partnern aus anderen Branchen oder monetäre Entschädigungen sind denkbar.

*Informationen über Busverbindungen:* Fällt der Anschlusszug aus, kann bei Zielen im Nahbereich das Wechseln auf den Bus sinnvoll sein. Möchte der Kunde diese Möglichkeit nutzen, sollte das System die benötigten Informationen bereitstellen. In der Praxis wird dies auf dem statischen Fahrplan bereits durch den Fahrplanservice der Bahn abgedeckt.

*Bestellung eines Taxis/Reservierung eines Hotelzimmers:* Als letzte Alternative kann bei Ausfall eines Anschlusszugs auch ein Taxi zum Bahnhof bestellt werden. Es eignet sich aufgrund der hohen Kosten jedoch nur für sehr kurze Strecken. Fährt der nächste Anschlusszug erst am folgenden Tag, bleibt die Möglichkeit, ein Hotelzimmer zu reservieren. Die benötigten Informationen über Taxiunternehmen und Hotels einer Stadt sind ebenfalls im System zu finden.

Neben diesen Anforderungen sind viele Erweiterungen vorstellbar. Für diese Arbeit genügt es jedoch, das zugrunde liegende Prinzip zu demonstrieren.

## V.2.4 Implementierung

Eine Schnittstelle für Reisende ist prinzipiell mit den bereits vorhandenen WWW-Lösungen der Bahn vergleichbar; letztlich müssten diese nur um individualisierte Informationen und Mechanismen zum automatisierten Nachrichtenversand an beliebige Kommunikationsendgeräte erweitert werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde exemplarisch das Kundeninformations- und -interaktionssystem (KIIS) entwickelt.

Bei der Implementierung des Prototyps werden im Wesentlichen die folgenden Technologien verwendet:

- Der freie und weit verbreitete Webserver Apache (vgl. [Apache 2005]),
- die relationale Datenbank MySQL (vgl. [MySQL 2005]) und
- die Skriptsprache PHP (PHP Hypertext Preprocessor, vgl. [PHP 2005]).

Die genannten Technologien wurden bewusst aufgrund ihrer Verfügbarkeit, der weiten Verbreitung und (relativ) leichten Erlernbarkeit als Entwicklungsumgebung gewählt; für ein Produktivsystem sollten ggf. leistungsfähigere Umgebungen gewählt werden.<sup>184</sup>

### V.2.4.1 Die KIIS-Clients

Die KIIS-Clients bilden den für den Kunden sichtbaren Teil des Kundeninformationssystems. Als Richtlinien bei der Entwicklung wurden die in der europäischen Norm EN ISO 9241 – 10 beschriebenen Grundsätze der Dialoggestaltung zur Grundlage genommen. Diese

---

<sup>184</sup> Die Aussage ist nicht wertend gemeint: In der genannten Entwicklungsumgebung wurden weltweit sehr umfangreiche Webanwendungen mit vielen Zugriffen in ausreichender Performanz entwickelt.

Norm, welche sich mit der Mensch-Maschine-Interaktion beschäftigt, kann auch auf das Webdesign übertragen werden.

Anders als bei der stationären Internet-Nutzung herrscht bei mobilen Datendiensten eine hohe Endgerätevielfalt, die dazu noch völlig unterschiedliche Darstellungsmethoden fordern. Der Dienst muss daher konzeptionell auf mobile Kunden und ihre Bedürfnisse zugeschnitten werden (vgl. [Beier/van Gyzicki 2002], S. 175). Es erscheint sinnvoll, eine getrennte Entwicklung von Clients für Notebooks, PDAs und Mobiltelefone durchzuführen, weil die unterschiedliche Hardware in Bezug auf das Display (Größe, Beleuchtungsstärke, Farbtiefe, Orientierung, Auflösung), die Rechenleistung (Prozessor, Speicher) und die verfügbaren Eingabegeräte die Möglichkeiten der Präsentation von Inhalten begrenzt. So lassen sich auf den kleinen, schlecht beleuchteten Displays von Mobiltelefonen keine längeren Texte lesen, weshalb die Inhalte in stark komprimierter Form präsentiert werden müssen. Zudem können mobile WAP-Browser meist nur 3 bis 6 Textzeilen mit 12 bis 20 Zeichen pro Zeile darstellen (vgl. [Niederst 2002], S. 541). Weiterhin wird deutlich, dass je nach Art des Clients die verschiedenen Grundsätze der Dialoggestaltung unterschiedlich stark betont werden müssen: Umfangreiche Beschreibungen oder Anleitungen zu Dialogen können auf PDAs oder Mobiltelefonen den Benutzer bei seiner Aufgabe – in unserem Fall die schnelle Aufnahme von Information – stören. Obschon also auf logischer Ebene die Kommunikation mit dem Passagier immer gleich erfolgt, benötigt die Implementierung Schnittstellen für eine große Zahl von Endgeräten, wenn das System nicht auf den Versand trivialer Kurznachrichten beschränkt werden soll.

Da die Seiten der KIIS-Clients für jeden Benutzer personalisiert sind, muss sich dieser zur Nutzung der Funktionen mit Namen und Passwort anmelden. Es besteht dabei die Möglichkeit, auch neue Benutzer – mit Mobiltelefonnummer und E-Mail-Adresse – zu registrieren.

Ist der Kunde angemeldet, kann er in einem Hauptmenü die gewünschten Informationen anfordern. Dazu zählen Nachrichten über Streckensperrungen und Ausfälle oder Verspätungen einer bestimmten Verbindung. Zudem kann er Fahrten zu seinen persönlichen Buchungen hinzufügen, indem er Start- und Zielbahnhof sowie Datum und Abfahrtszeit angibt, wobei er durch eine Eingabehilfe zur Auswahl der richtigen Stationen unterstützt wird. Daraufhin wird mit diesen Informationen eine Fahrplananfrage durchgeführt, wobei alle Verbindungen, die innerhalb einer Stunde vor oder nach dem angegebenen Termin stattfinden, in Tabellenform präsentiert werden. Die Darstellung hängt dabei vom Client ab. Wählt der Benutzer eine Verbindung aus, wird sie zu seinen persönlichen Buchungen hinzugefügt. Letztere können ebenfalls von dieser Stelle aus verwaltet werden.

Bonuspunkte werden bei Verspätungen und Ausfällen von Verbindungen verteilt. Dazu muss der Benutzer seine Fahrkartenummer eingeben, welche mit einer Liste von berechtigten Nummern verglichen wird. Eine berechtigte Nummer wird nach der Einlösung aus der Liste entfernt.

Die drei Client-Kategorien weisen spezifische Besonderheiten auf, die bei der Implementierung zu berücksichtigen sind. Die wenigsten Einschränkungen in der Programmierung hat

der Notebook-Client; auch hier sind jedoch zumindest verschiedene Browserversionen zu berücksichtigen.

Der PDA setzt wegen der kleineren Auflösung auch kleinere Informationseinheiten voraus. Lassen sich nicht alle Details auf einer Bildschirmseite darstellen, sollte bspw. eher ein vertikaler statt eines horizontalen Bildlaufs gewählt werden; im hier implementierten System ist z.B. die Darstellung von Tabelleninhalten betroffen. Anders als die Clients von Notebook und Pocket PC werden die Inhalte für das Mobiltelefon in WML-Dokumenten aufbereitet.

Das eigentliche Dokument beinhaltet mehrere WML-Seiten, die als Karten („Cards“) bezeichnet werden. Das gesamte Dokument ist demnach ein Kartenstapel („Deck“). An das Endgerät wird beim Zugriff jeweils der komplette Kartenstapel übermittelt, damit Ladezeiten bei einem Kartenwechsel entfallen. Dabei ist zu beachten, dass die einzelnen WML-Dokumente einen gewissen Umfang nicht überschreiten dürfen: Gerade ältere Mobiltelefone können keine WML-Dateien mit mehr als 1400 Byte Umfang verarbeiten (vgl. [Niederst 2002], S. 542). Dies führt zu Problemen bei Datenbankabfragen, deren Ergebnisumfang stark variiert. So kann eine Fahrplanauskunft durchaus ein Ergebnis hervorbringen, das die Grenze von 1400 Byte überschreitet. In diesem Fall müssen die Daten auf mehrere Dokumente verteilt werden.<sup>185</sup>

#### V.2.4.2 Design der Clients

Der Einstieg ins KIIS erfolgt jeweils durch das Einloggen mit Benutzername und Passwort. Neukunden können sich ebenfalls hier registrieren. Abbildung 57 zeigt die Startseite für zwei der Clients.

Bereits hier werden die Unterschiede in der Darstellung deutlich: Während beim PDA Texte zur Erläuterung noch möglich sind, können beim Mobiltelefon nur die nötigsten Informationen dargestellt werden. Ein weiteres Problem bei letzterem ist die unterschiedliche Darstellungsweise von WML-Seiten durch verschiedene WAP-Browser. Die Abbildung verdeutlicht dies: Während der Openwave UP.Simulator 4.1.1 (oben) auf den Seitentitel aus Platzgründen verzichtet, stellt der der Nokia Mobile Browser 3.01 ihn dar. Diese Unterschiede sind exemplarisch für diese Art von Endgerät.

---

<sup>185</sup> Eine weitere Besonderheit in diesem Zusammenhang ist die Eingabe des Passwortes bei der Anmeldung durch den Benutzer. Während bei den anderen Clients die Zeichen als Sterne maskiert werden, um vor der Ausspähung bei der Eingabe zu schützen, ist dies beim Mobiltelefon nur auf den ersten Blick sinnvoll: Ohne Feedback im Display ist es zum einen extrem schwierig, unter Verwendung einer Mobiltelefon-Tastatur eine Reihe von Buchstaben zu schalten (vgl. [Krutwig/Tolksdorf 2001], S. 62), zum anderen kann die Gefahr der Ausspähung bei den verhältnismäßig kleinen Displays vernachlässigt werden.

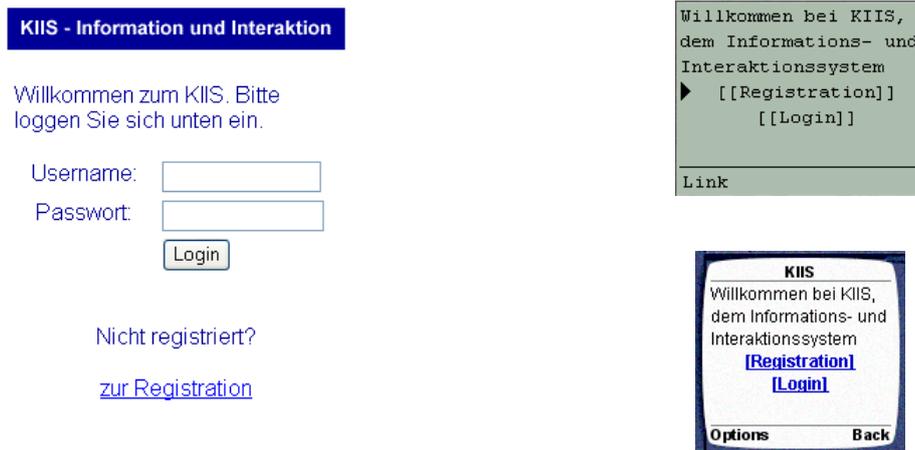


Abbildung 57: Startseiten KIIS auf PDA und zwei verschiedenen WAP-Browsern (Openwave [oben] und Nokia)

Die Screenshots in Abbildung 58 sind exemplarische Seiten aus den verschiedenen Clients und sollen die unterschiedlichen Navigationsarten und Darstellungsweisen veranschaulichen.



Abbildung 58: Die Buchungsseiten des KIIS in verschiedenen Clients

Die Notebook-Version hat eine eigene Navigationsleiste, mit der die verschiedenen Bereiche des KIIS aufgerufen werden können. Gebuchte Verbindungen werden in Tabellenform aufgeführt, darunter finden sich Eingabefelder zum weiteren Hinzufügen. Im Gegensatz dazu wird auf Pocket PC und Mobiltelefon jeweils nur ein Datensatz angezeigt; zwischen Datensätzen kann mit den Pfeilen darunter gesprungen werden. Am oberen Bildschirmrand bleibt Platz für eine Navigationsleiste, die beim Mobiltelefon entfallen muss.

### V.2.4.3 Administration und Test des KIIS

Zu den Funktionen des KIIS gehört das automatische Versenden von Nachrichten über Verspätungen von Verbindungen und alternative Routen mittels E-Mail oder SMS/MMS. Als Auslöser einer solchen Nachricht dient dabei das Eintreffen einer signifikanten Verspätung (in dieser Implementierung 3 Minuten), die vom in Kapitel III beschriebenen System simuliert oder vom Administrator zu Testzwecken manuell eingegeben wird. Wird eine relevante Störung wahrgenommen, wird der Algorithmus in Tabelle 34 zur Benachrichtigung in Gang gesetzt. Die dort angegebenen Punkte umfassen nur die wichtigsten Schritte der Prozedur.

Tabelle 34: Pseudocode für Benachrichtigungsalgorithmus

**Eingabe:** Fahrplandatensatz

**Algorithmus:**

1. Füge neue Istzeit in Datenbank ein
2. Wenn aktuelle Fahrt eine Abfahrt:
  - 2.1 Wähle alle Benutzer aus der Datenbank, die die Fahrt gebucht haben
  - 2.2 Generiere Liste von zu Bonuspunkten berechtigten Fahrkartennummern
  - 2.3 Für jeden Benutzer:
    - 2.3.1 Lese Mobiltelefonnummer/E-Mail-Adresse aus
    - 2.3.2 Sende SMS-/E-Mail-Benachrichtigung
3. Wenn aktuelle Fahrt eine Ankunft:
  - 3.1 Wähle alle Benutzer aus der Datenbank, die die Fahrt gebucht haben
  - 3.2 Generiere Liste von zu Bonuspunkten berechtigten Fahrkartennummern
  - 3.3 Für jeden Benutzer:
    - 3.3.1 Lese Mobiltelefonnummer/E-Mail-Adresse aus
    - 3.3.2 Wähle alle Benutzer, die vom Ankunftsort eine ausgehende Verbindung gebucht haben (Anschlusszüge)
      - 3.3.3 Für jeden Benutzer:
        - 3.3.3.1 Vergleiche Abfahrtszeit der ausgehenden Verbindung mit neuer Ankunftszeit
        - 3.3.3.2 Berechne alternative Züge/Zugfolgen
        - 3.3.3.2 Sende SMS/E-Mail-Benachrichtigung, falls Abfahrtszeit > Ankunftszeit mit Hinweis auf spätere Ausweichzüge
4. Rückkehr zum Test-Client

Der Prototyp schreibt die SMS- und E-Mail-Benachrichtigungen zum Testzweck zusammen mit weiteren Protokollinformationen in eine Textdatei. Diese Nachrichten sind abhängig von der Art der aktuellen Fahrt (Abfahrt, Ankunft) und von den daraus ermittelten Conse-

quenzen für den Kunden. Im Fall eines verpassten Anschlusses wird ein Hyperlink in die E-Mail eingefügt, der den Reisenden in das KIIS einloggt und mögliche Ausweichrouten präsentiert. Diese können von dort direkt gebucht werden. Bei Mobiltelefonen funktioniert dieses Vorgehen nicht unbedingt, da oftmals keine E-Mails von diesen empfangen oder gesendet werden können und das Einfügen von Hyperlinks in eine SMS nicht möglich ist.

### **V.3 Prototypische Implementierung im realen IT-Umfeld der Bahn: E-Info**

Eines der wichtigsten Zielkriterien für diese Arbeit war die Realisierbarkeit des konzipierten Systems nicht nur im Rahmen prototypischer Implementierungen unter Laborbedingungen, sondern vielmehr im realen Umfeld bei der Deutschen Bahn AG.

Bisher wurde gezeigt, dass die Architektur belastbar und flexibel ist und dass Dispositionsstrategien evaluiert werden können. Der Beweis, dass auch reale Daten in Kontext der Systemumgebung der Bahn Verwendung finden können, wurde schon zu Beginn des Dissertationsvorhabens im Rahmen des Testsystems „E-Info“ erbracht. Dieses System wurde im Rahmen eines Kooperationsprojekts mit der DB Systems (damals noch TLC GmbH) entwickelt, sodass die prinzipielle Tauglichkeit einiger der implementierten Bestandteile in der Praxis unter Beweis gestellt werden konnte.

E-Info wurde als reines Informationssystem für Kunden, d. h. ohne Betrachtung der Disposition, realisiert und an reale Datenströme angeschlossen: Die zur Passagiersteuerung notwendigen Informationen stammten aus einem WWW-basierten Einbuchungssystem; die Störungsmeldungen kamen aus dem RIS-Datenstrom der Deutschen Bahn AG. Das System war zu damaligen Zeitpunkt in der Lage, Verspätungen der einzelnen Züge nach vorgegebenem Schema und nach Überschreitung eines speziellen Schwellenwertes per SMS an Reisende zu verschicken, um diese über die aktuelle Verkehrslage zu informieren. Dabei war der Schwellenwert aufgrund von Unsicherheiten in den eintreffenden Daten und zur Vermeidung zu vieler SMS an einzelne Reisende relativ hoch gewählt worden: Es sollten nur tatsächlich relevante Verspätungsänderungen herausgefiltert und weitergeleitet werden.

Die Berechnung alternativer Routenvorschläge war zum damaligen Zeitpunkt noch nicht vorgesehen, so dass sich das System vorzugsweise an Pendler bzw. an Reisende ohne Umstieg auf ihrer Route richtete, die auf diese Weise ihre Züge „überwachen“ konnten.

Die „Bestellung“ dieses Services erfolgte für interessierte Reisende – der Prototyp wurde auf einer Touristikmesse vorgestellt – über ein auf der Groupware „Lotus Notes“ von IBM basiertes Internetportal, welches speziell für diese Anwendung entwickelt worden war und die spezifischen Daten eines Reisenden (vornehmlich die zu überwachenden Züge sowie die Mobiltelefonnummer) in einer Datenbank ablegte. Ein spezieller Agent initiierte rechtzeitig vor Start der Reise Passagieragenten im System, deren Aufgabe es war, die für den zugehörigen *realen* Passagier wichtigen Zuglagenänderungen aus dem RIS-Datenstrom zu extrahieren und ihrem Passagier ggf. nach dem Push-Prinzip über ein SMS-Gateway in Kenntnis zu setzen. Die erhobenen Passagierinformationen wurden nicht weiter im Dispositionsprozess verwen-

det, zum einen weil es viel zu wenige Passagiere waren, zum anderen weil die Disposition explizit nicht im Projektfokus lag. Allerdings wurden schon im damaligen Projekt Grundlagen für den Passagierrouter gelegt.



# VI Schlussbetrachtungen: Chancen und Risiken kundenorientierter Disposition

*Es gibt keine reine Wahrheit, aber ebenso wenig einen reinen Irrtum*

Friedrich Hebbel, Tagebücher

Es bleibt letztlich offen, ob das hier konzipierte und prototypisch implementierte System praktische Relevanz erlangen kann – und sei es nur als Ideenlieferant für die weitere Forschung bei der und für die Bahn. Es sollen jedoch abschließend wenigstens Hinweise gegeben werden, was bereits getan wurde, wie ein solches System schrittweise einzuführen wäre und was dabei zu beachten, zu testen und zu erforschen ist. In den folgenden Abschnitten wird dies beschrieben.

## VI.1 Zusammenfassung

Aus ökonomischen und ökologischen Erwägungen heraus betrachtet, ist eine der wichtigsten Aufgaben eines intelligenten Verkehrsmanagements die Stärkung des schienengebundenen Personenverkehrs gegenüber dem Individualverkehr. Es gilt, die Attraktivität der Bahn mit dem Produkt „Zugfahrt“ zu steigern. Eine Möglichkeit dazu ist die Erhöhung der Servicequalität durch verbessertes Informationsmanagement. Während die Kommunikation mit dem Kunden vor der Reise weitestgehend optimiert ist, ist sie während der Reise verbesserungswürdig: im jetzigen Bahnsystem ist es für Kunden fast unmöglich, zur richtigen Zeit an beliebigen Orten an die für sie direkt relevanten Informationen zu kommen, obwohl diese durchaus vorliegen.

Mit der vorliegenden Dissertationsschrift wird eine neue Methode des Kundenbeziehungsmanagements für den schienengebundenen Personenverkehr vorgestellt: die kundenorientierte Disposition. Es handelt sich dabei um Methoden, die, statt die Pünktlichkeit eines Zugs in den Mittelpunkt zu stellen, die Pünktlichkeit der Reisenden als primäres Ziel betrachten.

Die kundenorientierte Disposition setzt dabei auf zwei Ebenen ein. Erstens werden darunter Strategien verstanden, welche unvermeidbar auftretende Konflikte, zumeist Anschlusskonflikte, im Bahnnetz im Sinne des Kunden aufzulösen versuchen. Einher geht zweitens die Disposition der Kunden selbst unter Zuhilfenahme vorhandener mobiler Kommunikationsendgeräte.

In der vorliegenden Arbeit wurde zum Beweis der Sinnhaftigkeit eine aus intelligenten Agenten modellierte Systemarchitektur und, gleichsam zur Demonstration des Verfahrens, ein Softwaresystem für die kundenorientierte Disposition in großen Bahnnetzwerken konzipiert und prototypisch umgesetzt. Ergänzend musste ein Simulationssystem für den fahrplangebundenen Schienenverkehr erstellt werden, welches für das Dispositionssystem ein Surrogat für das Realsystem der Deutschen Bahn darstellt.

Zunächst wurden dazu in Kapitel II alle Bestandteile der Disposition auf theoretischer und praktischer Ebene untersucht, um Anforderungen an ein Informations- und Kommunikationssystem in Form eines Entscheidungsunterstützungssystems für die kundenorientierte Disposition herzuleiten. Dabei wurden insbesondere die Gegebenheiten bei der Deutschen Bahn AG betrachtet. Zusammengefasst ergibt sich:

Seit die DB AG mit der Bahnreform 1994 in ein privatwirtschaftliches Unternehmen umgewandelt wurde, hat sich im Unternehmen viel verändert. Die Neuorganisation zwang die Bahn verstärkt zum wirtschaftlichen Handeln und somit insbesondere zu einer strengen Ausrichtung an den Bedürfnissen des Kunden. Letzteres impliziert vor allem Umgewichtung der Kriterien, die maßgeblich für die Ausgestaltung der Produkte und Prozesse eines Unternehmens sind. Dabei sind die Optimalität eines Fahrplans, wie auch immer definiert, oder die Sicherheit der Durchführung nur Nebenkriterien der Kundenzufriedenheit, weil der Produktionsplanungsprozess der Bahn eigentlich auf dem Beförderungsbedürfnis der Kunden fußt. In jedem Planungsschritt existieren Zielkriterien, die unmittelbar an Kundenbedürfnissen ausgerichtet sind. So berücksichtigt die Linienplanung bspw. den Kunden, indem verschiedene Produktkategorien mit unterschiedlichen Qualitäten angeboten werden, die (zugweise) Fahrplanung orientiert sich direkt an möglichen Übergangszeiten, welche die Kunden zum Umstieg benötigen, etc. Lediglich im Rahmen der Disposition steht der Kunde aus mehrerlei Gründen augenscheinlich nicht mehr im Mittelpunkt, vielmehr existiert eine Reihe diffuser Regelungen, welche den Verkehr flüssig halten oder die Folgen einer Verspätung eindämmen sollen und die damit nur implizit auf die Bedürfnisse des Kunden eingehen. Daraus resultiert die Notwendigkeit der kundenorientierten Disposition. Selbstverständlich müssen dabei aufgrund technischer und wirtschaftlicher Restriktionen (mitunter deutliche) Abstriche gemacht werden.

Die Produktpalette im Personenverkehr wird dabei traditionell durch den Fahrplan festgelegt, der unter Verwendung eines (physischen) Streckennetzes durch Verknüpfung verschiedener Zugfahrten ein virtuelles Anschlussnetz für Passagiere definiert, mithin die Gesamtheit der möglichen Reisen innerhalb eines gegebenen Fahrplans. Dieser wiederum unterliegt aufgrund unvermeidbar eintretender Störungen während der Durchführung einer hohen Dynamik, welche kennzeichnend und maßgeblich für einen Teil der wahrgenommenen Produktqualität ist, da aus Störungen Verspätungen resultieren können, die sich ihrerseits durch das komplette Netz propagieren können. Die für Reisende wichtigsten Konfliktarten sind Verspätungs- und Anschlusskonflikte, welche letztlich ebenfalls Verspätungen induzieren. Damit wird das Management der Verspätungen im Rahmen der Disposition für Passagiere zu einem wichtigen, die Kundenzufriedenheit stark beeinflussenden, Faktor, was im derzeitigen Dispositionsprozess jedoch nur in geringem Maße berücksichtigt wird.

Im Anschluss an die theoretische Betrachtung der Disposition wurde die praktische Umsetzung bei der Deutschen Bahn AG beleuchtet, bspw. wurden die verschiedenen organisatorischen und technologischen Bestandteile der Dispositionsstruktur der Bahn betrachtet und am Beispiel beschrieben.

Abschließend wurden Anforderungen an ein System zur kundenorientierten Disposition, sowohl aus Sicht des Bahnbetreibers, als auch aus Sicht des Kunden definiert.

Ausgehend von den Erkenntnissen aus der Analysephase wurde in Kapitel III ein auf der Technologie intelligenter Softwareagenten basiertes, dezentrales System für die kundenorientierte Disposition konzipiert. Zuerst wurde das Testsystem „TrainSim“, ein flexibel einsetz- und skalierbares Simulationssystem für den Schienenverkehr vorgestellt, ebenfalls wurde gezeigt, wie die zugrunde liegenden Testdaten generiert wurden. Anschließend wurde eine verteilte, modulare, skalierbare und leicht zu erweiternde Systemarchitektur vorgestellt. Deren Hauptbestandteile sind mehrere Arten von Agenten: Disponenten, die durch Anwendung von Dispositionsstrategien Züge und Passagiere derart durch das Netz lenken, dass die Verspätung der Passagiere unter Beachtung verschiedener Zielkriterien minimiert wird. Passagierrouter, die Reisende im Falle verpasster Anschlüsse mit einer neuen Route auf dem dynamischen Netzwerk versorgen, Züge, die selbständig Sicherheitsabstände einhalten, und Reisende, die sich im Netzwerk in dem Sinne proaktiv verhalten, als dass sie versuchen, ihre Prinzipale, d. h. menschliche Reisende, pünktlich an das gewünschte Ziel zu bringen. Die Funktionsfähigkeit der vorgestellten Architektur wurde in den nachfolgenden Kapiteln unter Beweis gestellt: Das komplette System wurde unter Zuhilfenahme der Simulationstestumgebung mit einer realistischen Anzahl Passagiere auf dem Originalfahrplan der Deutschen Bahn AG getestet.

Um dem ersten Anliegen der kundenorientierten Disposition Rechnung zu tragen, wurden in Kapitel IV (bahnseitige) Dispositionsstrategien, die speziell die Pünktlichkeit von Passagieren berücksichtigen, entwickelt und im System integriert. Vorgeschlagen wurden einige einfache Dispositionsheuristiken, ein Verfahren zur Simulation verschiedener Strategien im laufenden Betrieb sowie ein mathematisches Modell zur (Online-) Optimierung von Dispositionsentscheidungen in einem Realitätsausschnitt im Bahnnetz. Als Bewertungsmaßstab für die Güte einer Dispositionsentscheidung wurde dabei jeweils die gewichtete, ungeplante Passagierwartezeit gewählt. Das mathematische Modell wurde anschließend zum Offline-Algorithmus modifiziert, sodass damit – mit gewissen Einschränkungen – alle anderen denkbaren Strategien einem Gütetest unterzogen werden können.

Während zahlreicher Simulationsläufe mit verschiedenen Strategien in der „virtuellen“ Bahnumgebung „TrainSim“ konnten zusammengefasst folgende Beobachtungen gemacht werden:

Das komplette System inkl. der umgebenden Simulation kann bei Verwendung einfacher Dispositionsstrategien und ohne Passagierrouter in wenigen Stunden den Fahrplan eines ganzen Tages (24 h) durchrechnen. Dieser umfasst über 700.000 Ereignisse. Dabei werden ca. 3.000.000 Passagiere berücksichtigt, die sich durch das Bahnnetz bewegen. Bei der Verwendung komplexerer Dispositionsstrategien kann sich die genannte Zeitspanne dramatisch erhöhen. Der Passagierrouter erweist sich zwar als Engpass im Vergleich zu einfachen Dispositionsstrategien, beweist aber seine prinzipielle Tauglichkeit im Echtzeiteinsatz: Selbst aufwän-

dige Strategien können mindestens in Echtzeit ausgeführt werden. Der Einsatz leistungsfähiger Hardware würde folglich auch What-If-Analysen ermöglichen.

Überdies zeigte sich, dass einige der getesteten Strategien trotz ihrer Einfachheit unter den gegebenen Annahmen bessere Ergebnisse zeitigen als die bisher in der Praxis eingesetzten Strategien Globale Regelwartezeiten oder Niemals Warten, wenngleich die Regelwartezeiten durchaus eine brauchbare Dispositionsstrategie zu sein scheinen. Eine relativ simple, aber im Normalfall bessere Heuristik ist z. B. der Vergleich der Zahl der in einem Zug sitzenden Passagiere mit der Zahl der auf diesen Zug am nächsten Bahnhof wartenden Reisenden. Ist die erste Zahl wesentlich höher, sollte ein Abbringer warten.

Die Dispositionsstrategie mathematische Optimierung liefert für kleine Netzausschnitte und unter bestimmten, vereinfachenden Annahmen sehr gute Ergebnisse mit Antwortzeiten im Sekundenbereich. Bei dem in dieser Arbeit verwendeten Modell wird die Anzahl der Variablen und Restriktionen jedoch sehr schnell viel größer, sodass der Online-Einsatz dieser Strategie in den meisten Fällen zu keinem Ergebnis führen wird.

Die Simulation als Dispositionsstrategie ist fast immer ausreichend schnell, um verschiedene einfache Heuristiken vorsimulieren und somit evaluieren zu können. Es empfiehlt sich demnach für die Praxis, eine Simulationskomponente zur Disposition einzusetzen, zumal der Aufwand dazu nicht allzu hoch erscheint, der Nutzen aber – insbesondere zur Schulung im Umgang mit verschiedenen Dispositionsstrategien – immens ist.

Alle Simulationsläufe wurden auf vergleichsweise veralteten Rechnern durchgeführt, die Laufzeiten werden sich bei Einsatz heute gängiger Hardware noch eher verringern. Kernaussage der bisherigen Experimentation ist demzufolge, dass das entwickelte System allen Leistungsanforderungen genügt: Auf relativ wenigen handelsüblichen PCs kann das Dispositionssystem das komplette Deutsche Bahnnetz zumindest nach einfachen Strategien steuern.

Im folgenden Kapitel V wurden schließlich die Information und die Steuerung von Reisenden betrachtet. Dazu wurden zunächst die Möglichkeiten und Beschränkungen verfügbarer mobiler Kommunikationstechnologien diskutiert und mittels eines internetbasierten Kundeninformations- und –interaktionssystems exemplarisch aufgezeigt.

Insgesamt zeigt sich, dass das entwickelte System allen gesetzten Zielen und den gegebenen Anforderungen gerecht wird. Alle Komponenten sind leistungsfähig, und das Gesamtsystem ist belastbar genug, um ggf. auch realen Anforderungen gerecht zu werden. Auch in der Praxis wurde die Funktionsfähigkeit des vorgestellten Systems in einem Kooperationsprojekt ebenfalls schon bewiesen: zusammen mit der damaligen TLC AG wurde ein auf den aktuellen Informationen aus dem Bahnnetzwerk operierendes Informationssystem für Pendler auf SMS-Basis entwickelt und in einem Feldversuch getestet.

## **VI.2 Aspekte der Realisierung im Bahnsystem**

Abschließend bleibt zu klären, inwieweit das in dieser Arbeit vorgelegte System in die Systemumwelt der Deutschen Bahn AG integriert werden kann. Dabei stehen der prinzipiellen technischen Machbarkeit – die zugrunde liegenden Datenstrukturen in quasi allen entwi-

ckelten Teilsystemen mit den bei der Bahn eingesetzten identisch oder sehr leicht anzupassen – organisatorische Probleme entgegen. Vor allem ist zu klären, ob ein solches System überhaupt kostendeckend arbeiten kann. Im Anschluss werden einige Wirtschaftlichkeitsaspekte betrachtet, um darauf basierend einen risikoarmen Weg der Implementierung vorzuschlagen.

### **VI.2.1 Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen**

Das zuvor beschriebene E-Info-System wurde nach einer gewissen Testphase aufgrund wirtschaftlicher Restriktionen nicht weiter verfolgt. Dieses lag zum einen an den relativ hohen Kosten, die ein Hosting der benötigten Hardware (damals 3-5 durchschnittlich ausgestattete PCs) bei der Bahn AG verursacht hätte. Zum anderen wurden zu hohe laufende Kosten durch den Versand von SMS als Grund genannt; beides zusammen wurde auf etwa 1,2 Mio. DM per anno beziffert. Diese Summe erscheint im Vergleich zu Infrastrukturinvestitionen in Milliardenhöhe zwar sehr niedrig, wurde zum damaligen Zeitpunkt angesichts einer nicht gesicherten Akzeptanz unter den Reisenden und fehlender Einnahmen zur Deckung der entstehenden Kosten als zu hoch erachtet. Das Problem im eigentlichen Sinne bestand darin, dass kein geeignetes Micro-Payment-System zur Abrechnung dieses Services, d. h. zur Weitergabe der Kosten an die Kunden, zur Verfügung stand.

Dieser Misstand ist heute behoben: Bspw. könnten WWW-gestützte Bezahlssysteme wie Firstgate<sup>186</sup> oder PayPal<sup>187</sup> zur Abrechnung solcher Kleinsummen verwendet werden. Denkbar wäre auch, den Service über eine kostenpflichtige Telefonnummer aktivieren zu müssen. Die einfachste Art wäre ein simpler Aufschlag beim ohnehin im Internet oder am Schalter durchgeführten Ticketverkauf, wenn ein Kunde den Service nutzen möchte. All dies wäre bei einer WWW-basierten Einbuchung in das System keine Schwierigkeit und hätte zur Folge, dass Systeme wie E-Info als reines Informationssystem bzw. das hier entwickelte System zur kundenorientierten Disposition refinanzierbar wären. Inwieweit, hängt natürlich von den Kosten einer jeweiligen Realisierungsoption ab, von denen drei im folgenden Abschnitt vorgestellt werden.

### **VI.2.2 Einführungsstrategien**

Die technische Möglichkeit einer Umsetzung in die Praxis wurde in vorangegangenen Kapiteln plausibel gemacht. Geht es nun für die Bahn darum, Investitionsentscheidungen zu treffen, sollten wirtschaftliche und organisatorische Risiken im Entscheidungsprozess Berücksichtigung finden. An dieser Stelle sollen eventuell gangbare Möglichkeiten zur Umsetzung aufgezeigt werden, die auf den Erfahrungen des Autors im Entwicklungsprozess beruhen.

---

<sup>186</sup> FIRSTGATE ist ein Online-Zahlungssystem speziell für die Anweisung von Kleinsummen (vgl. <http://www.firstgate.de>).

<sup>187</sup> PayPal ist das Online-Zahlungssystem des Internet-Auktionshauses EBAY (s. <http://www.ebay.de>). Nähere Informationen zu PayPal sind unter <http://www.paypal.de> zu finden.

### VI.2.2.1 Erweiterung von KIIS oder E-Info

Das E-Info-System stellt mit der zusätzlichen Option des Passagierrouters, sowie einer Erweiterung der Interaktionsmöglichkeit mit Passagieren, z. B. durch MMS bzw. clientseitige Anwendungen, eine interessante und kostengünstige Realisierungsvariante dar: Die reine Information von Kunden erfordert zunächst keine Änderungen des Dispositionsablaufs und der –organisation der Bahn. Eine solche Architektur sollte also in einer Basisspezifikation, bspw. mit einer Hardwareausstattung, die einige zehntausend Reisende pro Tag erreichen kann, realisiert werden. Dies ist nach Erfahrung des Autors mit wenigen handelsüblichen PCs zu leisten<sup>188</sup>. Selbstverständlich müssen Produktivsysteme der Bahn anderen Anforderungen bezüglich Ausfallsicherheit und Performanz genügen, als es die prototypische Version musste, woraus die hohen Unterhaltungskosten resultierten, die zum Scheitern von E-Info führten<sup>189</sup>.

Ein solches System kann nach Meinung des Autors sehr wohl wirtschaftlich betrieben werden. Beispiel: Bleiben (Neu-) Entwicklungskosten unberücksichtigt, da sie bei Verwendung bereits existenter Komponenten gegenüber den Unterhaltungskosten auf Dauer kaum ins Gewicht fallen, werden die Unterhaltungskosten des Systems per anno auf eine Mio. Euro veranschlagt und wird zusätzlich eine gesendete SMS/MMS mit 2 Cent berechnet, dann könnte bei einem Verkaufspreis von nur 40 Cent pro Kunde das System ab ca. 5 Mio. Nutzern pro Jahr (bei sehr hoch kalkulierten 10 SMS/Nutzer) die laufenden Kosten decken können. 5 Mio. Passagiere entsprechen ca. 3 % des gesamten Passagieraufkommens der Bahn oder ca. 14.000 Passagieren pro Tag.

Dies scheint nach Meinung des Autors keine unrealistische Zielgröße für die absolute Zahl an Benutzern zu sein. Natürlich kann an dieser Stelle keine vollständige Risikoanalyse erfolgen, ebenfalls sind die Entwicklungskosten – selbst die Vorarbeiten dieser Thesis vorausgesetzt – nicht klein; ein solches Projekt kann jedoch, wie die Erfahrung mit E-Info zeigt, schon in wenigen Personenjahren realisiert werden, sodass die Entwicklungskosten tragbar erscheinen, selbst wenn der Worst-Case angenommen wird. Zudem sollten der angesprochene Marketing-Aspekt und die Möglichkeit, Mitteilungen und Werbebotschaften auch von Fremdfirmen refinanzieren zu lassen, bei Kostenrechnungen Berücksichtigung finden.

### VI.2.2.2 Aufnahme der vorhandenen Passagierinformation in die Disposition

Die zweite Ausbaustufe umfasst, sollte sich die erste als erfolgreich herausstellen, eine Nutzung der über die Einbuchung und die Passagierverfolgung/Ortung vorliegenden Daten für die Disposition, d. h., die Betriebszentralen würden mit Passagierinformationen versorgt. Auch können in dieser Phase einige geeignete Dispositionsstrategien aus dieser Arbeit getestet werden, um die Entscheidungsfindung für den Disponenten zu vereinfachen.

---

<sup>188</sup> E-Info lief auf 3-4 Rechnern, die nach heutigem Stand der Technik eher spärlich ausgestattet waren.

<sup>189</sup> Anzumerken ist, dass die Unterhaltungskosten für von der Bahn gehostete Hardware vergleichsweise hoch sind. Es existieren Provider auf dem freien Markt, die gleichen Service bei gleichen Leistungen zu weitaus geringeren Preisen anbieten.

Diese Option würde zunächst nur Kosten verursachen, da sie ggf. zusätzliche Hardware in den Betriebszentralen nötig macht. Auf der anderen Seite können jedoch die Passagiere dann wesentlich besser in die Dispositionsentscheidung involviert werden als bisher, was in jedem Fall zu einer Erhöhung der Kundenzufriedenheit führen wird. Dies hat insbesondere durch die freiwillige Selbstverpflichtung der Bahn zu Entschädigungsleistungen an Bedeutung gewonnen: die kundenorientierte Disposition spart offensichtlich sogar Geld, weil Passagiere im Schnitt weniger lang warten müssen oder Ihre Anschlüsse nicht verpassen. Quantitative Aussagen über Gewinn- und Verlustwahrscheinlichkeiten können an dieser Stelle jedoch nicht getroffen werden.

### VI.2.2.3 Vollständige Passagierlenkung durch flankierende organisatorische Maßnahmen

In der dritten und letzten Ausbaustufe steht folgerichtig die vollständige Erfassung der Passagiere an, was jedoch größere organisatorische Änderungen vonnöten macht. Realisierbar wäre die Erfassung bspw. über RFID<sup>190</sup>-Chips (vgl. [RFID 2005]) in Fahrkarten, die automatisiert beim Einstieg oder manuell vom Zugbegleiter gescannt werden, und die am besten personalisiert verkauft werden sollten (bspw. könnten die BahnCard-Daten des Reisenden gleich encodiert werden; bei Online-Tickets ist dies schon heute der Fall.) Die von den Passagieren, die es wünschen, hinterlegte Kontaktart kann dann wie in Stufe zwei während der Reise unterstützt werden. Auf diese Weise würden der Disposition quasi alle Reiserouten bekannt, und die kundenorientierte Disposition könnte so, wie sie als Maximalkonzept in dieser Arbeit vorgestellt wurde, beginnen.

Nach Meinung der Autoren muss dieser Vorschlag keine „Zukunftsmusik“ sein: Bspw. gelegt es Transportdienstleistern jeden Tag, Millionen von Gütern durch ihr Logistiknetz zu schleusen und dabei zu jedem Zeitpunkt zu wissen, wo sich ein Gut gerade befindet. Zwar entwickeln diese Güter kein Eigenleben (und sind in diesem Sinne leichter zu kontrollieren als Passagiere), und die Gefahr des „Schwarzfahrens“ ist fast auszuschließen, trotzdem sollten solche oder ähnliche Konzepte in leicht abgewandelter Form auf die Bahn übertragen werden können.

Natürlich sind viele Abwandlungen dieses Vorgehens denkbar. Auch ist Stufe n keine Voraussetzung für Stufe n+1, da kundenorientierte Disposition prinzipiell auch ohne Information der oder Interaktion mit Kunden möglich wäre, genau dann nämlich, wenn alle Reiserouten bekannt wären. Immerhin kann jedoch auf die vorgestellte Weise die grundsätzliche Akzeptanz der Kunden durch das System getestet werden, ohne dass dabei prohibitiv hohe Kosten entstünden. Im Gegenteil würde wirtschaftlicher Erfolg auf Stufe eins weitere Ausbaustufen gleichsam vorfinanzieren.

Selbstverständlich sollte innerhalb der einzelnen Stufen ein inkrementelles und iteratives Vorgehen gewählt werden: Bspw. sollte auf Stufe eins zunächst die einfachste und am weitest-

---

<sup>190</sup> RFID steht für *Radio Frequency Identification* und zählt zu den automatisierten Identifikationstechniken. Radiowellen werden dazu benutzt, eindeutige Kennnummern zu versenden.

ten verbreitete Kommunikationsart, die simple SMS, unterstützt werden, um anschließend kompliziertere Arten der Kommunikation zu implementieren, die ihrerseits wieder sehr viel weitergehende Serviceleistungen ermöglichen. Weiterhin sollte parallel zur Einführung des Systems, d. h. im Idealfall mit stark verbessertem Datenmaterial der Prozess der Fahrplanerstellung, der der Disposition vorgelagert ist, iterativ verbessert werden um die dort brachliegenden Optimierungspotenziale zu heben und die Planungsqualität nachhaltig zu erhöhen.

### VI.3 Forschungsbedarf

Obwohl die Ziele der vorliegenden Arbeit voll erfüllt sind, bleiben einige Punkte offen, die im Sinn einer besseren Absicherung gegen eventuell auftretende Risiken einer noch genaueren Betrachtung zu unterziehen wären, bevor die kundenorientierte Simulation realiter implementiert werden sollte.

*Technologische Probleme:* Auf technischer Seite muss weiter an der exakten Erfassung aller Systementitäten gearbeitet werden. Insbesondere sollten langfristig tatsächlich alle Züge automatisiert und präzise geortet werden können, damit keine Informations-Inkonsistenzen entstehen. Auch die Erfassung und Verfolgung der Passagiere fällt unter diesen Punkt. Beste Voraussetzung für die kundenorientierte Disposition wäre, zu jedem Zeitpunkt den Aufenthaltsort jedes Passagiers, der dies wünscht, zu kennen. Dafür sind allerdings weitergehende organisatorische Eingriffe vonnöten.

*Architektur des Systems:* Zur leichteren Übertragbarkeit auf die Realität könnten verschiedene, miteinander agierende Disponententypen entworfen werden, die bspw. den Nah-, Regional- und Fernverkehr logisch getrennt voneinander bearbeiten. Damit einhergehen muss allerdings die Konzeption eines effizienten Verfahrens zur Konfliktauflösung zwischen verschiedenen Disponenten.

*Isomorphie des Simulationssystems:* Hauptsächlich aufgrund fehlender Daten über Passagierströme und das Art oder auch Zahl und Dauer auftretender Störungen konnte die Validität des verwendeten Simulationsmodells nicht überprüft, sondern nur plausibilisiert werden, wengleich dies mit aller Sorgfalt stattfand. Dies mag zwar genügen, um die Belastbarkeit und die grundsätzliche Anwendbarkeit zu zeigen sowie Ceteris-Paribus-Untersuchungen über Dispositionsstrategien zu machen. Trotzdem kann nicht garantiert werden, dass eine gefundene Strategie sich in der Realität genauso verhält, was aber keine Einschränkung der Architektur bzw. der Konzeption im Ganzen bedeutet.

Daher sollte die Beschaffung validen Datenmaterials bei einer Umsetzung unbedingt im Vordergrund stehen. Auch eine Verwendung des TrainSim-Systems als Testumgebung für Dispositionsstrategien sollte – wie jede andere „ernsthafte“ Anwendung des Systems – nur stattfinden, wenn ein insgesamt besseres Datenmaterial vorliegt.

Ein weiterer Aspekt ist die stärkere Beachtung eines Sicherheitslayers bzw. die Einbeziehung eines Trassenmanagements auch in der Simulation. Damit wären zwar höhere Laufzeiten verbunden, der Erkenntnisgewinn über das Realsystem aber wäre immens. Auch hierzu sind mehr und genauere Informationen über die Topologie erforderlich.

*Konstruktion von Dispositionsstrategien:* Die hier gegebenen Strategien sind aufgrund der für die Praxis unzureichenden Validierung von TrainSim nur als Empfehlungen zu sehen. „Bessere“ Strategien würden bspw. sehr viel mehr Expertenwissen in die Regelbasis integrieren; bisher ist TrainSim mehr auf die automatische Disposition ausgelegt. Es reicht also nicht aus, nur die Architektur eines Expertensystems zu integrieren, vielmehr ist dieses auch noch mit mehr Leben zu füllen.

Zur Sicherstellung eines erfolgreichen Einsatzes sind natürlich weitergehende Praxistests mit möglichst realem Datenmaterial vonnöten. Dies impliziert, dass jegliche quantitative Aussage mit einer hohen Unsicherheit behaftet ist. Entsprechende Resultate müssen genau überprüft werden und durch umfangreiche Tests über längere Zeiträume abgesichert und erweitert werden. Dabei könnten zudem durch Sensitivitätsanalysen beispielsweise optimale Parameter (z. B. in Form von zu erfüllenden Mindestquoten) für einzelne Strategien ermittelt und deren Erfolge damit noch verbessert werden. Weiterhin wären Variationen bzgl. der generierten Zugverspätungen durch Änderung der zu Grunde liegenden Verteilung sinnvoll, um Erkenntnisse darüber zu gewinnen, wie sich unterschiedlich ausgeprägte Störungsfälle auf die Ergebnisse der einzelnen Dispositionsstrategien auswirken.

Die *Kommunikation mit den Kunden* stellt als solches wie gesehen zwar keine technologische Herausforderung dar, ist jedoch im Detail noch auszuarbeiten und sehr genau zu spezifizieren. Auch die Integration in die vorhandene IT-Landschaft der Bahn ist ein nicht zu unterschätzendes Problem. Dabei stellt nicht so sehr die Technologie die Schwierigkeit dar, vielmehr ist die Erweiterung der logischen Prozesse und Verfahren eine komplexe Aufgabe.

## **VI.4 Fazit**

Mit der vorliegenden Dissertationsschrift wird eine neue Methode des Kundenbeziehungsmanagements für den Schienen gebundenen Personenverkehr vorgestellt: die kundenorientierte Disposition. Es handelt sich dabei um Methoden, die, statt die Pünktlichkeit eines Zugs in den Mittelpunkt zu stellen, die Pünktlichkeit der Reisenden als primäres Ziel betrachten.

Es wird ein vergleichsweise einfacher, kostengünstiger und auf mehrfache Art nützlicher Ansatz zu einer Fokussierung der Dispositionsaufgaben im schienenengebundenen, fahrplangesteuerten Personenverkehr in Richtung Kundenfreundlichkeit bzw. Erhöhung der Servicequalität vorgestellt.

Es wird zudem gezeigt, wie eine intelligente Unterstützung auf Basis moderner Informations- und Kommunikationstechnologien die Dispositionsqualität erhöhen und direkt den Kundennutzen steigern kann, wie ein solches Unterstützungssystem aufgebaut werden könnte, damit es unter Praxisbedingungen und im Systemumfeld der Deutschen Bahn AG funktioniert, und welche Möglichkeiten zu einem wirtschaftlichen Betrieb desselben existieren. Dazu werden Strategieempfehlungen gegeben, die dem Disponenten Möglichkeiten bieten, kundenfreundliche Dispositionsentscheidungen zu treffen sowie Schnittstellen spezifiziert, die die

Information des bzw. die Interaktion mit den Reisenden unter Zuhilfenahme mobiler Endgeräte ermöglichen.

Nichtsdestoweniger würden selbstverständlich bei einer praktischen Umsetzung Problemstellungen zu berücksichtigen sein, die in dieser Arbeit nicht antizipiert wurden; gleichwohl funktioniert das vorgeschlagene System immerhin den Zielsetzungen dieser Arbeit entsprechend, sodass die hier geschilderten Anwendungen mit dem vorhandenen System durchgeführt werden können, wenn bspw. neue reale Daten vorhanden wären. Genau dies rechtfertigt die Arbeit auch aus Sicht einiger Mitarbeiter der Deutschen Bahn AG. Selbst wenn die in der Simulation gefundenen „besseren“ Dispositionsstrategien in der Praxis nicht anwendbar oder eben nicht besser wären als die derzeitigen Heuristiken, sei schon allein der simulative Test von Dispositionsstrategien *vor* ihrem Einsatz in der Praxis eine extrem nützliche Anwendung. Zumindest muss das System demnach kein reiner Forschungsprototyp bleiben: Selbst ohne die konkrete Umsetzung der in dieser Arbeit vorgestellten Konzepte sind die entwickelten Werkzeuge wertvoll.

Alles in allem wurde demnach bewiesen, dass das vorgestellte Konzept valide ist und somit die kundenorientierte Simulation keine Vision sein muss.

# Literatur

- [Abrahamsson 1998] Abrahamsson, T.: Estimation of Origin-Destination Matrices Using Traffic Counts – A Literature Survey, Interim Report IR-98-021/May, 1998.
- [Adenso-Díaz et al. 1999] Adenso-Díaz, B.; González, M. O.; González-Torre, P.: On-line timetable re-scheduling in regional train services. In: Transportation Research 33 (Part B), 387-398, 1999.
- [Ahuja et al. 1993] Ahuja, R. K.; Magnanti, T. L.; Orlin, J. B.: Network flows: theory, algorithms, and applications. Prentice Hall, Englewood Cliffs NJ, 1993.
- [Althöfer 2005] Althöfer, I.: Multiple Choice Systems for Decision Support, [http://e-pub.uni-weimar.de/volltexte/2005/593/pdf/094p\\_Althoefer.pdf](http://e-pub.uni-weimar.de/volltexte/2005/593/pdf/094p_Althoefer.pdf). Letzter Zugriff: 06.05.2005.
- [Anderson 1998] Andersen, E. D.: Linear Optimization – Theory, methods, and extensions. Lecture Notes, Odense University, 1998.
- [Anderegg et al. 2002] Anderegg, L; Penna, P; Widmayer, P: Online train disposition: to wait or not to wait? In Dorothea Wagner (Hrsg.): Electronic Notes in Theoretical Computer Science, vol. 66. Elsevier, 2002.
- [Apache 2005] The Apache Software Foundation: <http://www.apache.org/>. Letzter Zugriff: 06.05.2005.
- [Apple 2005] Apple Computer Inc.: Apple Human Interface Guidelines; <http://developer.apple.com/documentation/UserExperience/Conceptual/OSXHIGuidelines/index.html>. Letzter Zugriff: 06.05.2005.
- [ASF 2005] The Apache Software Foundation: Logging Services, <http://logging.apache.org/log4j>. Letzter Zugriff: 06.05.2005.
- [ASIM 1988] ASIM: Simulationstechnik und Fabrikbetrieb. Tagesbericht. Gmft Gesellschaft für Management und Technologie Verlag, München, 1988.
- [Assad 1980] Assad, A. A.: Models for Rail Transportation, Transportation Research (Part A) 14, 205-220, 1980.
- [Back 2002] Back, A.: Entscheidungsunterstützungssysteme. In: Küpper, H. und A. Wagenhofer (Hrsg.): Handwörterbuch Unternehmensrechnung und Controlling, 369–374, Schäffer-Poeschel, Stuttgart, 2002.
- [Banks et al. 1996] Banks, J.; Carson, J. S.; Nelson, B. L.: Discret-Event System Simulation. 2<sup>nd</sup> Ed., Prentice Hall, New Jersey, 1996.
- [Barnhart et al. 1998] Barnhart, C.; Johnson, E. L.; Nemhauser, G. L.; Savelsberg, M. W. P.; Vance P. H.: Branch-and-Price: Column Generation for solving huge integer programs. In: Operations Research 46 (3), 316-329, 1998.
- [Baron 1995] Baron, P.: Transportation in Germany: A Historical Overview. In: Transportation Research Part A, 29/1995, 9-20, 1995.
- [Bartholomeus/Gouweloos 2005] Bartholomeus, M.; Gouweloos, M.: An estimate of the punctuality benefits of automatic operational train sequencing. Erscheint in: Lecture Notes in Computer Science; Proceedings of ATMOS04, Springer, 1 / 2005.
- [Bates 1994] Bates, J.: The Role of Emotion in Believable Agents. In: Communication of the ACM 37 (7), 122-125, 1994.
- [Baumgärtel 1999] Baumgärtel, H.: Verteiltes Lösen von Constraint-Problemen in Multiagenten-Systemen zur optimierten Planung in einer Fließfertigung. Dissertation, Technische Universität Berlin, Hundt Druck GmbH, Köln, 1999.
- [Bauersfeld et al. 2004] Bauersfeld, N.; Janssen, M. F. P.; van Alphen, G.: The SIMSPOG simulation tool: a web-based implementation. In: Allan, J., Brebbia, C. A., Hill, R. J., Sciuotto, G. und Sone, S. (Hrsg.): Computers In Railways IX, 217-222, WIT-PRESS, Southampton, Boston, 2004.

- [Beale/Tomlin 1969] Beale, E. M. L.; Tomlin, J. A.: Special Facilities in a General Mathematical System for Non-convex Problems Using Ordered Sets of Variables. In: Lawrence, J. (Hrsg.): Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Operations Research, Tavistock, 1969.
- [Becker 2002] Becker, D.: Einsatzmöglichkeit des maschinellen Lernens im Supply Chain Management am Beispiel des Multi-Agenten-Systems. Diplomarbeit, Universität Paderborn, 2002.
- [Beier/van Gyzicki 2002] Beier, M.; van Gyzicki, V.: Usability – Nutzerfreundliches Webdesign, Springer, Berlin, 2002.
- [Biederbick 2000] Biederbick, C.: Planung von Flugumläufen unter Nebenbedingungen. In: Inderfurth et al. (Hrsg.): Operations Research Proceedings 1999, Springer-Verlag, Berlin et al., 2000.
- [Biederbick/Goecke 2000] Biederbick, C.; Goecke, J.: Simulation im Konfliktmanagement in großen Transportnetzwerken. In: Inderfurth et al. (Hrsg.): Operations Research Proceedings 1999, Springer-Verlag, Berlin et al., 2000.
- [Biederbick/Suhl 2004] Biederbick, C.; Suhl, L.: Improving the quality of railway dispatching tasks via agent-based simulation. In: Allan, J., Brebbia, C. A., Hill, R. J., Sciutto, G. und Sone, S. (Hrsg.): Computers In Railways IX, 785-795, WITPRESS, Southampton, Boston, 2004.
- [Biederbick/Suhl 2005] Biederbick, C.; Suhl, L.: Decision support tools for customer oriented dispatching, Erscheint in: Lecture Notes in Computer Science, Proceedings of the Dagstuhl Workshop on Railway Optimization 2004, Springer, Berlin et al., 1/ 2005.
- [BMVBW 2001] Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (Hrsg.): Verkehrsprognose 2015 für die Bundesverkehrswegeplanung, Kapitel 3: Personenverkehr, [http://www.bmwbw.de/Anlage/original\\_5918/Kapitel-3-Personenverkehr.pdf](http://www.bmwbw.de/Anlage/original_5918/Kapitel-3-Personenverkehr.pdf), 2001. Letzter Zugriff: 06.05.2005.
- [BMVBW 2003] Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (Hrsg.): Bundesverkehrswegeplan 2003. BMVBW, Berlin, 2003.
- [Bormet 2002] Bormet, J.: Funktion der fahrplanbasierten Zuglenkung für Betriebszentralen. In: EI – Der Eisenbahningenieur 53 (6), Tetzlaff Verlag, Hamburg, 2002.
- [Breu 2003] Breu, S.: LeiDis N – Netzdisposition in der Netzleitzentrale der DB AG in Frankfurt. In: Signal und Draht 95 (6), 14-19, Tetzlaff Verlag, Hamburg, 2003.
- [Brooks 1991] Brooks, R. A.: Intelligence Without Representation. In: Artificial Intelligence 47, 139-159, 1991.
- [Bruhn/Homburg 2000] Bruhn, M.; Homburg, C.: Handbuch Kundenbindungsmanagement. Grundlagen, Konzepte, Erfahrungen, 3. Aufl., Gabler, Dezember 2000.
- [BUND 2005] Bund für Umwelt und Naturschutz (BUND) e. V. – Verkehr: [http://www.bund.net/lab/reddot2/verkehr\\_1677.htm](http://www.bund.net/lab/reddot2/verkehr_1677.htm). Letzter Zugriff: 06.05.2005.
- [Bussieck 1998] Bussieck, M. R.: Optimal Lines in Public Rail Transport. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1998.
- [Bussieck et al. 1997] Bussieck, R., Winter, T., Zimmermann, U. T.: Discrete optimization in public rail transport. In: Mathematical Programming 79 (3), 415-444, 1997.
- [Bussieck/Zimmermann 1997] Bussieck, M. R.; Zimmermann, U. T.: Schlussbericht Optimale Linienführung und Routenplanung in Verkehrssystemen, Technische Universität Braunschweig, 1997.
- [Caprara et al. 1997] Caprara, A.; Fischetti, M.; Toth, P.; Vigo, D.; Guida, P.-L.: Algorithms for Railway Crew Management. In: Mathematical Programming 79 (1-3), 125-141, 1997.

- [Caprara et al. 1998] Caprara, A.; Fischetti, M.; Toth, P.; Vigo, D.; Fischetti, M.: Modeling and solving the crew rostering problem. In: *Operations Research* 46 (6), 820-830, 1998.
- [Carey 1999] Carey, M.: Ex ante heuristic measures of schedule reliability. In: *Transportation Research* 33 (Part B), 473-494, 1999.
- [Chandy/Misra 1981] Chandy, K. M.; Misra, J.: Asynchronous Distributed Simulation via a Sequence of Parallel Computations. In: *Communication of the ACM* 24 (11), 198-206, 1981.
- [Claessens et al. 1998] Claessens, M. T.; Van Dijk, N. M.; Zwanefeld, P. J.: Theory and Methodology: Cost optimal allocation of rail passenger lines. In: *European Journal of Operation Research* 110, 474-489, 1998.
- [Colella 1974] Colella, A. M.: *Systems Simulation*. Lexington Books, Lanham, 1974.
- [Compton/Jansen 1989] Compton, P.; Jansen, R.: Knowledge in context: A strategy for expert system maintenance. In Barter, C. J.; Brooks, M. J.: *AI '88 (Proceedings of the 1988 Australian Artificial Intelligence Conference)*, 292-306 (283-297 in den original Proceedings), Springer, Berlin, 1989.
- [Cordeau et al. 1998] Cordeau, J. F.; Toth, P.; Vigo, D.: A Survey of Optimization Models for Train Routing and Scheduling. In: *Transportation Science* 32 (4), 380-404, 1998.
- [CPLEX 2005] ILOG Inc., ILOG CPLEX: High-performance software for mathematical programming and optimization, <http://www.ilog.com/products/cplex>. Letzter Zugriff: 06.05.2005
- [Daudel/Vialle 1994] Daudel, S.; Vialle, G.: „Yield Management: Applications to air transport and other service industries“, Institut du Aérien, Bayeux 1994.
- [DB 1993] Deutsche Bahn AG, ZENTRALE Zentralstelle Produktion Fb 321; Den Betriebsablauf durch Betriebsleitstellen Betrieb disponieren Dispositionsstrategie 420 i. d. F. d. Bekanntgabe 2, gültig ab 01.01.94; Mainz/Berlin 12/93 – unveröffentlicht -; S.11
- [DB 2000] Deutsche Bahn AG: Der Weg zur nachhaltigen Mobilität – Externe Kosten des Verkehrs reduzieren. Broschüre, April 2004.
- [DB 2001] Deutsche Bahn AG: Geschäftsbericht 2001; [http://www.db.de/site/shared/de/dateianhaenge/berichte/geschaeftsbericht\\_\\_2001\\_\\_konzern.pdf](http://www.db.de/site/shared/de/dateianhaenge/berichte/geschaeftsbericht__2001__konzern.pdf). Letzter Zugriff: 06.05.2005.
- [DB 2002] Deutsche Bahn AG: Business & Reisen, Broschüre, Januar 2002.
- [DB 2003] Deutsche Bahn AG: Unsere Schienenfahrzeuge im Fernverkehr, [http://www.db.de/site/shared/de/dateianhaenge/publikationen\\_\\_broschueren/ub\\_\\_personenverkehr/schienenfahrzeuge\\_\\_im\\_\\_fernverkehr.pdf](http://www.db.de/site/shared/de/dateianhaenge/publikationen__broschueren/ub__personenverkehr/schienenfahrzeuge__im__fernverkehr.pdf), Kommunikation der Personenverkehr, Broschüre, Dezember 2003, Letzter Zugriff: 06.05.2005.
- [DB 2004] Deutsche Bahn AG: Geschäftsportfolio Unternehmensbereich Fahrweg; <http://www.db.de/site/bahn/de/unternehmen/geschaeftsportfolio/fahrweg/fahrweg.html>. Letzter Zugriff: 06.05.2005.
- [DB 2005a] Deutsche Bahn AG: Geschäftsbericht 2004, [http://www.db.de/site/shared/de/dateianhaenge/berichte/geschaeftsbericht\\_\\_2004\\_\\_konzern.pdf](http://www.db.de/site/shared/de/dateianhaenge/berichte/geschaeftsbericht__2004__konzern.pdf). Letzter Zugriff: 28.05.2005.
- [DB 2005b] Deutsche Bahn AG: Öko-ABC im Verkehr – Weitere Vergleichskriterien; [http://www.bahn.de/-S:PtVOZ9:d00F-tNNcRZk3NNNNWAM/p/view/planen/reiseplanung/umc/oeko\\_abc.shtml](http://www.bahn.de/-S:PtVOZ9:d00F-tNNcRZk3NNNNWAM/p/view/planen/reiseplanung/umc/oeko_abc.shtml). Letzter Zugriff: 06.05.2005.

- [DB 2005c] Deutsche Bahn AG: Entscheidung für GSM-R – Warum hat sich die Bahn für GSM-R entschieden;  
[http://www.db.de/site/bahn/de/geschaefte/infrastruktur\\_\\_schiene/fahrweg/netzzugang/gsm\\_\\_r/warum\\_\\_gsmr.html](http://www.db.de/site/bahn/de/geschaefte/infrastruktur__schiene/fahrweg/netzzugang/gsm__r/warum__gsmr.html). Letzter Zugriff: 06.05.2005.
- [DB 2005d] Deutsche Bahn AG: Die Züge der Bahn – Wohin Sie auch fahren – wir haben den richtigen Zug für jede Strecke,  
<http://www.db.de/site/bahn/de/reisen/zuege/fernzuege/fernzuege.html>. Letzter Zugriff: 06.05.2005.
- [DB 2005e] Deutsche Bahn AG: Haltestelleninformationen, <http://www.bahn.de>. Letzter Zugriff: 06.05.2005.
- [DB 2005f] Deutsche Bahn AG: Meldungen zu GSM-R,  
[http://www.db.de/site/bahn/de/geschaefte/infrastruktur\\_\\_schiene/fahrweg/netzzugang/gsm\\_\\_r/meldungen.html](http://www.db.de/site/bahn/de/geschaefte/infrastruktur__schiene/fahrweg/netzzugang/gsm__r/meldungen.html). Letzter Zugriff: 06.05.2005.
- [DB 2005g] Deutsche Bahn AG: Vergleichen Sie Verkehrsmittel mit dem MobilCheck: Der „MobilCheck“ – Bahnauskunft, Routenplaner und Verkehrsmittelvergleich in einem;  
<http://www.bahn.de/p/view/planen/reiseplanung/auskunft/mobilcheck.shtml>. Letzter Zugriff: 06.05.2005.
- [DB 2005h] Deutsche Bahn AG: Daten und Fakten zum Geschäftsbericht 2004,  
[http://www.db.de/site/shared/de/dateianhaenge/berichte/daten\\_\\_und\\_\\_fakten\\_\\_2004.pdf](http://www.db.de/site/shared/de/dateianhaenge/berichte/daten__und__fakten__2004.pdf). Letzter Zugriff: 06.05.2005.
- [DB Netz 2002] Deutsche Bahn Netz AG: Betriebszentralen DB Netz AG, Richtlinie R 420, 2. Aktualisierung, Frankfurt am Main, 2002.
- [DB Netz 2004] DB Netz AG: Geschäftsbericht 2004,  
[http://www.db.de/site/shared/de/dateianhaenge/berichte/geschaeftsbericht\\_\\_2004\\_\\_netz.pdf](http://www.db.de/site/shared/de/dateianhaenge/berichte/geschaeftsbericht__2004__netz.pdf). Letzter Zugriff: 13.06.2005.
- [Demitz et al. 2004] Demitz, J.; Hübschen, C.; Albrecht, C.: Timetable stability – using simulation to ensure quality in a regular interval timetable. In: Allan, J., Brebbia, C. A., Hill, R. J., Sciuotto, G. und Sone, S. (Hrsg.): Computers In Railways IX, 549-562, WITPRESS, Southhampton, Boston, 2004.
- [DESMO-J 2005] DESMO-J: A Framework for Discrete-Event Modelling and Simulation,  
<http://www.desmoj.de>. Letzter Zugriff: 06.05.2005.
- [Dewald et al. 2001] Dewald, I.; Kuhn, C.; Leister, H.: Erfahrungen von Connex auf dem Netz der DB AG. In: Eisenbahntechnische Rundschau 50 (7/8), 409 – 415, Tetzlaff Verlag, Hamburg, 2001.
- [Duden 2001] Duden: Deutsches Universalwörterbuch. 4. Aufl. (CD-ROM), Mannheim, 2001.
- [ECIN 2005] ECIN: Routenplanung per MMS,  
<http://www.ecin.de/news/2003/10/29/06365/>. Letzter Zugriff: 07.05.2005.
- [Ederer 2004] Ederer, G.: Einfach Ederer – Die Deutsche Bahn, Manuskript des Beitrags zur Sendung FAKT vom 26.01.2004.
- [Farmer et al. 1996] Farmer, W. M.; Guttman, J. D.; Swarup, V.: Security for Mobile Agents – Issues and Requirements. In: Proceedings of the 19<sup>th</sup> National Information Systems Security Conference, Baltimore, 591-597, 1996.
- [Fay 1999] Fay, A.: Wissensbasierte Entscheidungsunterstützung für die Disposition im Schienenverkehr – eine Anwendung von Fuzzy-Petrimetzen. Dissertation, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 388, 1999.
- [Fay 2000a] Fay, A.: A fuzzy knowledge-based system for railway traffic control. In: Engineering Applications of Artificial Intelligence 13, 719-729, 2000.
- [Fay 2000b] Fay, A.: Dezentrale Steuerung des Schienenverkehrs durch autonome Agenten. In: Signal und Draht, Jahrgang 92, Heft 3, 14-16, Tetzlaff Verlag, Hamburg, 2000.

- [Fernández et al. 2004] Fernández, A.; Cucula, A. P.; Sanz, J. I.: An integrated information model for traffic planning, operation, and management of railway lines. In: Allan, J., Brebbia, C. A., Hill, R. J., Sciuotto, G. und Sone, S. (Hrsg.): *Computers In Railways IX*, 743-752, WITPRESS, Southhampton, Boston, 2004.
- [Ferscha 1996] Ferscha, A.: Parallel and Distributed Simulation of Discrete Event Systems. In: Zomaya, A. Y. (Hrsg.): *Parallel and Distributed ComI Handbook*, 1003-1041, McGraw-Hill, London, 1996.
- [Fiat/Woeginger 1998] Fiat, A.; Woeginger, G. J. (Hrsg.): *Online Algorithms – The State of the Art*. Springer, Berlin, 1998.
- [Finlay 1989] Finlay, P. N.: *Introducing I Support Systems*. NCC Blackwell, Oxford, Manchester, 1989.
- [Fishwick 1995] Fishwick, P. A.: *Simulation model design and execution: building digital worlds*. Prentice Hall, New Jersey, 1995.
- [Fourer 2000] Fourer, R.: *Linear Programming Frequently Asked Questions*, <http://www-unix.mcs.anl.gov/otc/Guide/faq/linear-programming-faq.html>. Optimization Technology Center of Northwestern University and Argonne National Laboratory, 2000. Letzter Zugriff: 06.05.2005.
- [Fricke 2001] Fricke, E.: Netz 21 – Konzeption für die Zukunft. In: *EI – Der Eisenbahningenieur* 52 (3), 11 – 12, Tetzlaff Verlag, Hamburg, 2001.
- [Fujimoto 1990] Fujimoto, R. M.: Parallel Discrete Event Simulation. In: *Communications of the ACM* 33 (10), 30-53, 1990.
- [Fujimoto 2000] Fujimoto, R. M.: *Parallel and distributed Simulation Systems*. Wiley, New York, 2000.
- [Gannon 2004] Gannon, M. J.: A review of techniques used to assess the credibility of a business case in public sector rail projects. In: Allan, J., Brebbia, C. A., Hill, R. J., Sciuotto, G. und Sone, S. (Hrsg.): *Computers In Railways IX*, 21-33, WITPRESS, Southhampton, Boston, 2004.
- [Gatto et al. 2004] Gatto, M.; Jacob, R.; Peeters, L.; Schöbel, A.: The computational complexity of delay management. Technical report, ETH Zurich, Institute for Theoretical Computer Science, 2004.
- [Gatto et al. 2005] Gatto, M.; Jacob, R.; Peeters, L.; Widmayer, P.: On-Line Delay Management on a Single Train Line. Erscheint in: *Lecture Notes in Computer Science; Proceedings of ATMOS04*, Springer, 1 / 2005.
- [Geistler/Böhringer 2004] Geistler, A.; Böhringer, F.: Detection and classification of turnouts using eddy current sensors. In: Allan, J., Brebbia, C. A., Hill, R. J., Sciuotto, G. und Sone, S. (Hrsg.): *Computers In Railways IX*, 467-476, WITPRESS, Southhampton, Boston, 2004.
- [Giering 2000] Giering, A.: *Der Zusammenhang zwischen Kundenzufriedenheit und Kundenloyalität*, Gabler, 2000.
- [Girke/Bader 2001] Girke, K.-J., Bader K.: Die neue Betriebszentrale Leipzig der DB Netz AG. In: *Signal und Draht* 93 (7), Tetzlaff Verlag, Hamburg, 2001.
- [Goecke 1996] Goecke, Johannes: *Konzeption und Entwicklung eines graphisch-interaktiven Systems zur Unterstützung der netzweiten Konfliktlösung bei Zugverspätungen der Deutschen Bahn AG*. Diplomarbeit, Universität-GH Paderborn, 1996.
- [Goodman/Tagaki 2004] Goodman, C. J.; Tagaki, R.: Dynamic re-scheduling of trains after disruption. In: Allan, J., Brebbia, C. A., Hill, R. J., Sciuotto, G. und Sone, S. (Hrsg.): *Computers In Railways IX*, 765-774, WITPRESS, Southhampton, Boston, 2004.
- [Gorry/Scott Morton 1971] Gorry, G. M.; Scott Morton, M. S.: A Framework for Management Information Systems. In: *Sloan Management Review* 13, 56-79, 1971.

- [Goverde 1998] Goverde, R. M. P.: Synchronization Control of Scheduled Train Services to Minimize Passenger Waiting Times. 4<sup>th</sup> TRAIL Year Congress, Conference Proceedings, Part 2, TRAIL Research School, Delft, 1998.
- [Gröger 2003] Gröger, T.: Simulation der Fahrplanerstellung auf Basis eines Trassenmanagements und Nachweis der Stabilität der Betriebsabwicklung. Dissertation, RWTH Aachen, 2003.
- [Gröger 2004] Gröger, T.: Timetable simulation by sophisticated conflict resolution between train paths. In: Allan, J., Brebbia, C. A., Hill, R. J., Sciotto, G. und Sone, S. (Hrsg.): Computers In Railways IX, 573-582, WITPRESS, Southampton, Boston, 2004.
- [Grötschel et al. 2001] Grötschel, M.; Krumke, S. O.; Rambau, J.; Winter, T.; Zimmermann, U. T.: Combinatorial Online Optimization in Real Time. In: Grötschel, M.; Krumke, S. O.; Rambau, J.: Online Optimization Of Large Scale Systems, 679-704, 1. Aufl., Springer, Berlin, 2001.
- [Halpern/Moses 1990] Halpern, J. Y.; Moses, Y.: Knowledge and Common Knowledge in a Distributed Environment. In: Journal of the ACM 37 (3), 549-587, 1990.
- [Hansen 2004] Hansen, I. A.: Increase of capacity through optimised timetabling. In: Allan, J., Brebbia, C. A., Hill, R. J., Sciotto, G. und Sone, S. (Hrsg.): Computers In Railways IX, 529-538, WITPRESS, Southampton, Boston, 2004.
- [Hauptmann 2000] Hauptmann, D.: Automatische und diskrimierungsfreie Ermittlung von Fahrplantrassen in beliebig großen Netzen spurgeführter Systeme. Dissertation an der Universität Hannover, Hestra, Darmstadt, 2000.
- [Helmbold et al. 1990] Helmbold, D. P.; Sloan, R.; Warmuth, M.: Learning nested differences of intersection-closed concepts classes. In: Machine Learning 5 (2), 165-196, 1990.
- [Hennings 1989] Hennings, R. D.: Informations- und Wissensverarbeitung : Theoretische Grundlagen wissensbasierter Systeme. Freie Universität Berlin, 1991
- [Heth 1999] Heth, K.: Konzeption und Entwicklung einer Java-Komponente zur netzweiten Simulation von Zugläufen für ein Intranet-basiertes Dispositionssystem. Diplomarbeit, Universität Paderborn, 1999.
- [Hille 1998] Hille, A.: ASIM-Symposium Simulationstechnik als Forum für Methoden, Einsatzfelder und Nutzenpotentiale. In: Logistik im Unternehmen 12, 40-41, 1998.
- [Hoffmann/Padberg 1985] Hoffmann, K.; Padberg, M.: LP-based combinatorial problem solving. In: Annals of Operations Research 4, 145-194, 1985.
- [Hogeweg/Hesper 1985] Hogeweg, P.; Hesper, B.: Socioinformatic processes: Mirror modelling methodology. Journal of Theoretical Biology 113,311-330, 1985.
- [Hoyer 2001] Hoyer, R.: PIEPSER - ein Weg zum personalisierten Informationsdienst im ÖPNV, [http://vwisb7.vkw.tu-dresden.de/TrafficForum/vwt\\_2001/beitraege/VWT18proceedings\\_pages403-412.pdf](http://vwisb7.vkw.tu-dresden.de/TrafficForum/vwt_2001/beitraege/VWT18proceedings_pages403-412.pdf). Letzter Zugriff: 06.05.2005.
- [Huisman/Boucherie 2001] Huisman, T.; Boucherie, R. J.: Running times on railway sections with heterogeneous train traffic. In: Transportation Research 35 (Part B), 271-292, 2001.
- [Huisman et al. 2005] Huisman, D; Kroon, L. G.; Lentink, R. M.; Vromans, M. J. C. M.: Operations Research in Passenger Railway Transportation. Research Paper 1566-5283, Erasmus Research Institute of Management (ERIM), RSM Erasmus University, Rotterdam, 2005.
- [IBM 2002] IBM Co.: International Bureau Machines - Aglets, <http://www.trl.ibm.com/aglets/>. Letzter Zugriff: 06.05.2005.

- [INFRAS 2000] INFRAS, Consulting Group for Policy Analysis and Implementation: Externe Kosten des Verkehrs-, Unfall-, Umwelt und Staukosten in Westeuropa, Zürich IWW – Universität Karlsruhe, März 2000.
- [INVENT 2005] Invent, Intelligenter Verkehr und nutzergerechte Technik - Eine Forschungsinitiative deutscher Unternehmen: <http://www.invent-online.de>. Letzter Zugriff: 06.05.2005.
- [Jacobs 2003] Jacobs, J.: Rechnergestützte Konfliktmittlung und Entscheidungsunterstützung bei der Disposition des Zuglaufes. Dissertation, RWTH Aachen, 2003
- [Jacobs 2004] Jacobs, J.: Reducing delays by means of computer-aided 'on-the-spot' re-scheduling. In: Allan, J., Brebbia, C. A., Hill, R. J., Sciutto, G. und Sone, S. (Hrsg.): Computers In Railways IX, 603-612, WITPRESS, Southhampton, Boston, 2004.
- [Jefferson 1985] Jefferson, D.: Virtual Time. In: ACM Transactions on Programming Languages and Systems 7 (3), 404-425, 1985.
- [Jefferson/Sowizral 1982] Jefferson, D.; Sowizral, H.: Fast Concurrent Simulation using the Time Warp Mechanism, Part I: Local Control. RAND Note N-1906AF, Rand Copr., Santa Monica CA, 1982.
- [Jennings 1994] Jennings, N. R.: The ARCHON-system and its applications. In: Deen, S. M. (Hrsg.): International Working Conference on Cooperating Knowledge Based Systems (Proceedings of the CKBS'94), 13-29, Springer, Berlin, 1994.
- [Jennings et al. 1998] Jennings, N. R.; Sycara, K.; Wooldridge, M.: A roadmap of agent research and development. In: Autonomous Agents and Multi-Agent Systems 1 (1), 7-38, 1998.
- [Jha/Oluokun 2004] Jha, M. K.; Oluokun, C.: Optimizing station locations along transit rail lines with geographic information systems and artificial intelligence. In: Allan, J., Brebbia, C. A., Hill, R. J., Sciutto, G. und Sone, S. (Hrsg.): Computers In Railways IX, 11-20, WITPRESS, Southhampton, Boston, 2004.
- [Kaas/Goossmann 2004] Kaas, A. H.; Goossmann, R.: Implementation of the Timetable Planning System STRAX/TPS in Denmark. In: Allan, J., Brebbia, C. A., Hill, R. J., Sciutto, G. und Sone, S. (Hrsg.): Computers In Railways IX, 94-102, WITPRESS, Southhampton, Boston, 2004.
- [Kaebling 1990] Kaebling, L. P.: An Architecture for Intelligent Reactive Systems. In: Tate, A., Allen, J., Hendler, J. (Hrsg.): Readings in Planing, 713-729, Morgan Kaufmann, 1990.
- [Kant 2000] Kant, M.: Erfahrungen bei der Inbetriebnahme der ersten Betriebszentrale in Frankfurt/M. In: Signal und Draht 92 (10), 37 - 39, Tetzlaff Verlag, Hamburg 2000
- [Karlin et al. 1988] Karlin, R. A.; Manasse, M.; Rudolph, L.; Sleator, D. D.: Competitive snoopy caching. In: Algorithmica 3 (1), 79-119, 1988.
- [Katori et al. 2004] Katori, T.; Takahashi, Y.; Izumi, T.: Determination of stations where rapid trains stop, or pass to local ones, using a genetic algorithm to shorten total trip time. In: Allan, J., Brebbia, C. A., Hill, R. J., Sciutto, G. und Sone, S. (Hrsg.): Computers In Railways IX, 113-121, WITPRESS, Southhampton, Boston, 2004.
- [KDE 2005] KDE e. V.: KDE 3 Styleguide; <http://developer.kde.org/documentation/standards/kde/style/styleguide.pdf>. Letzter Zugriff: 06.05.2005.
- [Kivinen et al. 1992] Kivinen, J.; Mannila, H.; Ukkonen, E.: Learning hierarchical rule sets. In: Proceedings of the fifth annual workshop of Computational learning theory, 37-44, 1992.

- [Kliwer 2005] Kliwer, N.: Optimierung des Fahrzeugeinsatzes im Öffentlichen Personennahverkehr - Modelle, Methoden und praktische Anwendungen. Dissertation, Universität Paderborn, 2005
- [Klügl 2001] Klügl, F.: Multiagentensimulation. Addison-Wesley, München, 2001.
- [Ko et al. 2004] Ko, H.; Koseki, T.; Miyatake, M.: Application of dynamic programming to the optimization of the running profile of a train. In: Allan, J., Brebbia, C. A., Hill, R. J., Sciotto, G. und Sone, S. (Hrsg.): Computers In Railways IX, 103-112, WITPRESS, Southampton, Boston, 2004.
- [Kohl 2003] Kohl, N.: Solving the World's Largest Crew Scheduling Problem. ORbit, 8-12, 2003.
- [Košturiak/Gregor 1995] Košturiak, J.; Gregor, M.: Simulation von Produktionssystemen. Springer, Berlin, 1995.
- [Koutsoupas/Papadimitriou 1994] Koutsoupas, E.; Papadimitriou, C.: Beyond competitive analysis. In: Proceedings of the 35<sup>th</sup> Annual IEEE Symposium on the Foundation of Computer Science, 394-400, 1994.
- [Kredel 1988] Kredel, L.: Künstliche Intelligenz und Expertensysteme leicht gemacht. Droemer Knauer, München, 1988.
- [Kroon/Fischetti 2000] Kroon, L.; Fischetti, M.: Crew Scheduling for Netherlands Railways "Destination Customer". ERIM Report Series Research in Management, ERS-2000-56-LIS, 2000.
- [Krüger 1974] Krüger, S.: Simulation - Grundlagen, Techniken, Anwendungen. De Gruyter Lehrbuch, Berlin, 1974.
- [Krüger 2002] Krüger, S.: Billigflieger im Steilflug. In: Die Welt, 22.03.2002.
- [Krumke 2001] Krumke, S. O.: Online Optimization: Competitive Analysis and Beyond, ZIB. Habilitationsschrift, Technische Universität Berlin, 2001.
- [Krutwig/Tolksdorf 2001] Krutwig, M.; Tolksdorf, R.: WML und WML-Script. dpunkt, Heidelberg, 2001.
- [Kuhn et al. 1993] Kuhn, A.; Reinhardt, A.; Wiendahl, H.-P.: Handbuch Simulationsanwendungen in Produktion und Logistik. Vieweg, Braunschweig, 1993.
- [Law/Kelton 2000] Law, A. M.; Kelton, W. D.: Simulation Modeling and Analysis. McGraw Hill, Boston, 2000.
- [Lechner 1999] Lechner, T.: Entwurf und Implementierung eines Frameworks für diskrete Simulatoren in Java. Diplomarbeit, Universität Hamburg, 1999.
- [Leivent/Watro 1993] Leivent, J.; Watro, R.: Mathematical Foundations for Time Warp Systems. In: ACM Transactions on Programming Languages and Systems 15 (5), 771-794, 1993.
- [Lindner 2000] Lindner, T.: Train Schedule Optimization in Public Rail Transport. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 2000.
- [Löbel 1997] Löbel, A.: Optimal vehicle scheduling in public transit. Dissertation, Technische Universität Berlin, 1997.
- [Lova et al. 2005] A. Lova, A.; Tormos, P.; Barber, F.; Ingolotti, L.; Salido, A.; Abril, M.: Intelligent Train Scheduling on a High-Loaded Railway Network. Erscheint in: Lecture Notes in Computer Science; Proceedings of ATMOS04, Springer, 1 / 2005.
- [Lubachevsky et al. 1991] Lubachevsky A. D.; Weiss, A.; Shwartz, A.: An Analysis of Rollback-Based Simulation. In: ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation 1(2), 154-193, 1991.

- [Lunze 1994] Lunze, J.: Künstliche Intelligenz für Ingenieure - Band 1. Oldenburg, München, 1994.
- [Maes 1994] Maes, P.: Agents that reduce work and information overload. *Communications of the ACM* 37 (7), 30-40, ACM-Press, New York, 1994.
- [Maes 1995] Maes, P.: Artificial Life meets Entertainment: Life like Autonomous Agents. *Communications of the ACM* 38 (11), 108-114, ACM Press, New York, 1995.
- [Makkinga 2004] Makkinga, F.: A new user interface for the train traffic control system. In: Allan, J., Brebbia, C. A., Hill, R. J., Scitutto, G. und Sone, S. (Hrsg.): *Computers In Railways IX*, 725-732, WITPRESS, Southhampton, Boston, 2004.
- [Martin 1998] Martin, U.: Die dispositive Lösung von Fahrweg- und Belegungskonflikten als Voraussetzung für eine automatisierte Betriebssteuerung spurgeführter Verkehrssysteme. In: *Leipzig annual civil engineering report (LACER)* 3, 311-333, 1998.
- [MBTA 2002] Massachusetts Bay Transportation Authority: MBTA Homepage, <http://www.mbta.com>. Letzter Zugriff: 06.05.2005.
- [Meffert/Bruhn 2000] Meffert, H.; Bruhn, M.: *Dienstleistungsmarketing: Grundlagen – Konzepte – Methoden*. 3. Aufl., Gabler, 2000.
- [Mehl 1994] Mehl, H.: *Methoden verteilter Simulation*. Vieweg, Braunschweig, 1994.
- [Mellouli 2003] Mellouli, T.: *Scheduling and Routing Processes in Public Transport Systems - Modeling, Optimization and Decision Support*. Habilitationsschrift, Universität Paderborn, 2003.
- [Mellouli/Suhl 2005] Mellouli T.; Suhl L.: Rotation planning of locomotive and carriage groups with shared capacities. Erscheint in: *Lecture Notes in Computer Science; Proceedings of ATMOS04*, Springer, 1 / 2005.
- [Mertens et al. 2002] Mertens, P.; Chamoni P.; Ehrenberg D.; Griese J.; Heinrich L.; Kurbel K.: *Studienführer Wirtschaftsinformatik*. 3. Aufl., Vieweg, Braunschweig, 2002.
- [Meurer 2000] Meurer, W.: RIS - Das neue ReisendenInformations-System der Deutschen Bahn. In: *EI - Der Eisenbahningenieur* 51(5), 8 - 11, Tetzlaff Verlag, Hamburg, 2000.
- [Meyer 1987] Meyers Lexikonredaktion (Hrsg.): *Meyers großes Taschenlexikon*. BI-Taschebuchverlag, Mannheim, Wien, 1987.
- [Microsoft 2004] Microsoft Corporation: *The User Interface Guidelines for Microsoft Windows, Official Guidelines for User Interface Developers and Designers*; <http://msdn.microsoft.com/library/default.asp?url=/library/en-us/dnwue/html/welcome.asp>. Letzter Zugriff: 06.05.2005.
- [Mikrozensus 2000] Mikrozensus: *Leben und Arbeiten in Deutschland 2000*. Statistische Bundesamt Wiesbaden, 2000.
- [Misra 1986] Misra, J.: Distributed Discrete-Event Simulation. In: *ACM Computing Surveys* 18 (1), 39-65, 1986.
- [MOPS 2005] MOPS - Mathematical Optimization System: <http://www.mops.fu-berlin.de>. Letzter Zugriff: 06.05.2005.
- [Moreira et al. 2004] Moreira, M.; Garcia, L.; Catarrinho, P.: Network capacity. In: Allan, J., Brebbia, C. A., Hill, R. J., Scitutto, G. und Sone, S. (Hrsg.): *Computers In Railways IX*, 35-43, WITPRESS, Southhampton, Boston, 2004.
- [Mueller 1993] Mueller, H. J.: *Verteilte Künstliche Intelligenz - Methoden und Anwendungen*. BI-Wissenschaftsverlag; Mannheim, 1993.
- [Müller 2003] Müller, C.: Bundesverkehrswegeplan 2003 - Ausbau der Schieneninfrastruktur. In: *EI - Der Eisenbahningenieur* 54 (6), 18 - 23, Tetzlaff Verlag Hamburg, 2003.

- [Müller-Hannemann/Schnee 2005] Müller-Hannemann, M.; Schnee, M.: Finding All Attractive Train Connections by Multi-Criteria Pareto Search. Erscheint in: Lecture Notes in Computer Science; Proceedings of ATMOS04, Springer, 1 / 2005.
- [MySQL 2005] MySQL AB: MySQL-The World's Most Popular Open Source Data Base; <http://www.mysql.com/>. Letzter Zugriff: 06.05.2005.
- [Nash et al. 2004] Nash, A.; Huerlimann, D.; Schuette, J.; Krauss, V. P.: RailML - a standard data interface for railroad applications. In: Allan, J., Brebbia, C. A., Hill, R. J., Sciotto, G. und Sone, S. (Hrsg.): Computers In Railways IX, 233-240, WITPRESS, Southhampton, Boston, 2004.
- [Nash/Huerlimann 2004] Nash, A.; Huerlimann, D.: Railroad Simulation using OpenTrack. In: Allan, J., Brebbia, C. A., Hill, R. J., Sciotto, G. und Sone, S. (Hrsg.): Computers In Railways IX, 45-54, WITPRESS, Southhampton, Boston, 2004.
- [NBP 2005] Neue Bahntechnik Paderborn: Homepage, <http://nbp-www.upb.de>. Letzter Zugriff: 06.05.2005.
- [Nemhauser/Wolsey 1988] Nemhauser, G. L.; Wolsey, L. A.: Integer and Combinatorial Optimization, Wiley, New York, 1988.
- [Niederst 2002] Niederst, J.: Webdesign In A Nutshell. 2. Ausgabe, O'Reilly, San Francisco, 2002.
- [n-tv 2002] n-tv.de: Preisreform der Bahn - Kunden massiv verärgert; <http://www.n-tv.de/414124.html>, 18.12.2002. Letzter Zugriff: 06.05.2005.
- [n-tv 2005] n-tv.de: Ungewöhnliche Kooperation - Billige Bahntickets bei Lidl; <http://www.n-tv.de/528036.html>, 05.05.2005. Letzter Zugriff: 06.05.2005.
- [Nwana 1996] Nwana, H. S.: Software Agents: An Overview. In: Knowledge Engineering Review II, 205-244, 1996.
- [Oh et al. 2004] Oh, S. M.; Hong, S. H.; Choi, I. C.: Railway conflict detection and resolution in the Korean railway system. In: Allan, J., Brebbia, C. A., Hill, R. J., Sciotto, G. und Sone, S. (Hrsg.): Computers In Railways IX, 675-684, WITPRESS, Southhampton, Boston, 2004.
- [OMA 2005] Open Mobile Alliance: <http://www.openmobilealliance.org>. Letzter Zugriff: 06.05.2005.
- [Omicini/Ossowski 2003] Omicini, A.; Ossowski, S.: Objective versus Subjective Coordination in the Engineering of Agent Systems. In: Klusch, M., Bergamaschi, S., Edwards, P., Petta, P. (Hrsg.): Intelligent Information Agents, 179-202, Springer, Berlin, 2003.
- [Pachl 2002] Pachl, J.: Systemtechnik des Schienenverkehrs, 3. Aufl., Teubner, Stuttgart, 2002.
- [Pachl 2004] Pachl, J.: Systemtechnik des Schienenverkehrs. 4. Aufl., Teubner, Stuttgart, 2004.
- [Pachl 2005] Pachl, J.: Glossar der Systemtechnik des Schienenverkehrs, <http://www.ivev.bau.tu-bs.de/~pachl/glossar.htm>. Letzter Zugriff: 06.05.2005.
- [Page 1991] Page, B.: Diskrete Simulation – Eine Einführung mit Modula-2. Springer, Berlin-Heidelberg, 1991.
- [Petrie 1996] Petrie, C. J.: Agent-Based Engineering, the Web, and Intelligence. In: IEEE Expert 11 (6), 24-29, 1996.
- [PHP 2005] The PHP Group: PHP - Hypertext Preprocessor; <http://www.php.net/>. Letzter Stand: 06.05.2005.
- [Pidd 1998] Pidd, M.: Computer Simulation in Management Science. Wiley, New York, 1998.

- [Puppe 1991] Puppe, F.: Einführung in Expertensysteme. 2. Aufl., Springer, Berlin, 1991.
- [Radtke/Hauptmann 2004] Radtke, A.; Hauptmann, D.: Automated planning of timetables in large railway networks using a microscopic data basis and railway simulation techniques. In: Allan, J., Brebbia, C. A., Hill, R. J., Sciotto, G. und Sone, S. (Hrsg.): Computers In Railways IX, 615-625, WITPRESS, Southhampton, Boston, 2004.
- [Rajaei et al. 1993] Rajaei, H.; Ayani, R.; Thorelli, L. E.: The Local Time Warp Approach to Parallel Simulation. In: Bagrodia R.; Jefferson, D. (Hrsg.): Proceedings Of the 7<sup>th</sup> Workshop on Parallel and Distributed Simulation, 119-126, IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, 1993.
- [Rao/Georgeff 1995] Rao, A. S.; Georgeff, M. P.: BDI Agents - From Theory to Practice. In: Proceedings of the First International Conference on Multi-Agent Systems, 312-319, 1995.
- [Reeves 1995] Reeves, C. R.: Modern heuristic techniques for combinatorial problems, McGraw-Hill, London, 1995.
- [Reiseauskunft 2005] Deutsche Bahn AG: Reiseauskunft, <http://reiseauskunft.bahn.de/bin/query.exe/dn>. Letzter Zugriff: 06.05.2005.
- [RFID 2005] RFID Journal: <http://www.rfidjournal.com/>. Letzter Zugriff: 06.05.2005.
- [Rivest 1987] Rivest, R. L.: Learning decision lists. In: Machine Learning 2 (3), 229-246, 1987.
- [Rosenberger et al. 2002] Rosenberger, J. M.; Schaefer, A. J.; Goldsman, D.; Johnson E. L.; Kleywegt, A. J.; Nemhauser, G. L.: A Stochastic Model of Airline Operations. In: Transportation Science 36, 357-377, 2002.
- [Roth 2002] Roth, J.: Mobile Computing - Grundlagen, Technik, Konzepte. dpunkt, Heidelberg, 2002.
- [Russel/Norvig 1995] Russel, S.; Norvig, P.: Artificial Intelligence: A Modern Approach. Prentice-Hall, Upper Saddle River, 1995.
- [Scharnbacher/Kiefer 1998] Scharnbacher K.; Kiefer, G.: Kundenzufriedenheit. Analyse, Messbarkeit und Zertifizierung, Oldenbourg, Juni 1998.
- [Schmerler 1998] Schmerler, S.: Prädikative Methoden für optimistische Synchronisationsprotokolle in der verteilten Simulation. FZI-Publikationen, Karlsruhe, 1998.
- [Schmitt 2005] Schmitt, J.: Deutsche Bahn - Um jeden Preis? In: Der Spiegel, 17/2005, 96-97, 2005.
- [Schöbel 2001] Schöbel, A: A model for the delay management problem based on mixed integer-programming. In Christos Zaroliagis, (Hrsg.), Electronic Notes in Theoretical Computer Science, volume 50, Elsevier, 2001.
- [Schöbel 2002] Schöbel, A: Customer-oriented optimization in public transportation. Habilitation Thesis, Universität Kaiserslautern, 2002.
- [Schrijver 1993] Schrijver, A.: Minimum circulation of railway stock. In: CWI Quarterly 6 (3), 205-217, 1993.
- [Schumacher et al. 2004] Schumacher, A.; Monecke, L.; Freiberger, K.-U.:Modelling constraints in automatic vehicle rostering – demands and possibilities. In: Allan, J., Brebbia, C. A., Hill, R. J., Sciotto, G. und Sone, S. (Hrsg.): Computers In Railways IX, 657-664, WITPRESS, Southhampton, Boston, 2004.
- [Shen/Wilson 2000] Shen, S.; Wilson, N. H. M.: An Optimal Integrated Real -Time Disruption Control Model for Rail Transit Systems, CASPT, Berlin, 2000.
- [Shoham 1993] Shoham, Y.: Agent-oriented programming. In: Artificial Intelligence 60 (1), 51-92, 1993.

- [Siegle 1997] Siegle, L.: Handel mit heißer Luft. In: Die Zeit 27/1997, 62, 1997.
- [Siegmann 2003] Siegmann, J.: Produktionsplanung Schienenpersonenfernverkehr. Skript zur Vorlesung, Technische Universität Berlin, 2003.
- [Sleator/Tarjan 1985] Sleator, D. D; Tarjan, R. E.: Amortized Efficiency of List Update and Paging Rules. In: Communications of the ACM 28 (2), 202-208, 1985.
- [Smith 1968] Smith, J.: Computer Simulation Models. Griffin, London, 1968.
- [Spiegel 2004] Spiegel-Online: Bahn-Kundencharta - Heißer Kaffee bei kaltem Zugabteil, <http://www.spiegel.de/reise/aktuell/0,1518,318000,00.html>. Letzter Zugriff: 06.05.2005.
- [Stat. Bundesamt 2002] Bundesamt für Statistik; : [www.destatis.de/presse/deutsch/pk/2002/unfallgeschehen\\_2001.pdf](http://www.destatis.de/presse/deutsch/pk/2002/unfallgeschehen_2001.pdf). Letzter Zugriff: 06.05.2005.
- [Stat. Bundesamt 2003] Statistisches Bundesamt: Personenverkehr Eisenbahn, <http://www.destatis.de/basis/d/verk/verktab4.htm>. Letzter Zugriff: 06.05.2005.
- [Stat. Bundesamt 2005] Bundesamt für Statistik: Verkehr - Deutschland - Beförderte Personen, Beförderte Güter/Beförderungsmenge, <http://www.destatis.de/basis/d/verk/verktab4.php>. Letzter Zugriff: 06.05.2005.
- [Suchman 87] Suchman, L. A.: Plans and Situated Actions: The problem of human-machine communication. Cambridge University Press, Cambridge, 1987.
- [Suhl 1994] Suhl, U.: MOPS - A Mathematical Optimization System - Software Tools for Mathematical Programming. In: European Journal of Operations Research 72, 312-322, 1994.
- [Suhl/Biederbick 2002] Suhl, L.; Biederbick, C.: Verteilte Simulation mit Softwareagenten zur Unterstützung von Dispositionsentscheidungen im schienengebundenen Personenverkehr. In: Panreck, K.; Dörrscheidt, F. (Hrsg.): Fortschrittsberichte Simulation, SCS-Europe, Tagungsband ASIM Symposium Simulationstechnik 2001, Gent, 2001.
- [Suhl et al. 2001a] Suhl L., Biederbick C., Kliever N.: Design of customer-oriented dispatching support for railways. In: Voß S., Daduna J. (Hrsg.): Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Computer-Aided Transit Scheduling - Proceedings, 365-386, Springer, Berlin, 2001.
- [Suhl et al. 2001b] Suhl, L.; Mellouli, T.; Biederbick, C.; Goecke J.: Managing and preventing delays in public transportation by simulation and optimization. In: Pursula M., Niittymäki J. (Hrsg.): Mathematical Methods on Optimization in Transportation Systems, Kluwer Academic Publisher, San Francisco, 2001.
- [Suhl/Mellouli 1999] Suhl, L.; Mellouli, T.: Requirements for, and Design of, an Operations Control System for Railways. In: Wilson, N. H. M. (Hrsg.): Computer-Aided Transit Scheduling, LNEMS Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems 471, 371-390, Springer, Berlin, 1999.
- [Sundermeyer 1993] Sundermeyer, K.: Modellierung von Agentensystemen. In: Müller, J.: Verteilte künstliche Intelligenz - Methoden und Anwendungen, 22-44. BI-Wissenschaftsverlag; Mannheim, 1993.
- [Tagaki et al. 2004] Tagaki, R.; Goodman, C. J.; Roberts, C.: Optimising departure times at a transport interchange to improve connections when services are disrupted. In: Allan, J., Brebbia, C. A., Hill, R. J., Sciotto, G. und Sone, S. (Hrsg.): Computers In Railways IX, 707-714, WITPRESS, Southhampton, Boston, 2004.
- [Talkline 2005] News der Talkline GmbH und Co. KG: Plus 10 Prozent - Deutschland hat 72 Millionen Handy-Nutzer, [http://www.talkline.de/unternehmen/presse/topnews\\_archiv/news13102281/](http://www.talkline.de/unternehmen/presse/topnews_archiv/news13102281/).

Letzter Zugriff: 06.05.2005.

- [TRI 2005] Transrapid International GmbH & Co. KG: Transrapid Homepage, <http://www.transrapid.de/>. Letzter Zugriff: 06.05.2005.
- [Tromp 2004] Tromp, J. P. M.: Validation of a train simulation model with train detection data. In: Allan, J., Brebbia, C. A., Hill, R. J., Sciutto, G. und Sone, S. (Hrsg.): Computers In Railways IX, 583-591, WITPRESS, Southhampton, Boston, 2004.
- [Turban/Aronson 1998] Turban, E.; Aronson, J. E.: Decision Support Systems and Intelligent Systems. Prentice-Hall, New Jersey, 5. Aufl., 1998.
- [Vazsonyi 2001] Vazsonyi, A.: Decision Support Systems. In: Gass, S. I. und Harris C. M. (Hrsg.): Encyclopedia of Operations Research and Management Science, 200-202, Kluwer Academic Publisher, San Francisco, 2001.
- [Vere 1980] Vere, S. A.: Multilevel counterfactuals for generalizations of relational concepts and prouductions. In: Artificial Intelligence 14, 139-164, 1980.
- [Wayflow 2004] BMBF-Projekt WAYflow: Mobilität in Ballungsräumen, <http://www.wayflow.de>. Letzter Zugriff: 07.12.2004.
- [Wegele/Schnieder 2004] Wegele, S.; Schnieder, E.: Automated dispatching of train operations using genetic algorithms. In: Allan, J., Brebbia, C. A., Hill, R. J., Sciutto, G. und Sone, S. (Hrsg.): Computers In Railways IX, 775-784, WITPRESS, Southhampton, Boston, 2004.
- [Wegele/Schnieder 2005] Wegele, S; Schnieder, E.: Optimisation based dispatching of train operations. Erscheint in: Lecture Notes in Computer Science; Proceedings of ATMOS04, Springer, 1 / 2005.
- [Wegener 2005] Wegener, M.: Die Welt des Schienenverkehrs, Thema: „European Train Control System (ETCS)“, [www.indusi.de](http://www.indusi.de). Letzter Zugriff: 06.05.2005.
- [Weiser 1991] Weiser, M.: The computer for the Twenty-First Century. In: Scientific American 265 (3), 94-104, 1991.
- [White 1996] White, J.: Mobile Agents White Paper. General Magic, Sunnyvale, CA, USA, 1996.
- [Wikipedia 2005a] Wikipedia - die freie Enzyklopädie: <http://de.wikipedia.org/wiki/NP-schwer>. Letzter Zugriff: 06.05.2005.
- [Wikipedia 2005b] Wikipedia - die freie Enzyklopädie: <http://de.wikipedia.org/wiki/Buchfahrplan>. Letzter Zugriff: 06.05.2005.
- [Wikipedia 2005c] Wikipedia - die freie Enzyklopädie: <http://de.wikipedia.org/wiki/XML>. Letzter Zugriff: 06.05.2005.
- [Wikipedia 2005d] Wikipedia - die freie Enzyklopädie: <http://de.wikipedia.org/wiki/ETCS>. Letzter Zugriff: 06.05.2005.
- [Willeke 2003] Willeke, R.: Bundesverkehrswegeplan 2003 - eine kritische Bestandsaufnahme. In: Internationales Verkehrswesen 55 (11), Deutscher Verkehrsverlag, Hamburg, 2003.
- [Williams 1999] Williams, H. P.: Model Building in Mathematical Programming. 4. Auflage, Wiley, New York, 1999.
- [Wiss. Beirat 2002] Wissenschaftlicher Beirat des BMVBW, Trennung von Netz und Transport im Eisenbahnwesen. In: Internationales Verkehrswesen 54 (6), Deutscher Verkehrs-Verlag, Hamburg, 2002.
- [Witte et al. 1994] Witte, T.; Claus, T.; Helling, K.: Simulation von Produktionssystemen mit SLAM - Eine praxisorientierte Einführung. Addison-Wesley, München, 1994.

- [Wooldrige/Jennings 1995a] Wooldrige, M.; Jennings, N.: Intelligent Agents: Theory and Practice. In: The Knowledge Engineering Review 10 (2), 115-152, 1995.
- [Wooldrige/Jennings 1995b] Wooldrige, M.; Jennings, N.: Intelligent Agents. Lecture Notes. In: Artificial Intelligence, 890, Springer, Heidelberg, 1995.
- [Wright 1997] Wright, S. J.: Primal-dual interior-point methods. SIAM Society for Industrial & Applied Mathematics, Philadelphia, 1997.
- [ZDF 2004] ZDF: Die Bahn und ihr chronisches Leiden, <http://www.heute.t-online.de/ZDFheute/artikel/25/0,1367,WIRT-0-2125913,00.html>, Mai 2004. Letzter Zugriff: Juli 2004.
- [Zhu/Schnieder 2001] Zhu, P.; Schnieder, E.: Determining Traffic Delays through Simulation. In: Computer Aided Scheduling of Public Transport, 387-399, 2001.
- [Zwaneveld et al. 2001] Zwaneveld, P. J; Kroon, L. G.; van Hoesel, S. P. M.: Routing trains through a railway station based on a node packing model. In: European Journal of Operation Research 128, 14-33, 2001.

# Glossar

**Anmerkung:** Die nachfolgenden Erläuterungen sind, sofern sie das Thema Bahn betreffen, an [Pachl 2005] orientiert. Andere Begrifflichkeiten wurden teilweise zusätzlich zur sich im Text befindlichen Definition mit Nachschlagewerken wie Wikipedia (im Internet unter <http://de.wikipedia.org/> oder dem Duden (vgl. [Duden 2001]) abgeglichen. Im Text bereits zitierte und hier zur Definition verwendete Ausführungen sind nicht erneut zitiert.

<b>Begriff</b>	<b>Abk.</b>	<b>Erläuterung</b>
Abbringer		Anschlussabnehmender Zug: Zug, der innerhalb eines bestimmten Intervalls nach der Ankunft eines Zubringers abfährt.
Agenten		Agenten sind Bestandteile komplexer, dynamischer Systeme sind, innerhalb derer sie selbständig, d. h. ohne Zutun des Menschen (inter-) agieren. Sie besitzen die Kontrolle über ihren eigenen Zustand, in dem sie sich bspw. selbständig starten und beenden können, um zielgerichtet einen bestimmten Zweck zu verfolgen.
Agenten, deliberative und reaktive Architekturen		Zwei extreme Architekturkategorien von Multiagentensystemen sind 1) komplexe, deliberative Softwareagenten, welche ein genaues Modell ihrer Umwelt haben und danach handeln und 2) einfache, reaktive Softwareagenten, deren Handeln durch einfache Verfahrensvorschriften bestimmt wird.
Agenteneigenschaften		Zu den Eigenschaften intelligenter Softwareagenten werden Autonomie (eigenständiges Handeln), Sozialfähigkeit (Kommunikationsfähigkeit), Reaktivität (auf Änderungen in der Umwelt, Proaktivität (Zielgerichtetes Handeln), Mobilität (zwischen verschiedenen Agenturen), Wahrhaftigkeit (keine absichtlichen Falschinformationen, Gutmütigkeit (keine Schadabsicht), Rationalität (keine Selbstbehinderung).
Agententypen		Agenten lassen sich anhand Ihrer Eigenschaften in verschiedene Typen einteilen. Für diese Arbeit wichtig sind zusammenarbeitende A. (Multiagentensysteme), Informations-A. (entsprechen quasi den Expertensystemen, erweitert um wenige Agenteneigenschaften), Interface-A. (Benutzungsschnittstelle, die nach den Vorgaben des Benutzers lernt und sich anpasst), Mobile A. (bewegen sich zwischen verschiedenen Agenturen), Lernende A. (passen sich an Veränderungen der Umwelt an und lernen auf verschiedene Art und Weise neues Verhalten).
Agentur		Ausführungsumgebung eines Agenten. Unterstützt bspw. Kommunikation und Sicherheitsmechanismen.
Algorithmen, deterministische		Das Ergebnis ist eindeutig durch die Eingabe festgelegt.
Algorithmen, randomisierte		Zufallseinflüsse werden derart berücksichtigt, dass dieselbe Eingabe zu unterschiedlichen Ergebnissen führen kann.
Angebotsdefinition		Phase der PPS eines Verkehrsdienstleisters: Die Angebotsdefinition befasst sich mit konzeptionellen Überlegungen für den Betrieb des Verkehrssystems, bspw. die Unterteilung in verschiedene Zuggattungen und zusätzliche, sich ergänzende Angebote im Nah-, Regional- und Fernverkehr sowie Erweiterungen des Zugsystems.
Ankunfts- und Abfahrts- tafeln		Spezielle Ansichten der Timeline eines Bahnhofs: es werden die Ankunfts- bzw. Abfahrtsereignisse zeitlich geordnet.
Anschluss		S. Abbringer.

<b>Begriff</b>	<b>Abk.</b>	<b>Erläuterung</b>
Anschlusskonflikte		Die für die kundenorientierte Disposition wichtigste Art von Konflikten: Soll ein Zug auf einen verspäteten Abbringer warten oder nicht?
Anschlussnetzwerk		Das sich durch die Zubringer-Abbringer-Relationen ergebende virtuelle, vom Fahrplan aufgespannte Netz. Es enthält alle möglichen Routen, die Passagiere im Netz wählen können.
Anschlussicherung		Durch einen Zugbegleiter bzw. den Zugchef beantragte Sicherstellung des Wartens eines Abbringers auf einen Zubringer.
Application Programming Interface	API	Programmierschnittstelle einer Software, mittels derer sich die Funktionen der Software zur Entwicklung von Erweiterungen und neuer Anwendungen ansprechen lassen.
Artificial Intelligence	AI	Künstliche Intelligenz (KI) ist eine Fachdisziplin der Informatik mit interdisziplinärem Charakter (bspw. Einflüsse aus der Linguistik, Psychologie, Mathematik und Logik der Philosophie). Ziel der KI ist es, Maschinen zu entwickeln, die sich verhalten, als verfügten sie über Intelligenz.
Backtracking-Algorithmus		Programmierstrategie nach dem Versuch-und-Irrtum-Prinzip: Unterschiedliche Algorithmen (je nach Problemstellung) wählen einen von mehreren Lösungswegen aus und verfolgen ihn über seine Entscheidungsknoten so lange, bis die Lösung gefunden worden ist, oder der Weg sich als definitiv falsch herausgestellt hat. Ist dies der Fall, kehrt man zum letzten Entscheidungsknoten zurück und wählt einen anderen Weg, bis einer ans Ziel führt
bahn.comfort		Kundenbindungsinstrument der Deutschen Bahn AG für Privatkunden.
bahn.corporate		Kundenbindungsinstrument der Deutschen Bahn AG für Geschäftskunden.
BahnCard		Kundenkarte der Deutschen Bahn AG, die zur Wahrnehmung von Rabatten berechtigt. Beispiel: BahnCard 50 berechtigt zu 50 % auf den Normalfahrpreis.
Bahnhof		Bahnanlage mit mindestens einer Weiche, an der Züge beginnen, enden, ausweichen oder wenden dürfen. Es existieren Personen-, Güter- und Betriebsbahnhöfe.
Bahnreform		Seit Anfang 1994 durch das „Eisenbahnneuordnungsgesetz“ in Kraft. Die Staatsbetriebe Deutsche Bundesbahn sowie Deutsche Reichsbahn wurden in das privatwirtschaftliche Unternehmen „Deutsche Bahn AG“ umgewandelt. Als Fernziel wurde die Kapitalmarktfähigkeit der Deutschen Bahn AG postuliert.
Besatzungseinsatzplanung		Phase der PPS eines Verkehrsdienstleisters: Für die in vorangegangenen Planungsphasen erstellten Fahrten müssen geeignete Arbeitspläne für das benötigte Bordpersonal (Crew) erstellt werden. Dieses besteht aus Zugführer und mehreren Zugbegleitern, Service-, Catering- und Reinigungspersonal. Die allgemeine Dienstplanung im Schienenverkehr setzt sich in der Praxis aus der Dienstplanung und der Dienstumlaufplanung für das Bordpersonal zusammen.
Betriebsqualität		„Empirische“ Qualität des Fahrplans: Planungsfehler treten oftmals erst zur Ausführung zutage.
Betriebszentrale	BZ	Betriebsleitstelle (faktisch: Rechenzentrum), in der Disposition und Fahrdienstleitung eines größeren Netzbereiches zusammengefasst sind.
Bluetooth		Industriestandard für die drahtlose (Funk-)Vernetzung von Geräten über kurze Distanz. Bluetooth bietet eine drahtlose Schnittstelle, über die sowohl mobile Kleingeräte wie Mobiltelefone und PDAs als auch Computer und Peripheriegeräte miteinander kommunizieren können.

Begriff	Abk.	Erläuterung
Branch & Bound-Verfahren		Algorithmus, der aus den beiden Schritten „Verzweigen“ und „Beschränken“ besteht. In einem Entscheidungsbaum wird eine Lösung gesucht. Ein weiterer Zweig wird nur untersucht, wenn die Chance besteht, dass dort eine bessere als die bereits gefundenen Lösungen sein könnte.
Breadth First Search	BFS	Breitensuche: Verfahren zum Durchsuchen bzw. Durchlaufen der Knoten eines Graphen. Breitensuche steht im Gegensatz zur Tiefensuche (depth-first search, DFS). Es werden immer zuerst alle direkten Nachfolger eines Knotens untersucht, anstelle zuerst einen Pfad in die Tiefe zu verfolgen.
Buchfahrplan		Fahrplanunterlage für das Zugpersonal. Enthält Fahrzeiten, zulässige Geschwindigkeiten sowie betriebliche Besonderheiten für den Laufweg eines Zugs.
Bundesverkehrswegeplan		Planung des Ausbaus und der Wartung der Verkehrsinfrastruktur in Deutschland.
Compact HTML	cHTML	Untermenge von HTML für i-Mode. Unterschiede sind die fehlenden Tabellen und Frames, der eingeschränkte Satz von Schriftarten, Einschränkungen bei der Verwendung von Bildern und das Fehlen von Style Sheets.
Crew Scheduling		S. Besetzungseinsatzplanung
Decision Support System	DSS	Entscheidungsunterstützungssystem: Rechnergestütztes System, welches Entscheidungsträger in schlecht strukturierten Entscheidungssituationen unterstützt. Sie gehören neben den Management Information Systems (MIS) bzw. Data Support Systems zu den Management Support Systems (MSS). In diesen Zusammenhang fallen auch Executive Information oder Support Systems (EIS bzw. ESS)
Deliberation		(lat. deliberare): Überlegung, Beratschlagung. Deliberierende Agenten besitzen ein internes Modell ihrer Umgebung und sind in der Lage, Entscheidungen für Planungen oder Verhandlungen mit anderen Agenten daraus abzuleiten.
DESMO-J		Discrete-Event Simulation and Modelling in JAVA; Simulationsbibliothek in der Programmiersprache JAVA.
Dienstplanung		Teil der Besetzungseinsatzplanung: Es wird ein geeigneter Satz von Schichten für die Bordpersonalbesetzungen bestimmt. Diese Schichten beinhalten jeweils mehrere Teilstücke von Fahrten für die Crews innerhalb eines bestimmten Zeitraums, in der Regel für ein oder zwei Tage.
Dienstumlaufplanung		Teil der Besetzungseinsatzplanung: Sie beinhaltet dann die Bildung von Arbeitsplänen für jede einzelne Bordbesetzung über einen größeren Betrachtungszeitraum (bspw. ein Monat) hinweg.
Diffuse Adversary		Ein diffuse adversary ist ein Offline-Gegenspieler eines Online-Algorithmus, der die Eingaben für diesen zufällig nach einer bekannten Verteilung auswählt, wobei dem Online-Algorithmus die Art der Verteilung (aber nicht die Verteilung selbst) bekannt ist.
Dijkstra-Algorithmus		Algorithmus zur Suche der kürzesten Wege von einer Quelle zu einem Ziel in einem Netzwerk.
Directed Acyclic Graph	DAG	Gerichteter Graph ohne gerichtete Zyklen.
Disponent		Dispositionsorgan in der Realität und in TrainSim: Während in der Realität aber eine hierarchische, verteilte und nach Funktionen getrennte (unterschiedliche Instanzen in EIU und EVU) Disposition stattfindet, wird in der Simulation lediglich verteilt.

<b>Begriff</b>	<b>Abk.</b>	<b>Erläuterung</b>
Disposition		Im Kontext dieser Arbeit die Kontrolle und Steuerung der Produktion der Bahngesellschaft.
Disposition der Passagiere		Steuerung der Passagiere durch das dynamische Bahnnetz mittels Information und ggf. Interaktion (bei Vorhandensein entsprechender technischer Mittel).
Dispositionsfahrplan		Um dispositive Maßnahmen erweiterter Sollfahrplan.
Dispositionsmodell		Die Abbildung der Dispositionsarchitektur im TrainSim-Modell
Dispositionsstrategie		Ein Algorithmus, der nach einem definierten Bewertungsmaßstab eine Dispositionsentscheidung berechnet, wird im Kontext dieser Arbeit als Dispositionsstrategie bezeichnet. Einfache DS umfassen schnell zu berechnende Methoden, die direkt von einem Disponentenagent berechnet werden können, komplexe DS werden von Strategieagenten bestimmt.
Document Type Definition	DTD	Definition der Sprachelemente einer Auszeichnungssprache, bspw. werden HTML und WML mittels einer DTD definiert.
Einbruchsverspätungen und Ausbruchsverspätungen		Verspätungen, die in den Dispositionsbereich eines Disponenten einbrechen bzw. diesen verlassen.
E-Info		Kundeninformationssystem, welches Verspätungsmeldungen für Pendler per SMS verschickte, Vorläufer zu KIIS.
Einschwingphase		Erste Outputs eines nicht initialisierten Simulationslaufs. Die Einschwingphase kann die Outputgrößen positiv oder negativ verzerren, sodass sie ggf. entfernt werden muss. Die E. resultiert aus dem Anfangszustand des Modells, in dem alle Warteschlangen und Bearbeitungsstationen noch ungefüllt sind, also noch nicht die Auslastungsquoten des stationären Zustands aufweisen.
Eisenbahninfrastrukturunternehmen	EIU	Betreiber des Netzwerkes eines Bahnsystem (Schienen und Bahnhöfe).
Eisenbahnverkehrsunternehmen	EVU	Anbieter von schienengebundenen Transportdienstleistungen.
Elektronisches Stellwerk	ESTW	Elektronisch gesteuerte Sicherungsanlage zum zentralisierten Bedienen von Weichen und Signalen. Ein Stellwerk enthält in der Regel auch eine zentralisierte Sicherungslogik.
Enhanced Data Rates for GSM Evolution	EDGE	Datenübertragungsstandard für die Mobilkommunikation. EDGE ist eine Weiterentwicklung von HSCSD und GPRS zur Erhöhung der Bandbreite unter Beibehaltung der GSM-Infrastruktur.
Entscheidungsunterstützungssystem	EUS	S. Decision Support System
Eurobalisen		Punktförmige Übertragungseinrichtungen zur Informationsübertragung zum Zug und zu dessen Ortung.
European Rail Traffic Management System	ERMTS	Europäisches Gemeinschaftsprojekt, welches die Verbesserung des vorhandenen Kommunikations- und Meldesystems der verschiedenen Bahngesellschaften zum Ziel hat. Hauptbestandteile des Projekts sind GSM-R und ETCS.
European Train Control System	ETCS	Das ETCS ist, neben GSM-R, die zweite Hauptkomponente des ERMTS. Aufgrund einer Vielzahl technischer Hürden und Inkompatibilitäten, die den europäischen Schienenverkehr behindern, soll mit der Einführung von ETCS ein einheitliches europäisches Zugsteuerungs- und Zugsicherungssystem geschaffen werden.

Begriff	Abk.	Erläuterung
Exakte Verfahren		Exakte Verfahren versuchen einen Output zu finden, der eine gegebene Zielfunktion unter Einhaltung bestimmter Nebenbedingungen, sog. Restriktionen, maxi- oder minimiert. Ggf. muss gezeigt werden, dass kein Optimum existiert.
Executive Information System	EIS	S. Decision Support System
Experimentationsdesign		In der Simulation werden für jede zu untersuchende Systemkonfiguration die Länge des Simulationslaufes und der Einschwingphase sowie die Anzahl der unabhängigen Laufwiederholungen (Replikationen) spezifiziert. Dabei kann die Zahl der Replikationen durch die Kombinatorik bei vielen zu untersuchenden Einflussgrößen leicht prohibitiv groß werden, um in der geplanten Zeit zu den gewünschten Ergebnissen zu gelangen. Ein gutes Design ist also für den Erfolg der Studie von zentraler Bedeutung.
Expertensystem		Expertensysteme sind Systeme, die nicht auf algorithmischen Prozessen unter Verwendung von Daten und Programmen operieren, sondern auch Wissen und Erfahrung nutzen, welches von menschlichen Experten u. U. computerunterstützt gewonnen (akquiriert), artikuliert (repräsentiert), verarbeitet (manipuliert) und bewertet (evaluiert) werden kann.
Expertensystem-Shell		Werkzeug zur Unterstützung der Entwicklung von Expertensystemen.
Extensible Markup Language	XML	Standard zur Erstellung maschinen- und menschenlesbarer Dokumente in Form einer Baumstruktur. XML definiert dabei die Regeln für den Aufbau solcher Dokumente. Es ist möglich, Untermengen zu bilden und eine neue Semantik einzuführen. Dazu werden DTDs benutzt.
Fahrdienstleiter		Mitarbeiter, dem auf den ihm zugeordneten Betriebsstellen eigenverantwortlich die Zulassung der Zugfahrten obliegt.
Fahrdraht		Stromführender Draht einer Oberleitung.
Fahren auf Sicht		Fahrweise eines Zugs, in der er vor Hindernissen noch sicher anhalten kann.
Fahren im absoluten Bremswegabstand		Zwei Züge fahren im absoluten Bremswegabstand, wenn zwischen ihnen mindestens ein Abstand in Höhe des geschwindigkeitsabhängigen Bremswegs des zweiten Zugs eingehalten wird.
Fahren im Raumabstand		Zwei Züge fahren im Raumabstand, wenn zwischen ihnen ein Abstand in Höhe des maximalen Bremswegs des zweiten Zugs eingehalten wird.
Fahrlagenplanung		Die Fahrlagenplanung bestimmt auf Basis des erstellten Linienplans einen periodischen oder nichtperiodischen Fahrplan, also die zeitlichen Lagen der Züge im Verhältnis zueinander.
Fahrplan		Festlegung der logischen Routen der Züge hinsichtlich der Verkehrstage und der Fahrzeiten.
Fahrplan, periodischer		Ankunfts- und Abfahrtszeiten der Züge in den Stationen der Linien werden derart festgelegt, dass die Linien im vorgegebenen Takt bedient werden können.
Fahrplangenerierung		Oberbegriff für alle zur Erstellung des Fahrplans notwendigen Teilaufgaben.
Fahrplanstabilität/-robustheit		Fähigkeit des Fahrplans, die Propagation von Störungen zeitlich und räumlich zu begrenzen und abzubauen.
Fahrplantrassen		S. Trasse, Fahrplantrasse.
Fahrplanung, zugweise		Anpassung des erstellten Fahrplans an unterschiedliche lokale Anforderungen, d. h., einzelne Fahrten werden von erfahrenen Planern optimiert.

<b>Begriff</b>	<b>Abk.</b>	<b>Erläuterung</b>
Fahrweg		Eine physikalische, sich aus der Netzwerktopologie ergebende Route durch das Bahnnetz.
Fahrzeugeinsatzplanung		Phase der PPS eines Verkehrsdienstleisters: Die Aufgabe der Fahrzeugeinsatzplanung ist die Zuweisung von Lokomotiven und Personenwagen zu den einzelnen Fahrten, die in der Fahrlagenplanung erstellt wurden. Aus den vorangehenden Planungsstufen sind die Anfangs- und die Endstationen mit den dazugehörigen Abfahrts- und Ankunftszeiten der einzelnen Linien bekannt.
Firstgate		Spezielles Micro-Payment-System.
First-In-First-Out	FIFO	Strategie zur Abarbeitung von Aufträgen oder Anfragen: Wer zuerst kommt, wird auch zuerst bedient.
Fleet Assignment		s. Fahrzeugeinsatzplanung
Folgeverspätungen		S. Verspätung, sekundäre oder induzierte.
General Packet Radio Service	GPRS	Standard zur Datenübertragung bei der Mobilkommunikation. Im Unterschied zu HSCSD arbeitet GPRS paketvermittelt und erlaubt damit eine bessere Ausnutzung vorhandener Übertragungskapazitäten, vor allem bei schwankenden Datenmengen.
Gleis		Fahrspur eines Zugs. Meistens bilden zwei Gleise eine Strecke.
Global Positioning System	GPS	Satellitengestütztes Ortungssystem, bspw. zur Navigation mit dem Auto oder der genauen Ortung von Zügen.
Global System for mobile Communication (-Rail)	GSM(-R)	Etablierter europäischer Standard für den digitalen Mobilfunk, 1989 vom ETSI vorgestellt. Das System wurde so ausgelegt, dass viele Millionen Kunden pro Netzwerk versorgt werden können. GSM-R ist eine spezielle Implementierung dieses Standards für Bahnnetze im Rahmen des ERMTS.
GREEDY		Verfahren zur Online-Optimierung: Bei jeder Entscheidung wird die lokal beste Option gewählt.
Heapspeicher		Datenstruktur, in welche effizient Elemente in der Art gelegt werden können, sodass das nach einem bestimmten Ordnungskriterium größte (oder kleinste) Element ohne weitere Suche entnommen werden kann.
Heuristik		Methodische Anleitung oder auch Anweisung zur Gewinnung neuer Erkenntnisse.
High Speed Circuit Switched Data	HSCSD	Datenübertragungsstandard für die Mobilkommunikation: Es werden bis zu 14.400 Bit/s pro Kanal erreicht.
Hypertext Markup Language	HTML	Auszeichnungssprache für die Programmierung von Inhalten des World Wide Web. Bildet eine Anwendung von XML.
IGNORE		Verfahren zur Online-Optimierung: Anfragen können gesammelt werden; über diese wird dann ein optimaler Plan berechnet. Revision getroffener Entscheidungen ist möglich.
i-Mode		Proprietärer Protokoll, welches ähnlich WAP den Zugriff auf das Internet über mobile Endgeräte ermöglicht.
Interior-Point-Methode		Methode zur Lösung eines Linearen Programms in polynomieller Zeitkomplexität.
Intermodaler Verkehr		Verkehr unter Ausnutzung verschiedener Fortbewegungsmittel. Beispiel einer Reise: Mit dem Auto zum Zug, mit diesem zum Flugzeug, am Ziel in ein Taxi zum Hotel.
IrDA		Standard für die Infrarotübertragung. Das Kürzel IrDA steht sowohl für die Gruppierung (Infrared Data Association) als auch ihren entwickelten Standard.

Begriff	Abk.	Erläuterung
Kausalität		Zeitliche und logische Abhängigkeiten innerhalb eines Systems.
Key Account Ticket		Großkundenticket der Deutschen Bahn AG.
Kompetitive Analyse		Vergleich eines Online-Algorithmus mit einem optimalen Offline-Algorithmus.
Konfidenz		Bezeichnet im Kontext dieser Arbeit die Güte einer Dispositionsstrategie. Dabei ist nicht nur wichtig, dass eine Strategie im Sinne der Zielfunktion gute Ergebnisse liefert, sondern auch, ob die resultierenden Pläne umgesetzt werden können.
Konflikt		Koinzidenz sich widersprechender Zielsetzungen einzelner Systementitäten, z. B. die gleichzeitige Anforderung desselben Gleises durch zwei verschiedene Züge. Dazu zählen bspw. Fahrplank. (unplanmäßige Durchführung von Zugfahrten), Verspätungsk. (Untergruppe Fahrplank.), Anschlussk., Umlaufk. (nicht rechtzeitig bereitgestellte Ressourcen), Dispositionsk. (Unterschiedliche Lösungsvorschläge für einen Konflikt), Deadlockk. (nicht fortsetzbare Fahrt), Fahrwegk. (zeitliche Überschneidung von Fahrplantrassen, Belegungsk. (gleichzeitige) Beanspruchung von Ressourcen durch zwei oder mehrere Züge).
Kundenorientierte Disposition		Dispositive Maßnahmen, die Züge und Passagiere mit dem Ziel der Erhöhung der Passagierpünktlichkeit durch das dynamische Netzwerk der Bahn steuern.
Kundenorientierte Dispositionsstrategien		Dispositionsstrategien, die anstelle der Zugpünktlichkeit die Passagierpünktlichkeit unter Einhaltung technischer und sicherheitsrelevanter Kriterien verbessern und ggf. zusätzliche dispositive Maßnahmen, wie die dynamische Neuberechnung von Routen oder die Information und Interaktion des bzw. mit dem Kunden, in die Wege leiten.
Künstliche Intelligenz		S. Artificial Intelligence.
Lineares Programm	LP	Lineare Zielfunktion, die durch lineare Gleichungen und Ungleichungen eingeschränkt ist. Probleme dieser Art lassen sich effizient lösen.
Linie		Eine Linie ist eine Sammlung von Zügen normalerweise identischer Gattung, welche dieselben Bahnhöfe zu unterschiedlichen Zeiten anfahren. Meistens fahren die Züge einer Linie im Takt.
Linienleiter		Hilfsmittel bei der Linienzugbeeinflussung, mit dem sich Züge selbst orten können.
Linienplanung		Phase der PPS eines Verkehrsdienstleisters im Anschluss an die Festlegung der Zugkategorien. Ziel der Linienplanung ist, aus einer Vielzahl möglicher Linien und unter Beachtung der vorhandenen Restriktionen eine optimale Menge an Linien zu bestimmen.
Linienzugbeeinflussung		Sicherheitssystem, das vor allem bei Geschwindigkeiten über 160 km/h aufgrund der langen Bremswege eingesetzt werden muss.
Logischer Prozess		Die bei der Verteilung von Simulationsmodellen entstehenden Submodelle werden jeweils von einem eigenen ereignisgesteuerten Simulator ausgeführt und als logische Prozesse (LP) bezeichnet.
LP-Relaxation		Eine LP-Relaxation erhält man, indem die in einem MIP-Modell enthaltenen Integer-Restriktionen aufgehoben werden.
Management Information bzw. Support System	MIS bzw. MSS	S. Decision Support System.
Mathematische Programmierung		Oberbegriff für die lineare und die gemischt-ganzzahlige Programmierung. Ganz allgemein soll ein Problem der Art $\min cx$ mit $Ax = b$ gelöst werden.

Begriff	Abk.	Erläuterung
Metaheuristik		Allgemeine, nicht exakte Verfahren zur Lösung eines Optimierungsproblems, zumeist auf Grundlage der lokalen Suche. Dazu zählen bspw. Ant Systems, Tabu Search, Simulated Annealing, Genetische Algorithmen
Micro-Payment-System		System, welches effizient die Überweisung von Klein- und Kleinstbeträgen erledigt.
Mikrosimulation		Mikroskopische Simulation oder Mikrosimulation ist die Beschreibung des Verhaltens der atomaren (Sub-) Systementitäten statt der Beschreibung des Systemverhaltens an sich. Im Sinne des Bahnsystems ist die Simulation jedes einzelnen Passagiers gemeint.
Mindestaufenthaltszeit		U. a. von der Anzahl der aussteigenden Passagiere abhängige Zeitspanne, die ein Zug sich an einer Station mindestens aufhalten muss, damit alle notwendigen Vorgänge erledigt werden können.
Mindestübergangszeit	MÜZ	Zeitspanne, die ein Passagier mindestens benötigt, um von einem Zubringer aus einen Abbringer zu erreichen. Sie ist u. a. von baulichen Gegebenheiten eines Bahnhofs abhängig. Es ist möglich, dass mehrere Werte für denselben Bahnhof existieren.
Mixed Integer Programming	MIP	Ein gemischt-ganzzahliges Optimierungsproblem (mixed integer problem) liegt vor, wenn eine Teilmenge der Variablen, die den Systemzustand beschreiben, nur ganzzahlige Werte annehmen darf. Bspw. können Dispositionsentscheidungen durch binäre (0/1-) Variablen modelliert werden.
Mobile Computing		Schlagwort für den mobilen Umgang mit mobiler Informationstechnologie. In den unterschiedlichsten Zusammenhängen verwendet, obwohl keine wirklich einheitliche Definition existiert. Mobile Computing umfasst Konzept wie „allgegenwärtige Computer“, „Nomadic Computing“, „Ad-hoc-Vernetzung“ usw.
Mobilkommunikation		Konzept des Mobile Computing: Mobilkommunikation beschränkt die Sicht auf die reine Kommunikation. Der Bedarf nach Mobilkommunikation entsteht dann, wenn ein Gerät zwischen verschiedenen Netzwerken bewegt wird.
Modalsplit		Aufteilung des gesamten Verkehrsaufkommens auf die verschiedenen Beförderungsarten.
Modell		Abbild eines Systems: Ein Modell besitzt im Gegensatz zum Realsystem lediglich eine definierte Menge an Variablen, die das prinzipielle Verhalten des Systems abbilden. Dabei werden nur die relevanten Parameter und Einflussgrößen berücksichtigt. Ein Modell soll das reale System abstrahieren und auf die Fragestellung schnell eine aussagekräftige Antwort geben. Bei der Modellerstellung darf nie das Ziel der Untersuchung aus den Augen gelassen werden; ein Modell allein besitzt keine Existenzberechtigung.
Modell- oder Matrixgenerator		Der Modellgenerator erzeugt aus vorhandenen Modelldaten und -parametern ein mathematisches Modell in einem für das Optimierungssystem verständlichen Format. Dies kann ein Standardformat (i. Allg. MPS-Format) oder auch ein proprietäres Datenformat sein.
MPS-Format		Das MPS-Format ist das am weitesten verbreitete Standardformat zur Speicherung von mathematischen (linearen und gemischt-ganzzahligen) Modellen und wird praktisch von allen kommerziellen und vielen nicht-kommerziellen Optimierungssystemen unterstützt.
Multiagentensystem	MAS	In einem MAS arbeiten mehrere Agenten zusammen, um gemeinsame Ziele zu erreichen.

Begriff	Abk.	Erläuterung
Multimedia Messaging Service	MMS	Der Multimedia Messaging Service (MMS) ist ein neuerer, standardisierter Mitteilungsdienst für Mobiltelefone.
Netz 21		Investitionsstrategie der DB Netz AG: Netz 21 unterteilt das Streckennetz in die drei verschiedenen Bereiche „Vorrangnetz“, „Leistungsnetz“ und „Regionalnetz“. Durch diese Aufteilung sollen Konfliktmöglichkeiten minimiert und folglich Kosten gesenkt und Reisezeiten verkürzt werden.
Netzadministrator		Agent im TrainSim-Modell, der das Netzwerk kontrolliert und für die sichere Durchführung von Zugläufen sorgt.
NetzCard		Kundenkarte der Deutschen Bahn AG, mit der alle regulären Verbindungen der DB kostenfrei genutzt werden können.
Netze, virtuelle		Durch die verschiedenen Zuggattungen und deren Eigenschaften aufgespannte Teilmengen der durch den Fahrplan definierten Topologie.
Netzlage		Istzustand im realen oder simulierten Bahnnetz.
Netzstrukturplanung		Phase der PPS eines Verkehrsdienstleisters, in der das Netz geplant wird. Da das Schienennetz historisch gewachsen ist, sind im Wesentlichen Entscheidungen über die Anpassung des bestehenden Netzes an die prognostizierte Nachfrage zu treffen.
Netzwerk- und Kapazitätsplanung		Die auf der Prognose der Passagiernachfrage basierende Planung und Dimensionierung des Netzes und der darin erbrachten Leistungen.
Nichtnullelement		Diejenigen Elemente der Matrix $A$ der Restriktionen eines Mathematischen Programms $Ax = b$ , die sich von Null unterscheiden. Die Anzahl der Nichtnullelemente ist einer der Gradmesser für die Schwierigkeit eines Problems. Normalerweise ist die Matrix $A$ dünnbesetzt (sparse), d. h., die Besetzungsdichte liegt maximal im niedrigen Prozentbereich.
Niemals Warten		Allgemeine Dispositionsstrategie: Kein Abbringer wartet auf seinen verspäteten Zubringer. Damit sind relativ wenige Züge unpünktlich, aber die Anzahl verpasster Anschlüsse ist sehr hoch.
Nomadic Computing		Befasst sich mit den Anforderungen an die Geräte und den Problemen bei der mobilen Kommunikation. Es werden insbesondere auch die Probleme am Zielort einer Reise betont.
NP-schwer		Komplexitätsklasse von Problemen, welche i. Allg. aufwändig zu berechnen sind.
Offline-Optimierungsprobleme		Bei einem Optimierungsproblem soll die bestmögliche aus einer Menge potenzieller Lösungen gesucht werden indem eine Zielfunktion, welche eine Lösung bewertet, minimiert oder maximiert wird. „Offline“ deutet an, dass dies unter vollständiger vorliegender Information geschieht.
Online Travelling Salesman Problem	OLTSP	Das OLTSP ist die Online-Variante des Traveling-Salesman-Problem (TSP). Dabei besucht ein Handelsreisender während einer Tour verschiedene Städte mit einer einheitlichen Geschwindigkeit. Die Anfragen für die zu besuchenden Städte erhält der Reisende online während seiner Tour. Diese soll als Restriktion am Startpunkt beginnen und nach erledigter Arbeit dort wieder enden.
Online-Optimierungsprobleme		Optimierungsprobleme, die ohne vollständige Informationen gelöst werden, häufig mit Echtzeitanforderung. Beispiel ist die Disposition von Taxis oder eben die Disposition bei der Bahn.
Optimierer		Im Kontext dieser Arbeit eine Software zur Berechnung der Lösung eines mathematischen Programms.
Optimierungsproblem, gemischt-ganzzahliges	MIP	S. Mixed Integer Problem

Begriff	Abk.	Erläuterung
Origin/Destination-Matrix	OD-Matrix	Quelle-Ziel-Verflechtungsmatrix: In dieser Matrix wird für jede Relation (Verbindung zwischen zwei Orten bzw. Regionen) die Verkehrsnachfrage angegeben: jeder Eintrag $(i, j)$ gibt die Anzahl der Personen an, die von Ort $i$ nach Ort $j$ reisen möchten.
Passagier		Reisender im Bahnnetz
Passagieragenten		Agenten, welche den Passagier innerhalb TrainSim abbilden. In einem Realsystem würden sie auch die Schnittstelle zu Ihrem jeweiligen Prinzipal (Auftraggeber) darstellen.
Passagierrouter		Agent im Konzept der kundenorientierten Disposition, welcher im sich dynamisch verändernden Time-Space-Netzwerk der Anschlussbeziehungen neue Reiserouten für Passagiere berechnen kann. Damit kann er im Rahmen kundenorientierter Dispositionsstrategien und zum Re-Routing von Passagieren mit verpassten Anschlüssen verwendet werden.
Passagiersteuerung		Äquivalent zur Zugsteuerung innerhalb der kundenorientierten Simulation: Passagiere werden mittels des Passagierrouters und per Information durch das dynamische Fahrplannetz gelenkt.
Passagierverwaltung		Spezielle Agentur zur Verwaltung von Passagieragenten.
Passagierwarteminuten		Ungeplante, gewichtete Wartezeit von Passagieren während ihrer Reise durch das Bahnnetz.
PayPal		Spezielles Micro-Payment-System.
Personal Digital Assistant	PDA	Mobile Kleincomputer (Handhelds), die oft auch als Notepads oder Organizer bezeichnet werden; bzgl. der Anwendung Notebooks ähnlich, allerdings mit sehr reduzierten Prozessorleistungen und geringen Speicherkapazitäten. Meist bieten sie Programme zur Verwaltung von Adressen und Telefonnummern, einen Terminkalender und eine Notizbuchfunktion. Es können aber auch neue Programme installiert werden, z. B. vereinfachte Office-Applikationen.
PIEPSER		Projekt zum Test individualisierter Informationen für bestimmte Bahreisende, wie der Name sagt: Personalisierte Informationen exklusiv für Pendler bei Störungen des öffentlichen Verkehrs. Ähnlichkeiten mit E-Info sind vorhanden.
Planungsqualität des Fahrplans		Grad der Übereinstimmung des Fahrplans mit den Trassenwünschen der Kunden.
Produktionsplanung und -steuerung	PPS	Die Produktionsplanung und -steuerung hat die Aufgabe einer bedarfs- und termingerechten Planung, Kontrolle und Steuerung aller mit der Herstellung der jeweiligen Produkte oder Dienstleistungen verbundenen Abläufe inkl. der notwendigen Verwaltungsschritte. Dabei findet endet die Planungsphase, die, je nach Produkt mit einem gewissem zeitlichen Vorlauf begann, naturgemäß direkt vor der Steuerung, welche den operativen Ablauf sichert.
Produktplanung		Im Kontext dieser Arbeit: Definition der angebotenen Transportdienstleistung: Welche Relationen sollen mit welcher Art Zug realisiert werden?
Prognose der Passagier-nachfrage		Grundlage jeder Verkehrsplanung ist das prognostizierte Passagieraufkommen zwischen den bewohnten Gebieten einer Gesellschaft. Da die Bahn systembedingt nur sehr langfristig auf Nachfrageschwankungen reagieren kann, müssen Bedarfe für viele Jahre im Voraus prognostiziert werden und mithin Zeiträume von mehreren Jahren und Jahrzehnten umfassen.

Begriff	Abk.	Erläuterung
Pull-Prinzip		Im Kontext dieser Arbeit das Prinzip die Bereitstellung allgemeiner Netzlage-Informationen zum Abruf durch Reisende an Bahnhofstafeln oder per Durchsage.
Pünktlichkeit		Zielkriterium für die Disposition. Für den Grad der Zielerreichung ist offensichtlich entscheidend, wann ein Zug pünktlich ist, und wann nicht. Werden bspw. Verspätungen bis 5 Minuten nicht als solche betrachtet, ist die Quote pünktlicher Züge sehr hoch.
Push-Prinzip		Im Kontext dieser Arbeit das Prinzip des proaktiven Versendens individuell benötigter Information an einen Reisenden.
RailML		XML-Dialekt zum Austausch bahnspezifischer Daten zwischen Modellen und Programmen.
Regelwartezeiten		Spezielle Dispositionsstrategie, nach der bestimmte Zuggattungen auf andere bis zu einer bestimmten Zeit automatisch warten. Erst danach tritt ein Konflikt auf.
Reisende		Reisende können nach Regelmäßigkeit der Nutzung oder auch nach der Länge der Reise klassifiziert werden in Pendler und Gelegenheitsreisende bzw. in Nahverkehrsnutzer, Regional- und Fernreisende.
Relation		Vom Fahrplan determinierte Quelle-Ziel-Verbindung.
REPLAN		Strategie zur Online-Optimierung: Nach jedem neu eingehenden Auftrag wird (möglichst offline-optimal) neu geplant.
Resource Augmentation		Alternative zur kompetitiven Analyse: Beim Einsatz von resource augmentation erhält ein Online-Algorithmus mehr Ressourcen (z. B. mehr oder schnellere Rechner), um seine Position gegenüber dem Offline-Algorithmus zu verbessern.
Ressourcenplanung		Einplanung zur Produktion benötigter Personal- und Fahrzeugressourcen.
Revenue-Management		Kapazitätssteuerung durch Preisdifferenzierung: Versuch, durch dynamische Anpassung der Preise und Kapazitätsklassen eine gegebene Gesamtkapazität gewinnoptimal zu nutzen.
RFID-Chips		Radio Frequency Identification zählt zu den automatisierten Identifikationstechniken. Radiowellen werden dazu benutzt, eindeutige Kennnummern zu versenden.
RIS		Reisendeninformationssystem der Deutschen Bahn AG, in dem alle aktuellen Zuglaufinformationen zusammenlaufen.
Rollback		S. Timewarp
Route		Weg von einer Quelle <i>A</i> zu einem Ziel <i>B</i> . Wird durch eine geordnete Menge von Knoten eines Netzwerks, durch die der Weg geht, repräsentiert.
Sensitivitätsanalyse		Analyse des Outputverhaltens eines Systems bei marginaler Variation der Inputs.
Sequenzialisierung		In der Simulation das Herbeiführen einer Reihenfolge von Ereignissen mit gleichen Zeitstempeln ohne Verletzung der Kausalität.
Sequenz-Modell		Modell der Online-Optimierung: Ein Online-Algorithmus ALG wird in diesem Modell mit einer endlichen Folge von Anfragen konfrontiert. Jede Anfrage muss sofort nach ihrem Auftreten durch den Algorithmus unwiderruflich beantwortet werden. Während der Bearbeitung hat der Algorithmus keine Kenntnis über nachfolgende Anfragen; erst nach erfolgter Bearbeitung der Anfrage wird dem Algorithmus die nächste Anfrage mitgeteilt.

<b>Begriff</b>	<b>Abk.</b>	<b>Erläuterung</b>
Short Message Service	SMS	Mittels des Short Message Service können alphanumerische Punkt-zu-Punkt-Nachrichten bis zu einer Länge von 160 Zeichen zwischen einer Zentrale und einem mobilen Endgerät in einem GSM-Netz ausgetauscht werden.
Signal		Verschiedene Arten von Zeichen, die den Regelbetrieb des Bahnsystems sicherstellen. Bspw. lässt ein Hauptsignal die Einfahrt eines Zugs in den auf das Signal folgenden Gleisabschnitt zu
Simulation		Nachbildung eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind.
Simulation, asynchrone		Simulationsverfahren für Leistungsuntersuchungen von Eisenbahnbetriebsanlagen, bei dem die Sperrzeitentreppe der zu simulierenden Zugfahrten nacheinander (d. h. asynchron) in einen Bildfahrplan eingelegt und die dabei auftretenden Konflikte nach vorgegebenen Regeln gelöst werden.
Simulation, diskrete, ereignisorientierte		Spezielle Art der Simulation, in der Ereignisse Zustandsänderungen eines Systems definieren. Die Simulationszeit wird diskret inkrementiert, die Zeitsteuerung kann mittels fixer oder variabler Zeitschritte erfolgen. TrainSim ist ein Beispiel eines solchen Simulationssystems mit einem konstanten Zeitfortschritt.
Simulation, parallele und verteilte		Große Simulationsmodelle können durch eine geeignete Parallelisierung bzw. Verteilung auf verschiedene Prozessoren in ihrer Laufzeit verkürzt werden; außerdem steht auf diese Weise mehr Hauptspeicher zur Verfügung. Die so entstehenden Submodelle heißen Logische Prozesse.
Simulation, synchrone		Simulationsverfahren für Leistungsuntersuchungen von Eisenbahnbetriebsanlagen, bei dem alle betrieblichen Teilprozesse zeitsynchron abgebildet und dabei auftretende Konflikte nach vorgegebenen Regeln gelöst werden.
Simulationswerkzeug		Softwaresysteme, welche die Anwendung der Simulation unterstützen. Es existieren allgemeine Programmiersprachen und deren Simulationsbibliotheken, Simulationssprachen und visuelle Simulationswerkzeuge.
Slot		Slots sind Zeitfenster, innerhalb derer eine bestimmte Fahrplantrasse genutzt werden muss. Geschieht dies nicht, wird es zu Konflikten kommen.
Special Ordered Set des Typs 1 oder 2	SOS1/ SOS2	Eine SOS1-Menge ist eine Menge von Variablen (kontinuierlich oder ganzzahlig) von denen genau eine Variable ungleich Null sein muss. Eine SOS2-Menge ist eine geordnete Menge von Variablen von denen höchstens zwei aufeinanderfolgende ungleich 0 sein dürfen. Für beide Mengen gibt es in den meisten Optimierern spezielle Algorithmen, um sie effizient zu behandeln.
Sperrzeit		Zeitspanne, in der ein Gleisabschnitt durch eine Fahrt blockiert - für andere Züge gesperrt - ist.
Sperrzeitentreppe		Grafische Darstellung der Sperrzeiten einer von einem Zug durchfahrenen Folge von Gleisabschnitten.
Station		Haltepunkt auf der Route eines Zugs.
Stellen		Knotenpunkte des Bahnnetzes inkl. aller Bahnhöfe, Weichen, Signale usw.
Stellwerk		Sicherungsanlage zum zentralisierten Bedienen von Weichen und Signalen. Ein Stellwerk enthält in der Regel auch eine zentralisierte Sicherungslogik zum Herstellen der dazu erforderlichen Abhängigkeiten.

Begriff	Abk.	Erläuterung
Störung		Kann ein Fahrplan aufgrund irgendeiner Ursache nicht durchgeführt werden, ist eine Störung aufgetreten. Diese kann im Prinzip von einer kleinen Verspätung bis zu einer tagelang gesperrten Strecke reichen.
Störung, induzierte		Durch einen Konflikt oder eine Dispositionsentscheidung - also durch eine zeitlich vorgelagerte Störung - hervorgerufene Störung.
Strategieagent		Agent in TrainSim, der für die Berechnung komplexer Dispositionsstrategien zuständig ist.
Strecken		Ein- oder mehrgleisige Verbindung zweier Stellen im Bahnnetz mit Kilometrierung.
Streckendispositionsbezirke		Unterabschnitt eines zu disponierenden Bereichs einer Betriebszentrale.
Synchronisation		Erhaltung der Kausalitätsbeziehungen zwischen verschiedenen, parallel ausgeführten Ereignissen.
Synchronisationsverfahren, Deadlock erkennende und behebende oder Deadlock vermeidende		Unterkategorien konservativer Synchronisationsverfahren.
Synchronisationsverfahren, optimistische und konservative		Verfahren zur Synchronisation verteilt ausgeführter Ereignisse, also zur Erhaltung deren Kausalität. Prinzipiell unterteilbar in konservative, optimistische und hybride Methoden. Konservative Synchronisationsmethoden vermeiden Kausalitätsverletzungen, indem nur solche Ereignisse ausgeführt werden, für die sicher bekannt ist, dass der ausführende Prozess keine Ereignisse mit früherem Zeitstempel mehr bekommt. Optimistische Synchronisationsmethoden lassen im Gegensatz dazu mögliche Verletzungen der Kausalität zunächst zu und beheben diese gegebenenfalls später durch einen Zeitsprung (Timewarp oder Rollback). Bei hybriden Verfahren handelt es sich um Mischformen.
System		Eine Gesamtheit von Objekten mit einer wohldefinierten Menge von Interaktionen untereinander. Die Systemumgebung wird definiert durch alle externen Faktoren, die eine Änderung im System verursachen können. Der Zustand eines Systems kann als minimale Informationsmenge, mit der das zukünftige Verhalten des Systems bei Abwesenheit von Zufallsereignissen eindeutig vorhergesagt werden kann, betrachtet werden. Aktivitäten außerhalb des Systems werden exogen, innerhalb endogen genannt. Denkbare Klassifizierungen eines Systems sind offen vs. geschlossen oder statisch vs. dynamisch
Takt		Zeitintervall, nach dem planmäßig der nächste Zug einer Linie erscheint.
Taktfahrplan		Fahrplan mit konstanten Zugfolgezeiten zwischen den Zügen einer Linie.
Timeline		Alle Ankunfts- und Abfahrts-Ereignisse eines Bahnhofs an einem Zeitstrahl abgetragen bilden dessen Timeline.
Time-Space-Netzwerk		Alle Knoten eines (Verkehrs-) Netzwerks werden durch ihre Timelines repräsentiert, auf denen die Ereignisse des Bahnhofs abgetragen werden. Existiert dem Fahrplan nach eine Verbindung zwischen zwei Ereignissen, wird eine Kante zwischen ihnen eingefügt. Auf diese Weise entsteht ein Ort-Zeit-Netzwerk.
Timewarp		Zeitlicher Rücksprung nach einer Kausalitätsverletzung während der Ausführung einer parallelen Simulation. Anwendung bei optimistischen Synchronisationsverfahren.

Begriff	Abk.	Erläuterung
Topologie		Lehre von der Lage u. Anordnung geometrischer Gebilde im Raum. In der Terminologie der Arbeit meist die Anordnung der Netzknoten und -kanten des Bahnnetzes.
Topologische Sortierung		Reihenfolge in einer halbgeordneten Menge von Dingen. Beispiel: Anstehende Tätigkeiten einer Person unterliegen einer Halbordnung, wenn Reihenfolgebedingungen existieren wie $A$ muss vor $B$ erledigt werden (Keller ausheben vor Dach decken). Eine Reihenfolge, welche alle Bedingungen erfüllt, nennt man topologische Sortierung der Menge. Es kann mehrere gültige Reihenfolgen geben.
TrainSim		Simulationskomponente für Bahnnetzwerke, mit der die kundenorientierte Simulation getestet wurde. Anwendung diskreter, ereignisorientierter Simulation
Trasse, Fahrplantrasse		Im Fahrplan vorgesehene Inanspruchnahme der Infrastruktur durch einen Zuglauf. Die Sperrzeitentreppe inkl. erforderlicher Pufferzeiten ist zu reservieren.
Trassenkilometer		Zurückgelegte Strecke der Züge.
Trassenmanagement		Nach Trennung von Netz und Transport durch die Bahreform Synonym für Fahrplankonstruktion.
Übergangszeiten, persönliche	PÜZ	Individueller Zeitbedarf eines Reisenden beim Umstieg von einem Zubringer in einen Abbringer.
Universal Mobile Telecommunications Systems	UMTS	Oft als Synonym für Mobilfunksysteme der dritten Generation verwendet, soll mittelfristig GSM ersetzen. Endgeräte mit Farbdisplays, WAP- und Internetbrowsern sollen neuartige mobile Anwendungen – bspw. Videotelephonie – ermöglichen.
Urverspätung		Exogen induzierte Verspätung im Bahnnetz, bspw. durch höhere Gewalt oder technische Fehler.
Validierung		Klärt die Frage nach der Gültigkeit eines Modells bzw., dass dieses die Realität korrekt abbildet.
Verifikation		Stellt sicher, dass ein Modell seinen Anforderungen entsprechend arbeitet. Dieses Modell muss allerdings trotzdem nicht valide sein.
Verspätung		Zeitliche Differenz $s$ zwischen geplantem Ereignisseintritt $t$ und tatsächlichem $t'$ : $s = t' - t$ . In der Praxis nur bei positiven Werten $s$ interessant.
Verspätung, primäre		S. Urverspätung.
Verspätung, sekundäre oder induzierte		Auch Folgeverspätung. Sekundäre oder induzierte Verspätungen werden durch primäre Verspätungen von Zügen verursacht und entstehen durch die verschiedenen technischen und organisatorischen Abhängigkeiten der Züge untereinander
Warteschlangen		Kommen mehr Anfragen pro Zeiteinheit an einer Bedienstelle an, als diese in derselben Zeiteinheit verarbeiten kann (Ankunftsrate temporär größer als Bedienrate) bilden sich Warteschlangen.
Wartezeitregel		Eine von drei einfachen Regeln, welche die Regelwartezeiten als spezielle Dispositionsstrategie determinieren.
Wartungsrouting		Routing von Zügen in einer Art, dass sie ihren den vorgeschriebenen Intervallen gewartet werden können, sie sich also zur richtigen Zeit an einem Bahnhof mit Wartungsmöglichkeit befinden.
Weiche		Element des Bahnnetzes, an dem sich Gleise verzweigen.

Begriff	Abk.	Erläuterung
Wireless (Personal) Local Area Network	WLAN bzw. WPAN	WLAN: Drahtloses Funknetzwerk mit Übertragungsraten von bis zu 54 Mbit/s, wobei meistens ein Standard der IEEE 802.11-Familie gemeint ist. WPAN: WPAN ist Sonderfall des Personal Area Networks. Es bezeichnet Kurzstrecken-Funktechnik (Bluetooth oder IrDA), die zum Ziel hat, kurze, typisch fliegend verlegte Kabelverbindungen zu vermeiden.
Wireless Application Protocol	WAP	Sammlung von Technologien und Protokollen, deren Zielsetzung es ist, Internet-Inhalte für die langsamere Übertragungsrate und die längeren Antwortzeiten im Mobilfunk sowie für die kleinen Displays der Mobiltelefone verfügbar zu machen.
Wireless Markup Language	WML	XML-basierte Seitenbeschreibungssprache, die eine stark reduzierte Fassung von HTML darstellt. Sie ist Teil des Wireless Application Protokoll (WAP) und zur Darstellung veränderlicher Inhalte auf Mobiltelefonen entwickelt worden.
Wissensbasis		Expertenwissen, welches meist in Fakten und Regeln hinterlegt ist. Fakten sind entweder fallspezifisch oder generell gültig. Lernfähige Expertensysteme können Fakten aus spezifischen Fällen dauerhaft in die Wissensbasis integrieren.
Wissenserwerbskomponente		Mit Hilfe der Wissenserwerbskomponente geben Experten Wissen in ein Expertensystem ein. Die bevorzugte Art der Wissensrepräsentation in Expertensystemen sind Regelwerke, da sie das Einpflegen neuen Wissens erleichtern.
Yield-Management		S. Revenue-Management.
Zeitstempel-Modell		Modell der Online-Optimierung: Jede Anfrage an einen Online-Algorithmus wird mit einem Zeitstempel versehen. Der Algorithmus muss die Anfragen nicht sofort abarbeiten, sondern kann die sich ergebenden Anfragen sammeln und Entscheidungen verzögern. Diese Verzögerung ermöglicht es, die bisher getroffenen Entscheidungen zu revidieren, sofern diese noch nicht ausgeführt wurden.
Zeitsteuerung		Auch Zeitmanagement genannt. In Simulationsläufen eingesetzte Art der Fortschaltung der Simulationszeit. Zu unterscheiden sind die Steuerung mit konstanten Zeitschritten und diejenige mittels variabler Zeitschritte.
Zielfunktion		Bewertungsfunktion für Lösungen eines Optimierungsproblems. Existiert kein besserer Zielfunktionswert, ist eine optimale Lösung gefunden.
Zubringer		Anschlussvermittelnder Zug: Jeder Zug, dessen Passagiere an einer Station andere Züge erreichen können, ist Zubringer dieser Züge; die anderen Züge heißen Abbringer.
Zubringer-Abbringer-Relation		Bijektive Beziehung zwischen zwei Zügen: Kann ein Passagier eines Zugs $i$ an einer Station einen Zug $j$ erreichen, heißt $i$ Zubringer von $j$ und $j$ Abbringer von $i$ .
Zug		Temporäre Entitäten des Bahnnetzes bestehend aus – vereinfacht gesagt – Triebfahrzeug(en) und diversen Wagen verschiedener Typen. Beim ICE existieren bspw. physikalisch zwei Triebköpfe, mehrere Reisezugwagen und ein Bordrestaurant-Wagen. Logisch betrachtet ist der Zug eine durch den Fahrplan in Form eines Zuglaufs auf einer Route durch das Netz instanziierte Entität. In dieser Arbeit wird fast immer die letztere Bedeutung unterstellt. Synonym verwendet werden Zugfahrt und Zuglauf.
Zugbegleiter		Der frühere Schaffner, zuständig für Serviceaufgaben im Zug.

<b>Begriff</b>	<b>Abk.</b>	<b>Erläuterung</b>
Zugchef		Auch Zugführer – nicht Lokführer – genannt. Vorgesetzter des Zugbegleitpersonals im Fernverkehr, der normalerweise die Fahrkartenkontrolle übernimmt, Auskünfte gibt und Serviceprozesse leitet. Er überwacht auch Ein- und Ausstieg und gibt dem Triebfahrzeugführer das Abfahrtsignal.
Zugfahrt		S. Zug
Zugfolgezeit		An einem dedizierten Ort gemessene Zeit zwischen zwei unmittelbar aufeinander folgenden Zügen.
Zugfunk		System für die Kommunikation mit fahrenden Zügen; durch GSM-R wird der frühere analoge Z. ersetzt
Zuggattung		Durch eine Buchstabenkennung ausgedrückte Bezeichnung zur Unterscheidung der Züge nach ihren Funktionen oder Serviceklassen. Bei der Deutschen Bahn AG gebräuchliche Gattungsnamen sind Durchgangszug (D), RegionalBahn (RB), RegionalExpress (RE), InterCity/Eurocity (IC), InterRegio (IR), Metropolitan, Thalys, InterCity-Neigetechnik (ICN), InterCityExpress (ICE) etc.
Zugintegrität		Liegt vor, wenn alle Bestandteile des Zugs wie geplant vorhanden sind.
Zugkategorie		S. Zuggattung.
Zuglauf		S. Zug.
Zuglaufverfolgung		Anlage zur Ortung und Identifizierung fahrender Züge im Netz, Voraussetzung für die genaue Kenntnis der Netzlage.
Zuglenkung, fahrplanbasierte		Zuglenkung, bei der an bestimmten Stellen im Netz die fahrplanmäßig vorgesehene Zugreihenfolge eingehalten wird.
Zugnummernmeldeanlage		Dient der Zuglaufverfolgung am Arbeitsplatz des Fahrdienstleiters. Die Zugnummernanzeige ist in der Regel in die Benutzungsoberfläche des Stellwerks integriert.
Zugrouter		Agent in TrainSim, der physikalische Routen für die vom Fahrplan vorgegebenen logischen Routen berechnet.
Zwischenankunftszeit		Zeit zwischen dem Eintreffen zweier Ereignisse, bspw. an einer Bedienstelle. Hier speziell die Zeit zwischen dem Eintreten zweier Störungen. Oft liegt eine Exponentialverteilung für die Zwischenankunftszeit vor.

## Anhang: Ergänzende theoretische Betrachtungen

### A.1 Berechnung der Reisedauer für verschiedene Verkehrsmittel

Zur Berechnung der Reisedauer verschiedener Verkehrsmittel stellt Siegmann folgende Formel für „Haus-Haus-Zeiten“ auf (vgl. [Siegmann 2001], S. 88ff.):

$$T = T_{\text{Zugang}} + T_{\text{Warte}} + T_{\text{Fahrt}} + T_{\text{Umstieg}} + T_{\text{Pause}} + T_{\text{Abgang}}$$

Alle Parameter außer  $T_{\text{Fahrt}}$  bezeichnen konstante, absolute Durchschnittswerte.  $T_{\text{Fahrt}}$  berechnet sich zu  $\frac{L}{V}$ , wobei  $L$  die Entfernung (tatsächlich gefahrene Kilometer, d. h. Umwegfaktor  $\cdot$  Luftlinie), zwischen Start- und Zielort und  $V$  die angenommene Durchschnittsgeschwindigkeit des jeweiligen Transportmittels bezeichne. Die dabei unterstellten Parameter dieser Funktion sind in Tabelle 35 angegeben.

Somit ergeben sich für das jeweilige Verkehrsmittel die folgenden Funktionen:

$$\text{PKW: } T = \frac{\text{Luftlinie} \cdot 1,1}{90} + \frac{\text{Luftlinie} \cdot 1,1}{300} \cdot 0,5$$

$$\text{Fernbus: } T = 1,2 + \frac{\text{Luftlinie} \cdot 1,1}{70}$$

$$\text{Bahn IC: } T = 1,2 + \frac{L}{100} + 0,2$$

$$\text{Bahn ICE: } T = 1,2 + \frac{L}{130} + 0,2$$

$$\text{Flugzeug: } T = 3,0 + \frac{L}{600}$$

Gemessen an der Reisedauer ergibt sich unter den getroffenen Voraussetzungen, dass der PKW bei Entfernungen bis zu 150 km, das Flugzeug ab 600 km und dazwischen die Bahn das jeweils günstigste Transportmittel ist.

Tabelle 35: Parameter zur Berechnung der Reisedauer (nach: [Siegmann 2001], S. 90)

	PKW	Fernbus	Bahn IC / ICE	Flugzeug
Zugangszeit $T_{\text{Zugang}}$	0	0,5	0,5 / 0,5	1
Wartezeit $T_{\text{Warte}}$	0	0,2	0,2 / 0,2	1
Fahrgeschwindigkeit $V$	90	70	100 / 130	600
Umsteigezeit $T_{\text{Umstieg}}$	0	0	0,2 / 0,2	0
Pause $T_{\text{Pause}}$	0,5	0	0	0
Abgang $T_{\text{Abgang}}$	0	0,5	0,5	1
Umwegfaktor $L/\text{Luftlinie}$	1,1	1,1	1,3	1,05

## A.2 Vorgehensweise bei der „Verkehrsprognose 2015“

Einen Überblick über die Prognose der gesamten Verkehrsnachfrage gibt Tabelle 36. Die Verkehrsnachfrage wird dort mit zwei verschiedenen Kennzahlen gemessen:

Tabelle 36: Prognose der Verkehrsnachfrage im Jahre 2015 (s. [BMVBW 2001], S. 120)

	Absolute Werte			Modal-Split (%)			Veränderung 2015/1997 (%)	
	1997	2015 Trend	2015 Integr.	1997	2015 Trend	2015 Integr.	Trend	Integr.
<b>Verkehrsaufkommen (Mio. Personen)</b>								
				des motorisierten Verkehrs				
Motor. Individualv.	49690	58700	55261	83,4	86,2	84,0	18,1	11,2
Eisenbahnverkehr	1743	1747	1940	2,9	2,6	2,9	0,2	11,3
ÖSPV	8000	7414	8368	13,4	10,9	12,7	-7,3	4,6
Luftverkehr	121	251	240	0,2	0,4	0,4	107,4	98,3
Summe Motoris. V.	59554	68112	65809	100,0	100,0	100,0	14,4	10,5
				des gesamten Verkehrs				
Summe Motoris. V.	59554	68112	65809	63,2	67,4	65,5	14,4	10,5
Fahrradverkehr	8998	8619	9369	9,6	8,5	9,3	-4,2	4,1
Fußwegverkehr	25646	24350	25240	27,2	24,1	25,1	-5,1	-1,6
Insgesamt	94198	101081	100418	100,0	100,0	100,0	7,3	6,6
<b>Verkehrsleistung (Mrd. Pkm)</b>								
				des motorisierten Verkehrs				
Motor. Individualv.	749,7	915,2	872,7	79,6	79,1	77,3	22,1	16,4
Eisenbahnverkehr	73,9	86,8	98,1	7,8	7,5	8,7	17,5	32,7
ÖSPV	82,6	78,2	85,6	8,8	6,8	7,6	-5,3	3,6
Luftverkehr	35,9	76,4	72,5	3,8	6,6	6,4	112,8	101,9
Summe Motoris. V.	942,1	1156,6	1128,9	100,0	100,0	100,0	22,8	19,8
				des gesamten Verkehrs				
Summe Motoris. V.	942,1	1156,6	1128,9	94,7	95,8	95,4	22,8	19,8
Fahrradverkehr	23,4	22,8	24,8	2,4	1,9	2,1	-2,6	6,0
Fußwegverkehr	29,6	28,5	29,5	3,0	2,4	2,5	-3,7	-0,3
Insgesamt	995,1	1207,9	1183,2	100,0	100,0	100,0	21,4	18,9

- Das *Verkehrsaufkommen* wird als die „Zahl der zurückgelegten Personenfahrten bzw. Wege“ ([BMVBW 2001], S. 92) definiert.
- Die *Verkehrsleistung* entspricht den zurückgelegten Personenkilometern.

Die Prognose entwickelt vier verschiedene Szenarien, die sich lediglich in den von der Verkehrspolitik beeinflussbaren Parametern wie Fahrweginvestitionen und Preisgestaltung der Verkehrsträger unterscheiden. Von diesen orientiert sich das „Integrationszenario“ an der Verkehrspolitik der derzeitigen Regierung.

Die wesentlichen Einflussfaktoren, die in die Schätzung des Verkehrsaufkommens einfließen, sind:

- sozio-ökonomische Strukturdaten (demographische Entwicklung etc.)
- Entwicklung des Verkehrsangebots
- Entwicklung der Verkehrsmittelnutzerkosten

- Entwicklung des PKW-Bestandes

In der Verkehrsprognose wird nicht nur das Gesamtverkehrsaufkommen dargestellt, sondern auch die Verteilung des Verkehrs auf die einzelnen Verkehrsträger, der sog. Modalsplit.

Neben der Prognose des Gesamtverkehrsaufkommens, die angibt, wie viele Kunden von A nach B fahren, müssen auch die Reisezwecke der Kunden analysiert werden, um das Angebot besser auf die Kunden abstimmen zu können. In der „Verkehrsprognose 2015“ findet sich ebenfalls eine Differenzierung des Verkehrsaufkommens nach Reisezwecken. Nach [BMVBW 2001] (S. 98ff.), werden die Verkehrsarten *Berufsverkehr*, *Ausbildungsverkehr*, *Einkaufsverkehr*, *Geschäftsverkehr*, *Urlaubsverkehr* und *Privatverkehr* unterschieden. Tabelle 37 zeigt die Ergebnisse der Verkehrsprognose nach Reisezwecken.

Die Unterscheidung nach Reisezwecken ist insofern wichtig, als dass das Angebot gezielt die einzelnen Kundengruppen ansprechen sollte. So ist häufig bei Privatreisen der Preis das wichtigste Kriterium, wobei längere Reisedauern in Kauf genommen werden. Bei Geschäftsreisen ist es tendenziell umgekehrt: Der Kunde ist bereit, für eine kurze Reisedauer und für eine hohe Zuverlässigkeit einen höheren Preis zu zahlen. Eine an den Bedürfnissen des Kunden orientierte Disposition wird dies ebenfalls berücksichtigen müssen.

Tabelle 37: Verkehrsnachfrage nach Reisezwecken (s. [BMVBW 2001], S. 169)

	Absolute Werte			Modal-Split (%)			Veränderung 2015/1997 (%)	
	1997	2015 Trend	2015 Integr.	1997	2015 Trend	2015 Integr.	Trend	Integr.
<b>Verkehrsaufkommen (Mio. Personen)</b>								
Beruf	18225	18714	18662	19,3	18,5	18,6	2,7	2,4
Ausbildung	7012	7060	7053	7,4	7,0	7,0	0,7	0,6
Einkauf	24143	24368	24358	25,6	24,1	24,3	0,9	0,9
Geschäft	6814	7339	7265	7,2	7,3	7,2	7,7	6,6
Urlaub	297	450	440	0,3	0,4	0,4	51,5	48,1
Privat	37707	43150	42640	40,0	42,7	42,5	14,4	13,1
Insgesamt	94198	101081	100418	100,0	100,0	100,0	7,3	6,6
<b>Verkehrsleistung (Mrd. Pkm)</b>								
Beruf	182,9	193,7	191,8	18,4	16,0	16,2	5,9	4,9
Ausbildung	40,1	41,2	40,9	4,0	3,4	3,5	2,7	2,0
Einkauf	97,4	108,9	105,8	9,8	9,0	8,9	11,8	8,6
Geschäft	147,2	171,8	170,7	14,8	14,2	14,4	16,7	16,0
Urlaub	85,5	120,1	118,4	8,6	9,9	10,0	40,5	38,5
Privat	442,0	572,2	555,6	44,4	47,4	47,0	29,5	25,7
Insgesamt	995,1	1207,9	1183,2	100,0	100,0	100,0	21,4	18,9

### A.3 Nähere Erläuterungen zum ETCS

Im ETCS *Level 1* besteht noch ein ortsfestes Signalsystem mit landesspezifischer Signalisierung in Form einer punktförmigen Zugbeeinflussung. Sog. *Eurobalisen* – punktförmige Übertragungseinrichtungen – dienen hierbei zur Informationsübertragung zum Zug und zu dessen Ortung. Die Gleisbelegungs- und Zugintegritätserkennung erfolgt durch eine konventionelle Gleisfreimeldung. Eine Signalbeobachtung des Fahrzeugführers bleibt erforderlich.

ETCS Level 1 ist insbesondere für Bahnunternehmen interessant, die bereits über eine moderne punktförmige Zugbeeinflussung verfügen. Für diesen Fall ist der Level 1 eine kostengünstige Variante, da keine Modifizierung der Stellwerke erforderlich ist und kein GSM-R-Funknetz benötigt wird. Es ergeben sich aber zwei Nachteile bei der Nutzung: Erstens ist keine kontinuierliche Kommunikation möglich, wodurch nur ungenügende Fahrweginformationen vorhanden sind. Zweitens ist auch kein automatisches Schalten von Signalen möglich.

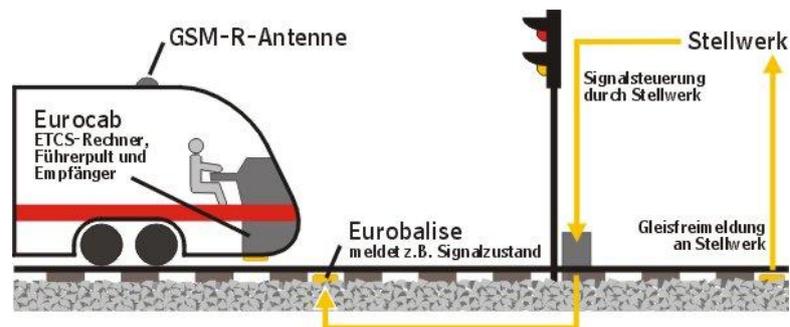


Abbildung 59: Darstellung des ETCS Level 1 (Quelle: [Wikipedia 2005d])

Im *Level 2* wird durch das ETCS die betriebliche Funktionalität einer kontinuierlichen Zugbeeinflussung realisiert. Die Fahrzeuge werden dabei über eine funkbasierte Zugbeeinflussung geführt. Die Züge orten sich selbst und melden ihren Standort in festgelegten Intervallen per GSM-R an eine Funkblockzentrale (Radio Block Center). Die Zugortung benutzt als Ortsmarken nichtschaltbare Eurobalisen, die in regelmäßigen Abständen im Fahrweg verlegt sind. Die Funkblockzentrale verwaltet alle Zugstandorte und erteilt den Zügen über Funk die Fahrerlaubnis. Die Gleisfreimeldung erfolgt im ETCS Level 2 weiterhin konventionell. Zudem wird der Fahrweg hinter einem Zug nicht kontinuierlich, sondern im Abstand ortsfester Blockabschnitte freigegeben. Ortsfeste Signale sind im ETCS Level 2 nicht mehr erforderlich; an deren Stelle werden lediglich Blockmarkierungen aufgestellt. Durch die Überwachung der Zuggeschwindigkeit und den möglichen automatischen Eingriff trägt das System zu einer deutlichen Erhöhung der Sicherheit bei, sodass höhere Zuggeschwindigkeiten und kürzere Zugfolgen möglich sind, die ihrerseits eine höhere Auslastung der Strecken mit sich bringen.

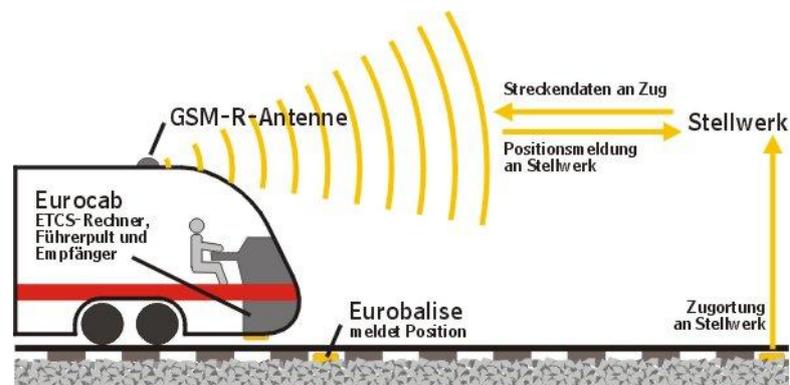


Abbildung 60: Darstellung des ETCS Level 2 (Quelle: [Wikipedia 2005d])

- Im *Level 3* geht das ETCS über die Funktionalität einer reinen Zugbeeinflussung hinaus, indem eine vollwertige funkbasierte Abstandshaltung der Züge realisiert wird. Ortsfeste Gleisfreimeldeinrichtungen sind nicht mehr erforderlich. Die Züge orten sich wie im ETCS Level 2 mittels Eurobalisen selbst und müssen darüber hinaus in der Lage sein, die Zugintegrität zu prüfen. Dadurch kann mit Abgabe der Ortungsmeldung an die Funkblockzentrale auch immer festgestellt werden, welchen Punkt seines Fahrweges ein bestimmter Zug sicher geräumt hat. Bis dorthin kann dann einem folgenden Zug bereits wieder eine Fahrerlaubnis erteilt werden. Die Fahrwegfreigabe erfolgt somit nicht mehr im Abstand ortsfester Blockabschnitte, sondern im Takt der Ortungsmeldungen. Wenn bei hinreichend kurzen Ortungsintervallen eine kontinuierliche Fahrwegfreigabe erreicht wird, nähert sich die Abstandshaltung der Züge dem Prinzip des Fahrens im absoluten Bremswegabstand. Die eigenständige Positionsbestimmung und Vollständigkeitsprüfung ermöglicht es dabei, auf Streckeneinrichtungen wie Signale und Linienleiter zu verzichten.

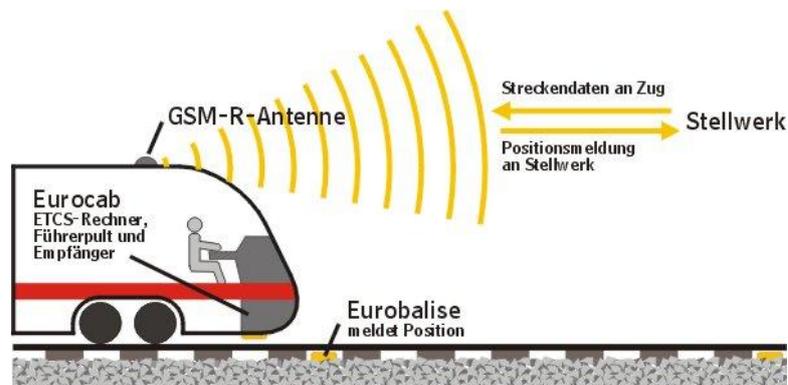


Abbildung 61: Darstellung des ETCS Level 3 (Quelle: [Wikipedia 2005d])

Die Einführung des ETCS-Systems wird insgesamt durch die Abwärtskompatibilität der einzelnen Anwendungsstufen erleichtert. Dadurch wird ermöglicht, dass Züge, die bereits auf ETCS Level 3 umgerüstet sind, auch Strecken befahren können, die mit ETCS Level 1 ausgerüstet sind. Umgekehrt ist dies aber nicht möglich.