# Simulation der Fahrplanerstellung auf der Basis eines hierarchischen Trassenmanagements und Nachweis der Stabilität der Betriebsabwicklung

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der
Naturwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von
Diplom-Informatiker Thomas Andreas Gröger
aus Lübbecke

Berichter:
Universitätsprofessor Dr.-Ing. Wulf Schwanhäußer
Universitätsprofessor Dr. rer. nat. Walter Oberschelp

Tag der mündlichen Prüfung: 03.07.2002

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Hochschulbibliothek online verfügbar.

# Inhaltsverzeichnis

**1 Einleitung ..... 13**

**2 Erstellung von Fahrplänen ..... 15**

**2.1 Aufgaben des Fahrplans ..... 15**

**2.2 Anforderungen an einen Fahrplan ..... 16**

**2.3 Fahrplanprocedere vor der Bahnreform ..... 19**

**2.4 Trassenmanagement seit der Bahnreform ..... 23**

**3 Verfahren zur Fahrplankonstruktion ..... 29**

**3.1 Manuelle Fahrplankonstruktion ..... 29**

**3.2 Rechnergestützte Fahrplankonstruktion ..... 32**

3.2.1 Technologen-Arbeitsplatz Fahrplanbearbeitung (TEFA) ..... 35

3.2.2 Interaktive Fahrplan-Bearbeitung (IFB) ..... 36

3.2.3 Fahrplankonstruktion und -untersuchung (FAKTUS) ..... 37

3.2.4 Datenverarbeitung im Trassenmanagement (DaViT) ..... 40

3.2.5 TrainPlan ..... 42

3.2.6 SIMUPLAN, Fahrplankonstruktion mit SIMU++ ..... 44

3.2.7 Weitere Verfahren ..... 46

**4 Automatische Fahrplanerstellung ..... 49**

**4.1 Komplexität der automatischen Fahrplanerstellung ..... 49**

4.1.1 Grundbegriffe der Komplexitätstheorie ..... 49

4.1.2 Periodic Event Scheduling Problem (PESP) ..... 51

4.1.3 Optimierungsprobleme ..... 53

4.1.4 Exakte, heuristische und Approximations-Verfahren ..... 54

**4.2 Konzepte zur automatischen Fahrplanerstellung ..... 55**
4.2.1 Berechnung von Taktfahrplänen für den Personenverkehr ..... 56
4.2.2 Fahrplanoptimierung basierend auf der Linienplanung ..... 57
4.2.3 Ermittlung konfliktfreier Bahnhofsfahrordnungen ..... 59
4.2.4 Automatische Fahrplanerstellung für Güterverkehrsnetze ..... 60
4.2.5 Fahrplanberechnung mit Berücksichtigung der Fahrwegwahl ..... 62
4.2.6 Sperrzeitenbasierter Ansätze ..... 64

**4.3 Verfahren zur automatischen Fahrplanerstellung ..... 65**
4.3.1 Designer of Network Schedules (DONS) ..... 66
4.3.2 Simulation der Fahrplanerstellung in STRESI und NSIM ..... 68

**5 Eisenbahnbetriebswissenschaftliche Verfahren ..... 70**

**5.1 Grundbegriffe der Modellierung und der Simulation ..... 71**
5.1.1 Gegenständliche Modellierung ..... 71
5.1.2 Analytische Verfahren ..... 72
5.1.3 Rechnergestützte Simulation ..... 74

**5.2 Simulation der Betriebsabwicklung ..... 76**
5.2.1 Modellierung der Infrastruktur ..... 76
5.2.2 Modellierung der Betriebsdisposition ..... 76
5.2.3 Verfahren zur Betriebssimulation ..... 79

**6 Konzeption eines neuen Simulationsverfahrens ..... 83**

**6.1 Grundsatzentscheidungen zur Modellierung ..... 83**
6.1.1 Verwendung des sperrzeitenbasierten Ansatzes ..... 83
6.1.2 Spurplan-Graph und FAKTUS als Basis ..... 84

**6.2 Simulationsparameter ..... 85**
6.2.1 Prioritäten der Zugfahrten ..... 85
6.2.2 Pufferzeiten ..... 86

**6.3 Simulationsstrategie und Konfliktlösung ..... 89**
6.3.1 Vorgehen in bestehenden asynchronen Verfahren ..... 89
6.3.2 Konflikterkennung und Konfliktlösung bei FAKTUS ..... 91
6.3.3 Globale Simulationsstrategie des neuen Verfahrens ..... 94
6.3.4 Lösung eines einzelnen Konfliktes ..... 98
6.3.5 Bewertung der ermittelten Konfliktlösungen ..... 100

**6.4 DV-Systeme auf der Basis des neuen Konzeptes ..... 102**
6.4.1 Simulation der Fahrplanerstellung ..... 102
6.4.2 Simulation der Betriebsabwicklung ..... 103
6.4.3 Trassenmanagement ..... 104

**7 Entwicklung der erforderlichen Algorithmen ..... 108**

**7.1 Ermittlung alternativer Laufwege ..... 108**
7.1.1 Modellierung eines Fahrnetzes für die Suche ..... 109
7.1.2 Bestimmung alternativer Laufwege im Fahrnetz ..... 113
7.1.3 Wegesuche ausgehend von der Konflikt-Betriebsstelle ..... 117
7.1.4 Auffinden von Umleitungen ..... 118

**7.2 Konfliktlösung durch Haltzeitverlängerung ..... 120**
7.2.1 Belegungen alternativer Laufwege ..... 120
7.2.2 Bestimmung der erforderlichen Haltzeitverlängerung ..... 121
7.2.3 Konzeption der dualen Belegungsmatrix ..... 124
7.2.4 Elemente der dualen Belegungsmatrix ..... 128
7.2.5 Bestimmung des relevanten Überholungsabschnitts ..... 131
7.2.6 Realisierung der dualen Belegungsmatrix ..... 132
7.2.7 Konfliktlösung in der dualen Belegungsmatrix ..... 133

**7.3 Konfliktlösung durch Betriebshalte ..... 134**
7.3.1 Verwendung von Betriebshalten ..... 134
7.3.2 Ermittlung möglicher Betriebshalte ..... 136
7.3.3 Anpassung vorhandener Konzepte ..... 137

**7.4 Konfliktlösung durch Verlängerung der Fahrzeiten ..... 138**

**8 Simulationsverfahren BABSI ..... 142**

**8.1 Systemarchitektur ..... 142**

**8.2 Realisierung der automatischen Konfliktlösung ..... 143**

8.2.1 Ermittle Konfliktlösungen ..... 145

8.2.2 Wähle beste Konfliktlösung aus ..... 148

8.2.3 Realisiere Konfliktlösung ..... 149

8.2.4 Speichere Konfliktlösung ab ..... 149

**8.3 Simulationsmodi ..... 150**

8.3.1 Lösungsvorschläge für einen Konflikt ..... 150

8.3.2 Trassensuche für einen Zug ..... 150

8.3.3 Simulation der Fahrplanerstellung ..... 151

8.3.4 Simulation der Betriebsabwicklung ..... 152

**8.4 Benutzeroberfläche ..... 153**

**8.5 Validierung und Pilotanwendung ..... 157**

**8.6 Einsatzgebiete ..... 159**

**9 Zusammenfassung und Ausblick ..... 161**

**10 Abbildungsverzeichnis ..... 164**

**11 Abkürzungsverzeichnis ..... 166**

**12 Literaturverzeichnis ..... 168**

**Simulation der Fahrplanerstellung auf der Basis eines hierarchischen Trassenmanagements und Nachweis der Stabilität der Betriebsabwicklung**

– Zusammenfassung –

Der Schwerpunkt dieser Arbeit besteht in der Weiterentwicklung der asynchronen Verfahren zur Simulation der Fahrplanerstellung und der Betriebsabwicklung von Schienenbahnen. Die neu entwickelte Simulationsstrategie und die Verwendung geeigneter Basiskomponenten aus dem Bereich des rechnergestützten Trassenmanagements führen zu einem Simulationsverfahren, das in verschiedenen Planungsphasen unter Berücksichtigung der Zugprioritäten eingesetzt werden kann und dem direkt flächendeckende Infrastruktur- und Fahrplandaten zur Verfügung stehen.

In den klassischen Fragestellungen der Eisenbahnbetriebswissenschaft – Bemessung von Eisenbahninfrastruktur und Validierung neuer Fahrplan- und Betriebskonzepte – erzielt das neue asynchrone Simulationsverfahren aufgrund der verfeinerten Konfliktlösung insbesondere in eingleisigen Abschnitten und in komplexen Netzstrukturen bessere Ergebnisse. Hierzu tragen vor allem die selbst bestimmten Laufwegalternativen, die abschnittsweise Konfliktlösung auf der Basis von Überholungsabschnitten und die adaptive Berechnung unterschiedlicher Konfliktlösungsalternativen mit Auswahl anhand einer Zielfunktion bei.

Im Rahmen der Konzeption dieser neuen Simulationsstrategie werden neben den Modellen der Eisenbahnbetriebswissenschaft die Verfahren zur Erstellung von Fahrplänen betrachtet, die algorithmische Komplexität einer automatischen Fahrplanerstellung diskutiert und entsprechende mathematische Ansätze analysiert. Dabei zeigt sich insbesondere, dass die mathematische Modellierung aufgrund der kombinatorischen Vielfalt der möglichen Reihenfolgen der Züge und der jedem Zug zur Verfügung stehenden Fahrwege eine Betrachtung vereinfachter Modellstrukturen erfordert, die von den Fragestellungen des Trassenmanagements zum Teil weit entfernt sind.

Dagegen ergibt sich durch die Verwendung des sperrzeitenbasierten Ansatzes und die explizite Betrachtung der Konflikte eine konzeptionelle Nähe zum rechnergestützten Trassenmanagement, die aufgrund der verbesserten Konfliktlösungsstrategie neue Anwendungen in diesem Bereich erlaubt. So kann durch die Erzeugung von Konfliktlösungsvorschlägen, die Suche nach freien Einzeltrassen in bestehenden Fahrplänen und das kapazitätsschonende Einlegen mehrerer Zugtrassen eine direkte Effizienzsteigerung im rechnergestützten Trassenmanagement erreicht werden. Mit Hilfe der Simulation der Betriebsabwicklung kann schließlich die im Betriebsablauf zu erwartende Stabilität beliebiger Fahrpläne überprüft und so eine frühzeitige Qualitätssicherung der zugehörigen Planungen realisiert werden.

**Simulation of Timetable Compilation Based on Hierarchical Train Path Management and Demonstration of Operation Stability**

– Summary –

This paper focuses on the further development of the asynchronous method to simulate timetable compilation and railway operation. The newly developed simulation strategy and the use of appropriate basic components introduced in the field of timetable compilation lead to a train priorities respecting simulation procedure that can be used for various stages of the railway planning process. The use of existing basic components enables the procedure to employ infrastructure and timetable data from all over the German network already available.

The new asynchronous simulation procedure provides improved solutions for classic questions of railway operation science, such as the calculation of infrastructure capacity or the validation of new timetables and operational concepts. It delivers better results because conflicts between train movements are resolved in a more sophisticated way, particularly on single track lines and in complex networks. This is achieved through automatic choice of alternative train-paths, section-wise resolution of conflicts, and the adaptive calculation of different conflict resolution alternatives where the choice is made with the help of target functions.

The paper contains an overview on existing railway operation science models and on timetable compilation methods. The algorithmic complexity of automatic timetable compilation is discussed and corresponding mathematical approaches are analysed. It is demonstrated that, due to the combinatorial variety of possible train sequences and train-path alternatives, mathematical approaches require simplified mathematical modelling structures. However, these simplified modelling structures do not contribute to solve the everyday problems of timetable compilation.

Whereas the new procedure is based on concepts similar to the basic ideas of the existing support tool for timetable compilation – namely the idea of occupation times for block sections and the specific consideration of conflicts between train movements – and enables new applications in this area by introducing improved strategies of conflict resolution. As a result, the efficiency of IT supported timetable compilation can be improved as the new method creates various conflict resolution alternatives, searches the existing timetable for free train-paths and inserts additional train paths by using remaining infrastructure capacity in an economical manner. The operation simulation procedure embodied in the new technique makes it possible to check the stability of any timetable and thus to provide early quality assurance of timetable planning processes.

**Simulation du processus de la planification des horaires en tenant compte despriorités des trains et démonstration de la stabilité de l'exploitation**

– Résumé –

Cette étude ce focalise sur les possibilités d'application de la méthode asynchrone à la simulation de la planification des horaires et la simulation de l'exploitation des chemins de fer. La méthode de simulation utilise une nouvelle stratégie de simulation et des éléments informatiques déjà établi dans les outils d'aide à la planification des horaires de sorte qu'elle peut soutenier plusieurs phases de planification des chemins de fer en tenant compte des priorités des trains. L'utilisation des éléments informatiques déjà établi elle peut faire appel directement aux données déjà disponibles du réseau ferré, aussi bien sur l'infrastructure que sur les horaires.

La nouvelle méthode asynchrone de simulation répond plus précisément aux questions qui se posent classiquement à l'exploitant ferroviaire, soit le calcul de la capacité d'infrastructures ferroviaires soit l'analyse des horaires et des concepts d'exploitation. Les conflits qui apparaissent pendant le processus de l'allocation des sillons sont résolus de manière plus performante, particulièrement dans les sections à voie unique et dans les réseaux ferrés complexes, grâce à plusieurs méthodes: le choix d'un itinéraire parmi plusieurs alternatives générées automatiquement, la résolution des conflits section par section et, enfin, le calcul adaptif de plusieurs possibilités de résolutions de conflits, le choix s'effectuant à l'aide d'une fonction d'optimisation.

A part les modèles operationelles ferroviaires, cette étude analyse aussi les méthodes de la planification des horaires, évalue la complexité des algorithmes permettant la construction automatisée d'horaires et l'approche mathématique correspondante. Il apparaît que la modélisation mathématique exige des structures simplifiées à cause des multiples variantes combinatoires de séquences des trains et d'itinéraires alternatifs pour chaque train. Enfin, ces modèles mathématiques simplifiés ne sont pas applicables pour résoudre les problèmes de la planification des horaires.

En revanche, une approche basée sur les temps d'occupation des portions de l'infrastructure et tenant compte explicitement des conflits rapproche considérablement la nouvelle méthode aux applications informatiques traditionnelles de planification des horaires en ouvrant également de nouvelles perspectives dans ce domaine à cause de la résolution perfectionné des conflits. L'efficacité de la planification des horaires peut donc être améliorée, grâce à la nouvelle méthode de simulation qui peut générer plusieurs alternatives de résolutions de conflits, rechercher les sillons

libres dans un horaire existant et introduire des sillons en ménageant la capacité. Finalement, par la simulation de l'exploitation, la nouvelle méthode peut analyser la stabilité de n'importe quel horaire et ainsi assurer la qualité dès les premières étapes de la planification.

**Моделирование планирования железнодорожных перевозок на основе хиерархической обработки маршрутов поездов и доказательство стабильности выполнения перевозок.**

– краткое содержание –

В данной работе делается упор на модернизацию асинхронного принципа моделирования планирования железнодорожных перевозок и самих перевозок. Новая стратегия моделирования и целенаправленное применение базовых компонентов существующей компьютерной системы для построения планов движения составляют основу подхода, который находит применение на различных стадиях планирования, благодаря учёту иерархии трасс и прямому доступу к инфраструктурным и плановым банкам данных.

Асинхронный метод моделирования на основе усовершенствованного разрешения конфликтов, особенно в однопутных перегонах и в сложных сетевых структурах, достигает оптимальных результатов при решении классических проблем железнодорожной теории управления - расчета пропускной способности инфраструктуры и проверки новых программ расписания и выполнения перевозок. Этому способствуют, прежде всего, автоматическое определение альтернативных маршрутов движения, разрешение конфликтных ситуаций внутри перегонных участков и адаптивные расчет вариантов разрешения конфликтов с помощью целевой функции.

Наряду с методами железнодорожной теории управления, при разработке новой стратегии моделирования рассматриваются подходы к планированию железнодорожных перевозок, производится анализ алгоритмической сложности автоматического планирования железнодорожных перевозок и разрабатываются соответствующие математические решения. При этом в частности показывается, что чисто математические подходы в этой области практически неприменимы, т.к. неконтролируемое количество комбинаций возможных последовательностей поездов и имеющихся в распоряжении путей требует значительного упрощения структуры математических моделей, что ведёт к пренебрежению к элементарным требованиям к планированию перевозок.

При применений визуализируемых блокируемых элементов перегона и непосредственного анализа конфликтов, напротив, достигается концептуальная близость к компьютерному методу планирования железнодорожных перевозок, что открывает, благодаря улучшенной стратегии разрешения конфликтных

ситуаций, новые возможности в этой области. Посредством предложения вариантов разрешения конфликтов, поиска коридоров в существующих планах движения и задания новых трасс, учитывая пропускную способность участков сети, достигается непосредственное повышение эффективности компьютерного планирования железнодорожных перевозок. Моделирование выполнения самих перевозок позволяет проверять стабильность разработанных планов и таким образом своевременно делать выводы об их пригодности.

# 1 Einleitung

Schienenbahnen haben aufgrund der geringen Rollreibung zwischen Stahlrad und Stahlschiene und dem hieraus resultierenden niedrigen Energieverbrauch einen Systemvorteil gegenüber anderen Verkehrsträgern. Allerdings können auch nur relativ geringe Bremskräfte vom Fahrzeug auf den Fahrweg übertragen werden. Daher ist der Bremsweg bei den im Eisenbahnverkehr üblichen Geschwindigkeiten wesentlich größer als die Sichtweite der Triebfahrzeugführer und eine externe Abstandshaltung zwischen den Zügen erforderlich.

Aufgrund der Spurführung ist bei Schienenbahnen der zu verwendende Fahrweg ebenfalls extern vorgegeben. Die Verknüpfung der Strecken in Abzweigstellen und Bahnhöfen erfordert eine über die Abstandshaltung hinausgehende Sicherung der Zugfahrten gegen Flankenfahrten. Auf eingleisigen Abschnitten und Strecken müssen zudem Gegenfahrten verhindert werden.

Die resultierenden Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Zugfahrten machen für einen reibungslosen und wirtschaftlichen Bahnbetrieb eine detaillierte Produktionsplanung und Betriebssteuerung erforderlich. Eine zentrale Rolle kommt hierbei dem Fahrplan zu, der als veröffentlichtes Ergebnis der Produktionsplanung das Angebot an die Kunden darstellt und zugleich Grundlage für die Betriebsabwicklung ist. Da die Einhaltung des Fahrplans einen wesentlichen Qualitätsaspekt für die Kunden darstellt, muss dieser so konstruiert sein, dass er nicht selbst Auslöser von Abweichungen ist und zudem Reserven enthält, die die Auswirkungen möglicher externer Störungen weitgehend reduzieren. Zur Qualitätssicherung der Planungen ist daher der Nachweis der Stabilität des Fahrplans in der Betriebsabwicklung mit Hilfe entsprechender Verfahren erforderlich.

Im Rahmen der Produktionsplanung muss neben den gewünschten Verkehren auch die zugrunde liegende Infrastruktur betrachtet werden. Da der Neu- und Umbau von Eisenbahnstrecken und -knoten mit großem planerischen, zeitlichen und insbesondere finanziellen Aufwand verbunden ist, müssen vor einer Realisierung die verkehrlichen Wirkungen unter Berücksichtigung der politischen Rahmenbedingungen ermittelt werden. Aufgrund der Langlebigkeit der Infrastruktur sollte diese zudem für eine möglichst große Anzahl zukünftiger Betriebsprogramme nutzbar sein.

Die einzelnen Phasen der Produktionsplanung können entsprechend ihres zeitlichen Vorlaufes in strategische Netz- und Angebotsplanungen, operative Infrastruktur- und Fahrplanungen und taktische Planungen im Rahmen der Betriebsdisposition unterteilt werden. Fahrpläne im Sinne von geplanten Zugläufen auf einer zugrunde

liegenden Infrastruktur stehen in allen Phasen im Mittelpunkt des Interesses. Aufgrund des unterschiedlichen Planungsvorlaufes unterscheiden sich die Kenntnisse über die zu realisierenden Betriebsprogramme und die Gestalt der Infrastruktur stark voneinander. So ist die Infrastruktur bei der Netzplanung relativ variabel und anstatt konkreter Betriebsprogramme existieren nur Prognosen über zu bewältigende Verkehrsmengen, während bei der Betriebsdisposition die vorhandene Infrastruktur und der Sollfahrplan fest sind.

Anfang des Jahres 1994 wurde in Deutschland aufgrund des Eisenbahnneuordnungsgesetzes (ENeuOG) die erste Stufe der Bahnreform realisiert [BGBl93]. Seitdem sind Infrastrukturbetrieb und Erbringung von Eisenbahnverkehrsleistung getrennt, um externen Unternehmen den Zugang zur Eisenbahninfrastruktur zu erleichtern. Die Eisenbahnverkehrsunternehmen[1] müssen die für die Durchführung ihrer Zugfahrten notwendige Infrastrukturkapazität, die so genannten Zugtrassen, beim Infrastrukturbetreiber erwerben. Dieser stimmt im Rahmen des Trassenmanagements die von den einzelnen Eisenbahnverkehrsunternehmen aufgrund der Verkehrsnachfrage bestellten Trassen unter Berücksichtigung der vorhandenen Infrastrukturkapazität aufeinander ab. Die zuvor integrierte Betrachtung zukünftiger Betriebsprogramme und geplanter Infrastrukturtopologien im Rahmen der frühen, strategischen Planungsstufen wird durch diese Trennung allerdings erschwert.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein neues Verfahren zur Simulation der Fahrplanerstellung entwickelt, das auf der Basis von Trassen arbeitet. Aufgrund der zentralen Rolle der Fahrpläne in allen Planungsebenen kann dieses Verfahren sowohl für strategische als auch für operative und dispositive Aufgabenstellungen eingesetzt werden. Durch die automatische Erzeugung konfliktfreier Dispositionsfahrpläne kann zudem der zu erwartende Betriebsablauf realitätsnah nachgebildet und so die Stabilität von Fahrplänen nachgewiesen werden.

Zunächst werden Grundlagen zu Fahrplänen und unterschiedliche Methoden zur Erstellung von Fahrplänen erläutert. Danach werden eisenbahnbetriebswissenschaftliche Verfahren zur Bemessung der Eisenbahninfrastruktur vorgestellt und das neue Simulationsverfahren konzipiert. Abschließend werden die notwendigen Algorithmen zur Realisierung des Konzeptes entwickelt und das realisierte Simulationssystem mit seinen Einsatzgebieten erläutert.

---

[1] Neben diesem aus dem ENeuOG stammenden Begriff für Eisenbahnen, die Eisenbahnverkehrsleistungen erbringen, wird in der Fachliteratur auch „Eisenbahntransportunternehmen“ verwendet.

# 2 Erstellung von Fahrplänen

In diesem Kapitel werden zunächst die grundsätzlichen Aufgaben eines Fahrplans im Eisenbahnwesen und die an ihn gestellten Anforderungen erläutert. Danach werden die unterschiedlichen Vorgehensweisen zur Erstellung eines Fahrplans vor und nach der einschneidenden Bahnreform Anfang 1994 knapp erläutert.

## 2.1 Aufgaben des Fahrplans

Unter einem Fahrplan wird allgemein die vorausschauende Festlegung des Fahrtverlaufes der Züge verstanden [Pac00]. Dazu gehören für jeden Zug die folgenden wesentlichen Angaben:

- Zuggattung,
- Verkehrstage,
- Laufweg,
- Ankunfts-, Abfahr- und Durchfahrzeiten in allen Betriebsstellen und
- zulässige Geschwindigkeiten in den einzelnen Abschnitten des Laufwegs.

Die Aufstellung eines Fahrplans dient unterschiedlichen Zwecken. Erstens werden durch die Fahrplankonstruktion die Züge, die aufgrund vorgelagerter Planungen verkehren sollen, auf der zur Verfügung stehenden Infrastruktur koordiniert. Widersprechen sich die Wunschlagen der Züge, müssen diese Konflikte nach bestimmten Regeln gelöst werden. Mindestens ein beteiligter Zug wird dann aus seiner Wunschlage verdrängt werden müssen.

Zweitens dient der Fahrplan der Information der Kunden über die Verkehrszeiten der Züge. Da es sich bei schienengebundenen Verkehrsmitteln im Personenverkehr um Kollektivverkehrsmittel handelt, stellt der Fahrplan eine wesentliche Komponente des Angebots an den einzelnen Kunden dar, anhand dessen dieser über die Verwendung dieses Verkehrsmittels entscheidet.

Drittens liefert die Fahrplankonstruktion die notwendigen Informationen zur Beschreibung des gewünschten Betriebsablaufs. Daher existieren eine Reihe innerbetrieblicher Fahrplanunterlagen, die auf die Belange der einzelnen Beteiligten abgestimmt sind. So erhält ein Triebfahrzeugführer in tabellarischer Form die Fahrplandaten seines Zuges entlang des Laufwegs und zusätzlich für die Traktion notwendige Daten über Bremsvermögen und Last. Ein Fahrdienstleiter erhält

entsprechend Unterlagen, die alle Zugfahrten in dem von ihm überwachten Bereich der Infrastruktur enthalten. Der Fahrplan dient zudem als Grundlage für die weitere Betriebsplanung, bei der insbesondere die Umläufe der einzelnen Fahrzeuge und der Einsatz des Personals optimal gestaltet werden müssen.

Darüber hinaus kann schon der Prozess der Erstellung eines Fahrplans zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit der zugrunde liegenden Infrastruktur verwendet werden. Die bei der Lösung von Konflikten notwendigen Veränderungen an der Wunschlage der Züge ergeben so genannte planmäßige Wartezeiten (synonym: Wartezeit im Fahrplan). „Planmäßig“ deshalb, weil die Veränderung bereits im Fahrplan enthalten ist. „Wartezeit“, weil die Veränderung aufgrund von verlängerten Halte- oder Fahrzeiten zu einer Beförderungszeitverlängerung bezüglich der optimalen Wunschlage führt. Mit steigender Auslastung der Infrastruktur wachsen die planmäßigen Wartezeiten. Dieser Zusammenhang wird von Modellen zur Leistungsfähigkeitsuntersuchung von Bahnanlagen genutzt, um einen Zusammenhang zwischen Zugzahl (Auslastung) und einem Qualitätskriterium herzustellen [Wen99].

## 2.2 Anforderungen an einen Fahrplan

Die große Bedeutung des Fahrplans für die Betriebsführung und für die Öffentlichkeit verlangt, dass der Fahrplan wahr ist, d. h. er muss wie geplant durchgeführt werden können [GrKa66]. Ein Fahrplan wird im Folgenden als wahr bezeichnet, wenn

- die verwendeten Fahrzeiten korrekt sind und
- sich bei pünktlichem Betrieb keine Behinderungen zwischen den Zügen ergeben.

Das Fahrverhalten eines Zuges wird von der Linienführung und zulässigen Geschwindigkeiten im Zusammenspiel mit Zugkräften und Fahrwiderständen geprägt. Daher müssen diese Effekte bei der Ermittlung der Fahrzeiten berücksichtigt werden.

Da die Eisenbahn ein spurgeführtes System mit langen Bremswegen ist, existieren technische Sicherungssysteme, die die einzelnen Zugfahrten schützen. Hierzu wird die vorhandene Infrastruktur klassischerweise in Abschnitte eingeteilt, die nur exklusiv von einem Zug belegt werden können. Das Sicherungssystem gewährleistet mit Hilfe von Signalen und Überwachungseinrichtungen die Exklusivität. Zur grafischen Beschreibung der Belegungen eines Zuges wurde die in Abb. 1 dargestellte Sperrzeitentreppe eingeführt [Hap59]. Diese setzt sich aus Sperrzeitenkästchen zusammen, die jeweils die Belegung des Zuges in einem exklusiv nutzbaren Ab-

schnitt beschreiben. Wichtigste Eigenschaft der Sperrzeit ist, dass diese nicht nur die physikalische Belegung eines Belegungsabschnitts durch einen Zug, sondern zusätzlich Annäherungs- und Räumfahrzeiten sowie Sicht-, Fahrstraßenbilde- und -auflösezeiten enthält. Solange sich die Sperrzeitentreppen der Züge nicht überschneiden, ist jegliche Behinderung ausgeschlossen. Durch das Aneinanderschieben der Sperrzeitentreppe zweier Züge ergibt sich ihre so genannte Mindestzugfolgezeit. Hierunter wird der kleinste Zeitabstand verstanden, in dem sich zwei Züge bei planmäßigem Fahrtverlauf ohne gegenseitige Behinderung folgen können. Mit Hilfe der Verwendung von Sperrzeiten, die auf den berechneten Fahrzeiten beruhen, kann die zweite Bedingung für einen wahren Fahrplan sichergestellt werden.

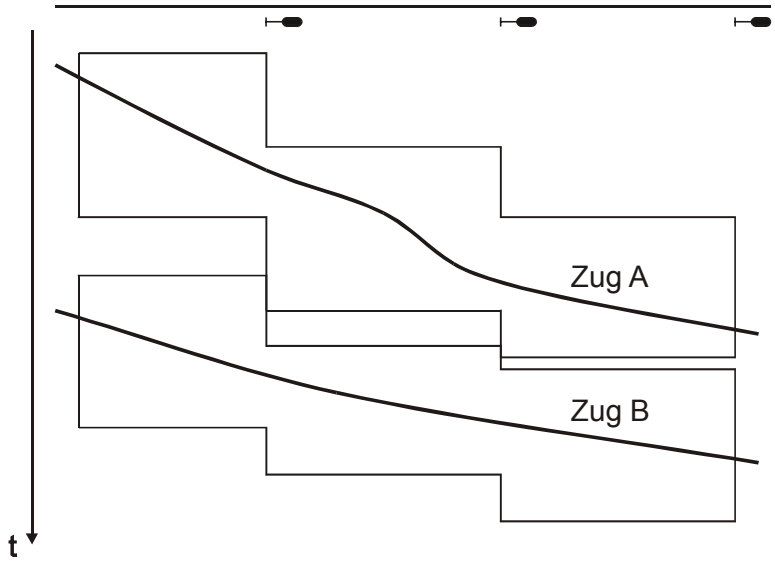


**Abb. 1: Sperrzeitentreppen zweier Züge**

Sollte die vorhandene Sicherungstechnik sehr modern sein und keine festen Belegungsabschnitte verwenden, kann von der Sperrzeitentreppe zu einem allgemeiner gefassten Sperrzeitenband übergegangen werden, das im Extremfall infinitesimal kleine Belegungselemente enthält. Der Nachweis der Behinderungsfreiheit der Zugfahrten ist hiermit weiterhin problemlos möglich [Wen95].

Die zentrale Bedeutung des wahren Fahrplans ergibt sich aus der tatsächlichen Realisierbarkeit der Planungen. Ein pünktlicher und reibungsloser Betriebsablauf ist bei der Eisenbahn so wesentlich, da aufgrund der Spurführung und der langen Bremswege kleinere Behinderungen schnell zu großen Fahrzeitverlängerungen führen. So kann aus einer Fahrstraßenüberschneidung von zehn Sekunden durch die Vorgänge Bremsen, Warten, alte Fahrstraße Auflösen, neue Fahrstraße Bilden und Beschleunigen leicht eine Verlängerung von mehreren Minuten werden. Aufgrund der

vorhandenen Sicherungstechnik kann eine Zugfahrt in diesem Fall weiterhin sicher, allerdings nicht mehr pünktlich durchgeführt werden.

Pünktlichkeit ist ein wesentlicher Aspekt der Qualität einer Transportdienstleistung. Damit diese den externen Kunden zugesichert werden kann, muss sie zunächst durch ein internes Qualitätsmanagement erzeugt werden [HeLu97]. Im Sinne des Qualitätsmanagements handelt es sich bei dem Fahrplan um eine Spezifikation, die möglichst exakt umgesetzt werden muss, da die Nichteinhaltung in aller Regel Geld kostet [Her94]. Zur Erreichung einer hohen Qualität ist ein wahrer Fahrplan erforderlich, da nur dieser auf dem Fahrplan selbst beruhende Verspätungen ausschließen kann. Durch die Berücksichtigung möglicher Behinderungen zwischen den Zügen schon im Planungsprozess kann ein wahrer Fahrplan bei Versagen der Sicherungstechnik sogar als Rückfallebene fungieren. Beispiele aus der Vergangenheit zeigen, dass einige Unfälle möglicherweise nicht passiert wären, wenn der Fahrplan konfliktfrei konstruiert worden wäre [Brü00].

Die Forderung nach einem wahren Fahrplan ist unabhängig von der Belastung einer Strecke, da die Infrastruktur auf Nebenstrecken stark rationalisiert wurde und gerade hier Konflikte im Fahrplan einen reibungslosen und pünktlichen Betriebsablauf aufgrund fehlender Überholungs- und Kreuzungsmöglichkeiten gefährden.

Neben der Forderung nach einem wahren Fahrplan gibt es natürlich noch weitere Anforderungen, die von allgemeinerer Natur sind, dafür aber zu einem Zielkonflikt führen. So sollte ein Fahrplan möglichst viele Züge in ihren Wunschtrassen und geringe planmäßige Wartezeiten enthalten. Da andererseits die vorhandene Infrastruktur möglichst gut ausgelastet werden soll, damit sich die getätigten Investitionen in die Infrastruktur schnell amortisieren, sollten gleichzeitig maximal viele Züge verkehren. Da mit wachsender Auslastung allerdings die planmäßigen Wartezeiten steigen, entsteht hier ein Zielkonflikt. Dieser verstärkt sich noch durch die Forderung nach einem stabilen Fahrplan, der auch bei Unregelmäßigkeiten einen reibungslosen und pünktlichen Betrieb gestattet, da hierzu Reserven im Fahrplan vorgehalten werden müssen. Hierbei handelt es sich zum einen um Regelzuschläge und zum anderen um Pufferzeiten. Regelzuschläge werden auf die berechneten Fahrzeiten aufgeschlagen, um unterschiedliche Fahrbedingungen und kleinere Verspätungen auffangen zu können, und vergrößern damit die Sperrzeiten. Pufferzeiten sind Zeitabstände zwischen den Sperrzeitentreppen, die nicht belegt werden, um die Übertragung von Verspätungen zwischen den Zügen zu dämpfen. Beide Arten senken die mögliche Auslastung und lassen die planmäßigen Wartezeiten weiter ansteigen, erhöhen aber die Stabilität des Fahrplans im Betrieb.

Zur Bemessung der einzelnen Größen wurden in der Vergangenheit eisenbahnbetriebswissenschaftliche Verfahren entwickelt. Bevor diese Verfahren in Kapitel 5 genauer erläutert werden, soll zunächst die prinzipielle Vorgehensweise bei der Erstellung von Fahrplänen und existierende Systeme zur Unterstützung dieses Prozesses dargestellt werden.

## 2.3 Fahrplanprocedere vor der Bahnreform

Obwohl sich die Erstellung von Fahrplänen aufgrund der am 01. Januar 1994 begonnenen Bahnreform wesentlich geändert hat, soll zuerst das bis dahin von der Deutschen Bundesbahn (DB) verwendete Procedere vorgestellt werden, da dieses viele Jahre lang durchgeführt wurde und für das Gesamtverständnis immer noch von Interesse ist. Die Deutsche Reichbahn (DR) verwendete eine ähnliche Vorgehensweise, in der der Güterverkehr aufgrund seiner Bedeutung als zentraler Transportträger allerdings einen höheren Stellenwert hatte. Beide Planungen waren zudem durch die grenzüberschreitenden Züge miteinander verknüpft.

Bei der Erstellung des Fahrplans spielten unterschiedliche Rahmenbedingungen eine wesentliche Rolle, die dem obersten Unternehmensziel der Deutschen Bundesbahn dienen sollten. Wie in Abb. 2 zu sehen ist, wurden externe Gesetze und Zielsetzungen des Bundes als Eigentümer, eine Orientierung des Fahrplanangebots am Markt, aber auch interne Bedingungen berücksichtigt. Hieraus leitete die Hauptverwaltung der Deutschen Bundesbahn (HVB) als Unternehmensleitung Grundsatzvorgaben über die Gestaltung und Weiterentwicklung des Fahrplanwesens ab. So wurde jährlich in der Bundesbahn-Reisezugfahrplanbesprechung I (BRB I) der Umfang der Reisezugleistungen für den Regelfahrplan und der Gesamtaufwand für den Jahresfahrplan von der HVB nach den vorhandenen wirtschaftlichen Verhältnissen und den Notwendigkeiten des Verkehrs festgelegt [GrKa66]. Die HVB führte zudem die Verhandlungen mit den Eisenbahnverwaltungen der Nachbarländer über grundsätzliche Fragen der Fahrplangestaltung und genehmigte abschließend die erarbeiteten Fahrpläne.

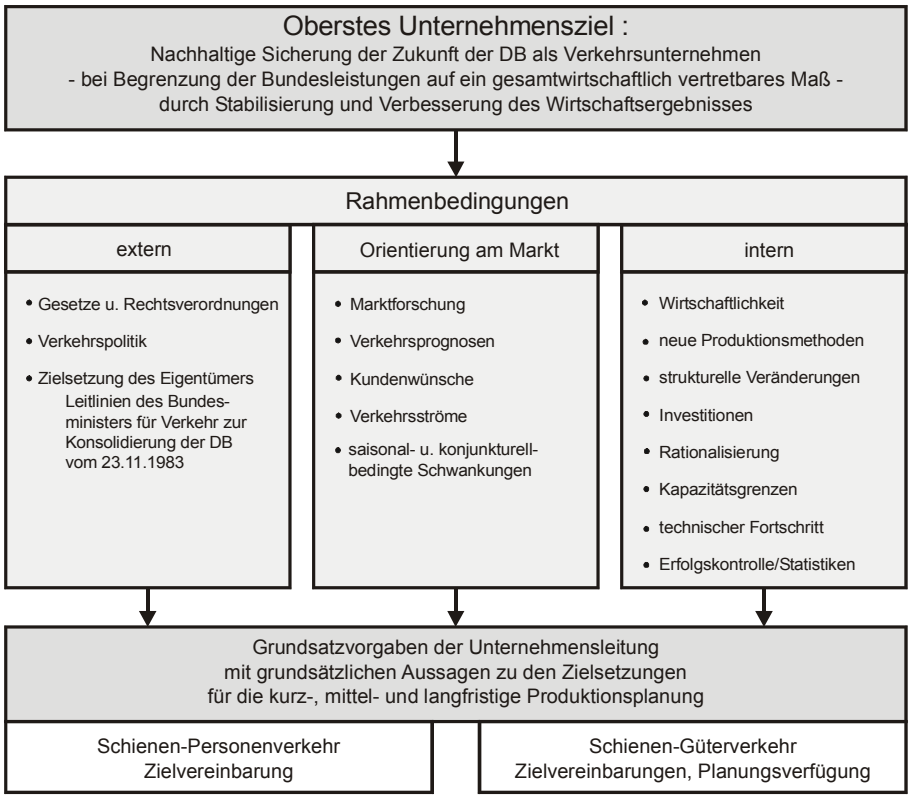


**Abb. 2: Rahmenbedingungen der Produktionsplanung bei der DB [Lin84]**

Die Reise- und Güterzugfahrpläne wurden aus organisatorischen Gründen getrennt bearbeitet, obwohl beide später im Allgemeinen auf den gleichen Gleisanlagen verkehren. Daher waren sorgfältige Abstimmungen des Reise- und Güterzugfahrplans eine wichtige Voraussetzung für einen planmäßigen Zugverkehr [GrKa66].

Die umfangreichen Fahrplanarbeiten des Reisezug- und Güterzugplanungsdienstes wurden zeitlich durch in den Fristenkalendern festgelegte Fahrplanfristen gesteuert [Lin84]. Diese Fristen orientierten sich am Tag des Fahrplanwechsels und wurden in einer Rückwärtsrechnung festgelegt, die auf Erfahrungswerten beruht. Der Tag des Fahrplanwechsels ist seit jeher ein international gebundener Termin, der auf der jährlichen Europäischen Reisezugfahrplankonferenz (EFK) festgelegt wird, die sich heute als „Forum Train Europe“ bezeichnet.

An Abb. 3 ist zu sehen ist, wie durch eine abgestimmte Arbeitsweise das Zusammenwachsen von Reise- und Güterzugfahrplan ermöglicht wurde. Gleichzeitig konnte so die rechtzeitige Fertigstellung und Herausgabe der unterschiedlichen Fahrplanunterlagen sichergestellt werden.

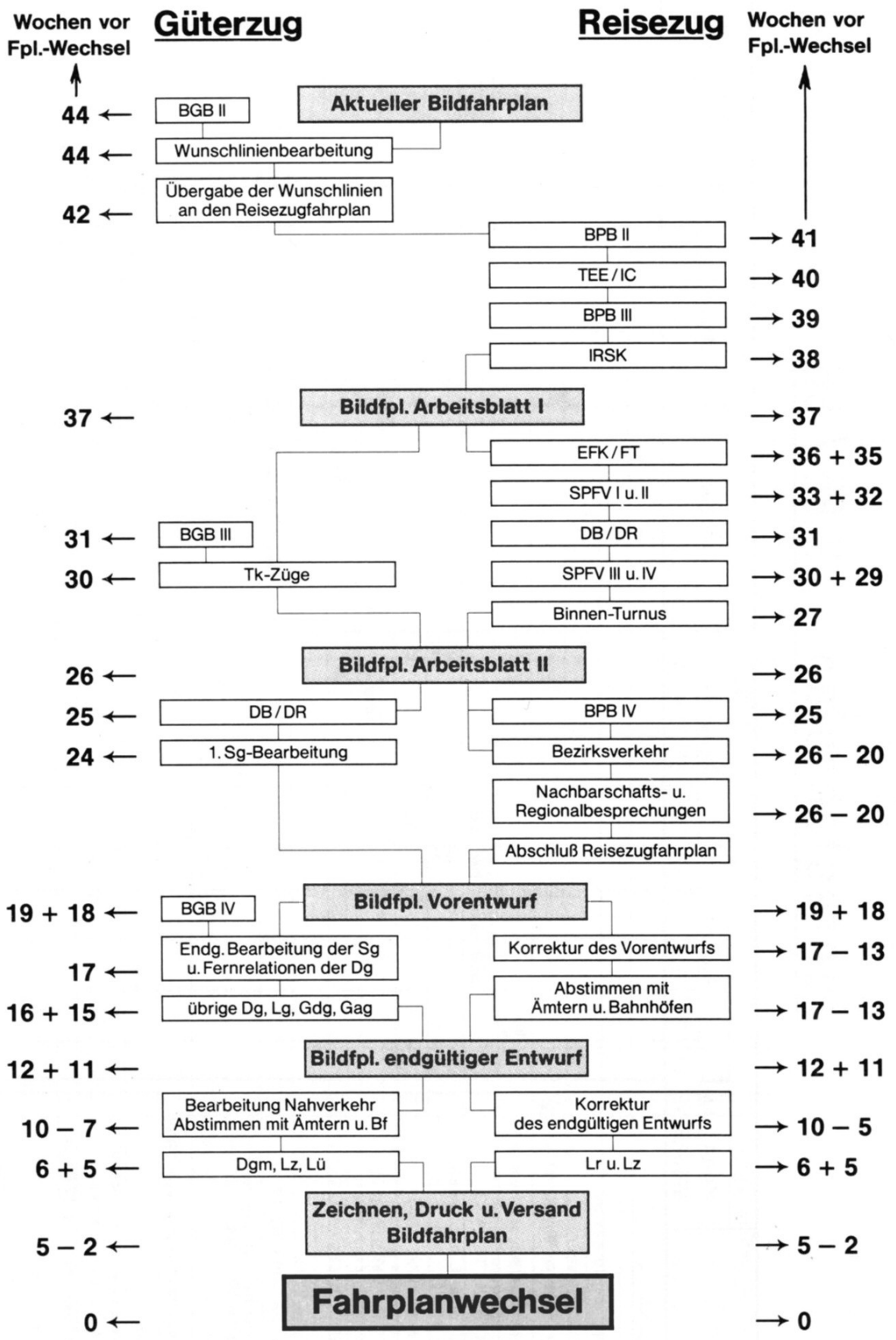


**Abb. 3: Arbeitsschritte der Produktionsplanung bei der DB [Lin84]**

So befassten sich die ersten Planungsarbeiten des Güterzugfahrplandienstes für das kommende Fahrplanjahr mit der Festlegung der Fahrpläne international gebundener oder besonders wichtiger innerdeutscher Güterzüge, den so genannten Güterzugfahrplan-Wunschlinien. Bei der Festlegung der grundsätzlichen Lagen und Halte der Reisezüge des Fernverkehrs in den folgenden BRB konnten daher diese zu „schonenden Güterzüge“ berücksichtigt werden. In das erste Zwischenergebnis, dem so genannten Bildfahrplan Arbeitsblatt I, flossen zudem die Ergebnisse der Internationalen Reisebüro-Sonderzugkonferenz (IRSK) ein. Auf dieser Grundlage konnten dann in der EFK die gewünschten Lagen der internationalen Reisezüge mit den Eisenbahnverwaltungen der Nachbarländer besprochen werden.

Nach der Festlegung der internationalen Züge konnten dann auch die weiteren Züge des Fernverkehrs in dieses Netz eingeplant werden. Der nächste Schritt war das Erarbeiten der restlichen Personenzüge, die den Bereich einer Bundesbahndirektion im Allgemeinen nicht verließen und daher auch in der Direktion bearbeitet wurden.

Parallel zu den Personenzügen wurden sukzessive die Güterzüge entsprechend ihrer Gattungen geplant und in gemeinsame weitere Bildfahrpläne, die den jeweils erreichten Stand repräsentierten, eingebracht. Als letztes wurden die Güterzüge des Nahverkehrs und die Leerzüge in die verbliebenden Lagen geplant, bevor der Bildfahrplan endgültig gezeichnet, gedruckt und verteilt werden konnte.

Obwohl die endgültigen Fahrplanarbeiten für den Personennah- und Güterverkehr erst zu einem späten Zeitpunkt begannen, sollten die Belange dieser Verkehre schon bei den Planungsarbeiten zum Schienenpersonenfernverkehr berücksichtigt werden, um eine bestmögliche Vernetzung von Nah- und Fernverkehr sicherzustellen und eine optimale Ausnutzung von Streckenkapazität und Bahnhofsanlagen zu erreichen [GöBr88].

Die Erstellung eines neuen Jahresfahrplans war vor der Bahnreform geprägt von einer starren Reihenfolge von Aktivitäten, einer grundsätzlichen Aufteilung nach Reise- und Güterverkehr und den Zielsetzungen der HVB als Unternehmensleitung. Der Zeitpunkt der Festlegung des Fahrplans eines Zuges hing wesentlich von seiner Zuggattung und der zugehörigen Zuggattungsnummer ab, die seine Wichtigkeit wiederspiegeln sollte.

## 2.4 Trassenmanagement seit der Bahnreform

Seit einigen Jahren befinden sich nahezu sämtliche europäische Eisenbahnunternehmen im Umbruch. Die EG-Richtlinie 91/440 zur „Entwicklung der Eisenbahnunternehmen der Gemeinschaft“ [EG91] fordert von den europäischen Bahnen zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit des Eisenbahnverkehrs und zum Erreichen der Wettbewerbsfähigkeit mit den anderen Verkehrsträgern eine, zumindest auf dem Gebiet der Rechnungsführung obligatorische, Trennung von Infrastrukturbetrieb und Erbringung der Eisenbahnverkehrsleistungen. Insbesondere soll externen Eisenbahnverkehrsunternehmen – so genannten Dritten – der ungehinderte Zugang zur Eisenbahninfrastruktur ermöglicht werden.

In Deutschland wurde daher Ende 1993 im Artikel 5 des ENeuOG, dem so genannten „Allgemeinen Eisenbahngesetz“, festgeschrieben, dass „Eisenbahnverkehrsunternehmen mit Sitz in der Bundesrepublik Deutschland das Recht auf diskriminierungsfreie Benutzung der Eisenbahninfrastruktur von Eisenbahninfrastrukturunternehmen haben, die dem öffentlichen Verkehr dienen“ [BGBl93, §14].

Darüber hinaus wurden die Artikel 1 und 2 des ENeuOG zum 01.01.1994 mit der ersten Stufe der Bahnreform in Deutschland umgesetzt, indem die bundeseigenen Bahnen DB und DR zunächst in die privatwirtschaftlich organisierte Deutsche Bahn AG (DB AG) eingebracht wurden. Innerhalb dieser wurden ein eigenständiger Unternehmensbereich zum Betrieb der Eisenbahninfrastruktur und drei Unternehmensbereiche zur Erbringung von Verkehrsleistungen auf den unterschiedlichen Gebieten des Personenfern-, Personennah- und Güterverkehrs eingerichtet. In der am 01.01.1999 realisierten zweiten Stufe der Bahnreform wurden diese Unternehmensbereiche in die formal eigenständigen, sich aber weiterhin unter dem gemeinsamen Konzerndach DB AG befindlichen Aktiengesellschaften DB Netz AG, DB Reise & Touristik AG, DB Regio AG und DB Cargo AG ausgegründet.

Zur Umsetzung der EG-Richtlinie 95/19 über die „Zuweisung von Fahrwegkapazität der Eisenbahn und die Berechnung von Wegeentgelten“ [EG95] wurde in Deutschland 1997 eine „Verordnung über die diskriminierungsfreie Benutzung der Eisenbahninfrastruktur und über die Grundsätze zur Erhebung von Entgelt für die Benutzung der Eisenbahninfrastruktur (Eisenbahninfrastruktur-Benutzungsverordnung – EIBV)“ [BGBl97] erlassen.

Das Europäische Parlament und der Rat der europäischen Union hat am 26.02.2001 das aus den drei neuen Richtlinien 2001/12/EG, 2001/13/EG und 2001/14/EG bestehende Eisenbahnpaket verabschiedet. Darin wurden die oben genannten

älteren EG-Richtlinien entsprechend der bei ihrer Durchführung in den einzelnen Mitgliedsstaaten gemachten Erfahrungen unter vollständiger Beibehaltung der Zielsetzung geändert ([EG01a], [EG01b], [EG01c]). So wird in diesen, bis zum 15.03.2003 in nationales Recht umzusetzenden Richtlinien die Einrichtung einer unabhängigen Eisenbahn-Regulierungsstelle zur Gewährleistung eines gerechten und nichtdiskriminierenden Zugangs zur Infrastruktur gefordert, wenn Infrastrukturbetrieb und Erbringung der Eisenbahnverkehrsleistungen nicht in wesentlichen Funktionen voneinander getrennt sind. Zudem werden ein Transeuropäisches Schienengüternetz definiert, das den EU-Eisenbahnunternehmen für die Erbringung von grenzüberschreitenden Güterverkehrsleistungen offen steht, die Zulassungsregeln für Eisenbahnverkehrsunternehmen den neuen Gegebenheiten angepasst und Regeln zur Behandlung von Kapazitätsengpässen aufgestellt.

In der zur Zeit in Deutschland weiterhin gültigen EIBV von 1997 wird der Begriff Zugtrasse in § 2 als der Teil einer Infrastruktur definiert, der benötigt wird, um eine bestimmte Zugfahrt auf einer bestimmten Strecke innerhalb eines bestimmten Zeitraums durchzuführen. Zudem werden Bedingungen für die Eisenbahninfrastrukturunternehmen zur Gewährleistung der diskriminierungsfreien Benutzung ihrer Infrastruktur aufgestellt. So darf bei der Vergabe der Zugtrassen ohne sachlich gerechtfertigten Grund nicht unterschiedlich entschieden werden und es müssen allgemeine Geschäftsbedingungen einschließlich der Entgelte für die Benutzung der Zugtrassen für alle Eisenbahnverkehrsunternehmen aufgestellt werden. Weiterhin wird das Verfahren zur Benutzung der Eisenbahninfrastruktur vorgegeben, das einen festen Stichtag festlegt, bis zu dem alle Anmeldungen auf Zugtrassen für eine neue Fahrplanperiode vorliegen müssen. Danach muss das Eisenbahninfrastrukturunternehmen innerhalb von zwei Monaten über die Vergabe der Zugtrassen entscheiden. Bei Konflikten zwischen einzelnen Trassenwünschen sollen im Rahmen von Verhandlungen einvernehmliche Lösungen gefunden werden. Falls dies nicht möglich ist, wird die Trasse an den Meistbietenden vergeben. Allerdings sollen Verkehrsleistungen im vertakteten Personennahverkehr bevorzugt behandelt werden. Nicht fristgemäß eintreffende Annmeldungen können zudem nachrangig bearbeitet werden.

Durch die notwendige Umsetzung dieser Anforderungen durch den Infrastrukturbetreiber DB Netz AG und das Lieferanten-Kunden-Verhältnis zwischen ihr und den einzelnen Verkehrsunternehmen, das durch Allgemeine Geschäftsbedingungen und explizite Trassenpreise formal geregelt ist, kommt diesem Teil der Fahrplanerstellung eine neue, bedeutendere Rolle zu. Dieses so genannte Trassenmanagement ist eine der Kernaufgaben eines Eisenbahninfrastrukturbetreibers, das die bestmögliche

Erfüllung der Kundenwünsche unter gleichzeitiger Berücksichtigung einer höchstmöglichen Kapazitätsauslastung der Infrastruktur sicherstellen muss [Rau98]. Das entstehende Spannungsfeld wird in Abb. 4 deutlich. Die Nachfrager wünschen sich leistungsfähige Einzeltrassen, um ihren eigenen Kunden pünktliche, schnelle und auf die Bedürfnisse exakt abgestimmte Fahrten anbieten zu können. Solche Trassen reduzieren aber den Durchsatz des Gesamtsystems und stehen daher in Konflikt mit dem Ziel der optimalen Auslastung der vorhandenen Infrastruktur. Der Netzbetreiber hat daher ein Interesse an der Harmonisierung der Zugtrassen und muss zudem Reservezeiten bereitstellen, um einen pünktlichen Betrieb realisieren zu können. Hierdurch können aber wiederum nicht alle Wünsche der Kunden erfüllt werden.

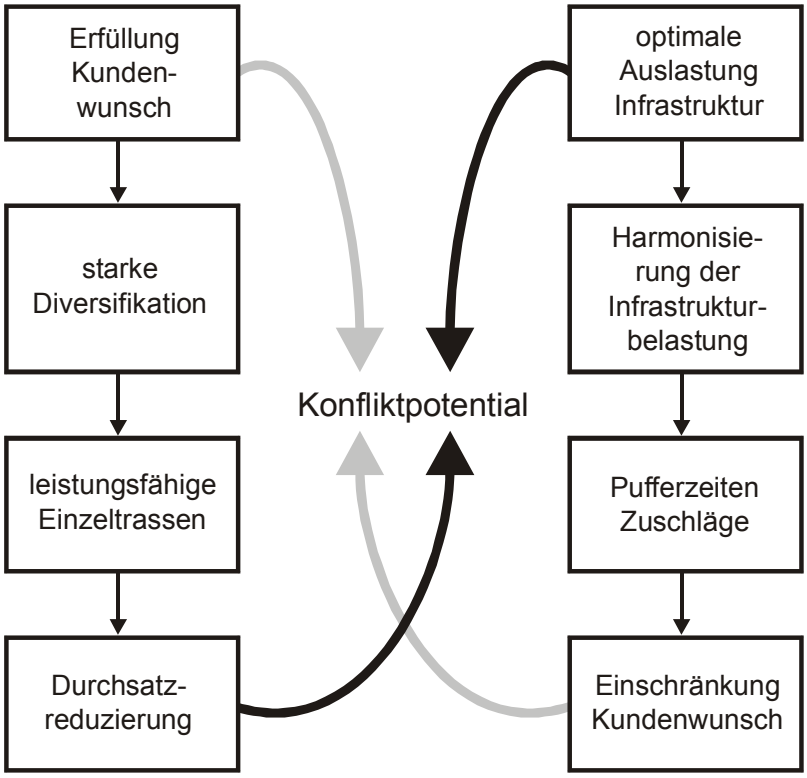


**Abb. 4: Spannungsfeld zwischen Kundenwunsch und Infrastrukturauslastung (nach [Rau98])**

Um die bestmögliche Auslastung der Eisenbahninfrastruktur zu gewährleisten, wurden von der DB Netz AG Konstruktionsprioritäten aufgestellt und in ihren „Allgemeine Bedingungen für die Nutzung der Eisenbahninfrastruktur der DB Netz AG (ABN)“ genannten Allgemeinen Geschäftsbedingungen veröffentlicht [DB01b]. Demnach werden die Anmeldungen in der Reihenfolge behandelt, die sich aus den folgenden Grundsätzen ergibt:

- fristgerechte Anmeldungen vor nicht fristgerechten Anmeldungen
- vertraglich gebundene Trassen vor Neuanmeldungen

- Anmeldungen, die zum Zeitpunkt des der betreffenden Fahrplanperiode vorangehenden Anmeldetermins bereits durch die DB Netz AG veröffentlichten betrieblich-technischen Vorgaben für bestimmte Strecken entsprechen, vor abweichenden Anmeldungen
- Anmeldungen für Verkehrsleistungen, die aufgrund ihrer Regelmäßigkeit eine höhere Infrastrukturauslastung innerhalb einer Fahrplanperiode ermöglichen, vor Anmeldungen für unregelmäßig oder bedarfsweise verkehrende Verkehrsleistungen
- Anmeldungen von Verkehrsleistungen mit Laufzeit über mehrere Fahrplanperioden vor Anmeldungen für Verkehrsleistungen mit Laufzeit von einer Fahrplanperiode oder weniger

Die einzelnen Trassen werden also nicht mehr in der Reihenfolge der Ränge in das Fahrplanblatt eingelegt. Diese neue Reihenfolge soll den diskriminierungsfreien Zutritt und die optimale Auslastung des Netzes gewährleisten.

Im Rahmen der Trassenvergabe können weiterhin Konflikte zwischen einzelnen Wunschtrassen auftreten. Daher müssen bei der Koordination der Trassen Vorschläge zur Lösung von Konflikten entwickelt und umgesetzt werden. Die gesetzlichen Regelungen zur Gewährleistung der Diskriminierungsfreiheit und die eigenen Allgemeinen Geschäftsbedingungen müssen hierbei zusammen mit dem aktuellen Tarifsystem berücksichtigt werden.

Das erste ab 1994 gültige Trassenpreissystem [DB94] enthielt als einen wesentlichen Qualitätsindikator die Planungsqualität, die das Verhältnis zwischen der kürzesten betriebstechnisch erreichbaren Beförderungszeit und der tatsächlich geplanten Beförderungszeit darstellt. Dieses Qualitätskriterium war also von der planmäßigen Wartezeit abgeleitet und stellte damit einen direkten Zusammenhang zur Auslastung der Infrastruktur her. Für Züge mit sehr hoher Priorität und damit sehr hohem Trassenpreis sollten planmäßige Wartezeiten in Höhe von maximal 5 % ihrer betriebstechnisch erreichbaren Beförderungszeit nicht überschritten werden. In der niedrigsten Rangklasse waren dagegen 70 % zulässig. Bei der Lösung von Konflikten konnten also entsprechend der zulässigen planmäßigen Wartezeiten Veränderungen an der Wunschtrasse vorgenommen werden.

Bei der Fortschreibung des Trassenpreissystems 1998 wurde ein zweistufiges System mit dem Ziel der Gewinnung von Mehrverkehren eingeführt, bei dem der variable Trassenpreis pro Kilometer durch den Kauf einer so genannten „InfraCard“ gesenkt werden konnte [HaSc99]. Gleichzeitig wurde die strikte Verwendung der

Planungsqualität als Qualitätskenngröße verlassen und dafür eine neue Kenngröße Fahrplanflexibilität eingeführt, die den bei der Konstruktion eingeräumten Spielraum beschreiben soll, wobei Anforderungen an die zulässige Beförderungszeit und Forderungen nach Vertaktung einfließen können.

Erst wenn keine Lösung der Trassenkonflikte im Rahmen dieser mit Preisnachlässen erkauften Konstruktionsfreiheiten möglich ist, muss das in der EIBV vorgeschriebene Konfliktlösungsgespräch und ggf. eine Vergabe nach dem Höchstpreisprinzip durchgeführt werden.

Aufgrund beim Kartellamt aufgekommener Bedenken bezüglich einer Diskriminierung kleinerer EVU, für die sich der Erwerb einer InfraCard nicht rechnen konnte, wurde von der DB Netz AG zum 01. April 2001 ein neues Preissystem eingeführt [DB01a]. Dieses enthält einen festen Grundpreis pro Trassenkilometer entsprechend der Kategorie der genutzten Strecke, der sich um feste Faktoren je nach gewünschter Produktart und speziellen Anforderungen erhöht. Mit Hilfe der neu eingeführten Produktarten können Prioritäten bei der Trassenplanung erkauft werden. Die Gewährung von Spielräumen durch die Wahl einer anderen Produktklasse führt dagegen zu Nachlässen beim Trassenpreis.

Neben der Erstellung eines langfristigen Fahrplans für eine Fahrplanperiode aufgrund von Trassenbestellungen bietet die DB Netz AG als Infrastrukturbetreiber aufgrund der verbleibenden Infrastrukturkapazität, die nicht von Regeltrassen für langfristige und wiederkehrende Verkehre verbraucht wird, den Eisenbahnverkehrsunternehmen weitere Trassen an [DB99a]. Hierbei handelt es sich um verschiedene Arten von Trassen für unterschiedliche Einsatzwecke:

- Angebotstrassen – werden ohne konkrete Bestellung für Standardzüge konstruiert und den Kunden zu einem günstigen Preis angeboten.
- Freightway-Trassen – sind vorkonstruierte Angebotstrassen speziell für den grenzüberschreitenden Güterverkehr.
- Sondertrassen – sind kurzfristig konstruierte Trassen, die während des laufenden Fahrplans konstruiert werden, um Ad-hoc-Verkehre zu ermöglichen.

Durch die Bahnreform ist die verzahnte Fahrplanerstellung in unterschiedliche Unternehmen verlagert worden. In den einzelnen Eisenbahnverkehrsunternehmen

muss vor der Bestellung der Trassen eine eigenständige Fahrlagenplanung[2] durchgeführt werden, um die optimalen Zuglagen anhand der Nachfrage der Kunden und der Kostenstruktur zu ermitteln. Hierzu sind neben der Kenntnis des eigenen Primärmarktes die Fahrzeiten zwischen den gewünschten Verkehrshalten erforderlich, die der Infrastrukturbetreiber zur Verfügung stellt.

Wie schon erwähnt, existiert die als „Forum Train Europe“ bezeichnete EFK auch noch nach der Bahnreform. Hier werden weiterhin die Lagen der internationalen Züge festgelegt, die beim nationalen Trassenmanagement berücksichtigt werden müssen.

Der Prozess der Fahrplanerstellung ist durch die Bahnreform schwerfälliger, und Iterationsläufe sind schwieriger geworden, da sie zu Verhandlungen zwischen Beteiligten unterschiedlicher Unternehmen führen und zudem explizite Preise zu entrichten sind. Allerdings ist auf diesem Weg eine transparente Vergabe der vorhanden Infrastrukturkapazität an die einzelnen Eisenbahnverkehrsunternehmen möglich. Diese ist eine wesentliche Voraussetzung für den diskriminierungsfreien Zugang Dritter zur Infrastruktur, damit das Ziel der Bahnreform – mehr Verkehr auf die Schiene – erreicht werden kann.

[2] Die Fahrlagenplanung der Eisenbahnverkehrsunternehmen umfasst die zeitliche und räumliche Festlegung gewünschter Verbindungen zwischen Abgangs- und Zielbahnhof, deren Vernetzung sowie ggf. auch den Ressourceneinsatz [DB01c].

# 3 Verfahren zur Fahrplankonstruktion

In diesem Kapitel werden die bei der Fahrplankonstruktion verwendeten Verfahren und Werkzeuge vorgestellt. Die Fahrplanerstellung geschah lange ausschließlich manuell mit Papier und Bleistift, wird aber inzwischen von DV[3]-Werkzeugen unterstützt. Anschließend werden verschiedene Ansätze zur automatischen Fahrplankonstruktion, die sich bislang nicht durchsetzen konnte, vorgestellt.

## 3.1 Manuelle Fahrplankonstruktion

Die manuelle Fahrplankonstruktion hat mehr als 150 Jahre das Fahrplanwesen der Eisenbahn bestimmt und wird noch heute von vielen Bahnunternehmen verwendet [Pac00]. Eine zentrale Rolle spielt hierbei der Bildfahrplan, der den Betriebsablauf auf einer Strecke grafisch darstellt.

Der Bildfahrplan ist ein Liniennetz aus Ortslinien, die den Fahrzeitmesspunkten der einzelnen Betriebsstellen entsprechen, und orthogonal dazu angeordneten Zeitlinien. In dieses Liniennetz werden die Zugfahrten als Zeit-Weg-Linien eingetragen.

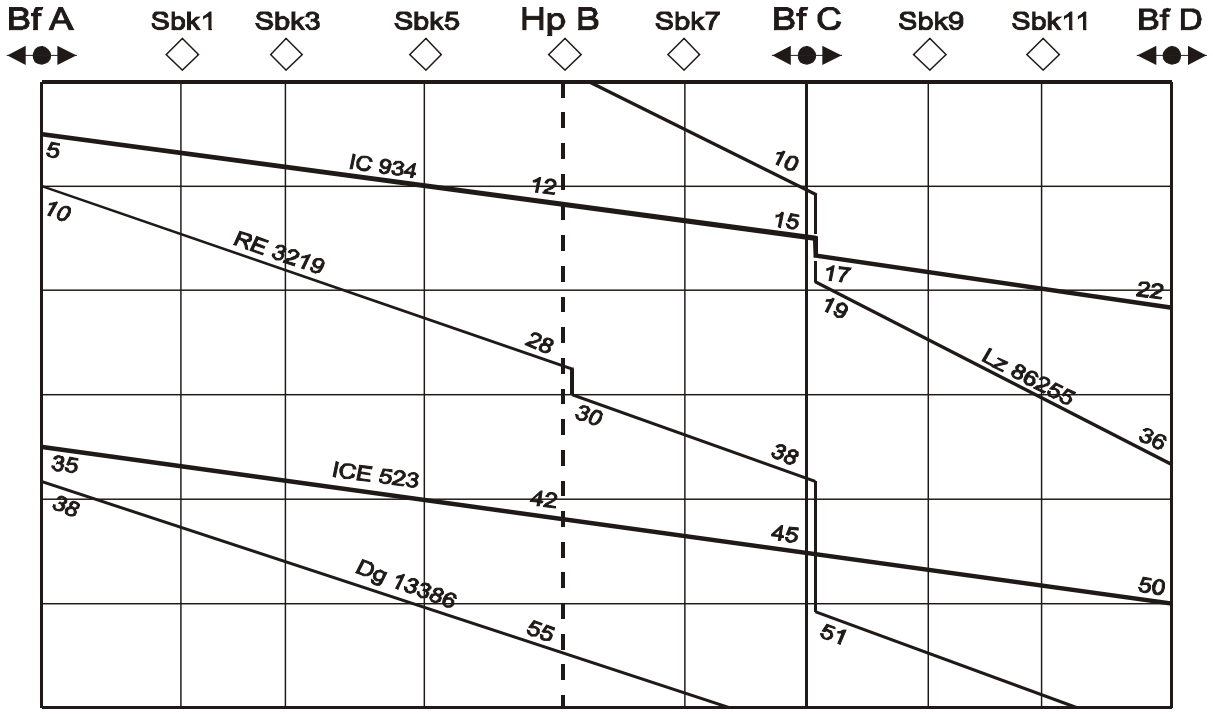


**Abb. 5: Beispielhafte Darstellung eines Bildfahrplans**

[3] DV = Datenverarbeitung

Bei manueller Konstruktion eines Bildfahrplans werden bei der Darstellung der Zeit-Weg-Linien üblicherweise die exakten Fahrtverläufe durch einen Polygonzug ersetzt, indem die Abfahrt-, Ankunft- und Durchfahrtzeiten der einzelnen Betriebsstellen mit Hilfe von Linealen durch Geraden verbunden wurden. Die Schnittpunkte der Zeit-Weg-Linien mit den Ortslinien tragen eine Beschriftung mit den Minutenwerten des jeweiligen Zeitpunktes. In Abb. 5 ist ein in Deutschland üblicher Bildfahrplan mit horizontaler Wegachse exemplarisch dargestellt.

Die Darstellungsform des Bildfahrplans ermöglicht eine sehr übersichtliche Abbildung des Betriebsablaufs einer Strecke, erlaubt jedoch keine ausreichenden Rückschlüsse auf die tatsächliche Inanspruchnahme der Infrastruktur durch die einzelnen Zugfahrten, um einen wahren Fahrplan erstellen zu können. Hierfür müssten die schon zuvor erläuterten Sperrzeitentreppen verwendet werden, die wiederum auf den tatsächlichen Zeit-Weg-Linien der Zugfahrten beruhen sollten. Eine manuelle Durchrechnung der Sperrzeiten wird zwar mitunter bei eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Untersuchungen praktiziert, im Rahmen der manuellen Fahrplankonstruktion ist dieser Aufwand jedoch absolut unvertretbar [Pac00]. Daher wurden vereinfachende Regeln zur Berücksichtigung der Sperr- und Pufferzeiten aufgestellt. So wird bei der Ermittlung der Sperrzeit zur Abdeckung der Sichtzeit, Annäherungsfahrzeit, Räumfahrzeit, Fahrstraßenbilde- und -auflösezeit ein pauschaler Zuschlag von einer Minute zur direkt aus den Zeit-Weg-Linien ablesbaren Fahrzeit erhoben [KaWi87]. Zur Ermittlung der notwendigen Pufferzeiten existieren ähnlich schlichte Regeln.

Um die Durchführbarkeit der Planungen zu gewährleisten, sollte der Fahrplanbearbeiter bei der Deutschen Bundesbahn mit den örtlichen Besonderheiten vertraut sein und in Einzelfällen Probleme bei der Konstruktion mit den örtlichen Stellen absprechen. Zusätzlich wurde versuchsweise ein Kontrollverfahren eingeführt, wonach sowohl der endgültige Fahrplan als auch die Bildfahrplanentwürfe von den örtlichen Dienststellen sorgfältig und fachgerecht auf Mängel überprüft werden mussten [Lin84].

Zur Darstellung des Betriebsablaufs innerhalb eines Knotens mit mehreren parallelen Bahnhofsgleisen wird anstelle des Bildfahrplans die bildliche Bahnhofsfahrordnung benutzt. Wie in Abb. 6 zu sehen ist, enthält diese für jedes Bahnhofsgleis eine senkrechte Zeitachse, an der die Gleisbelegungen in Form von Streifen abgebildet werden.

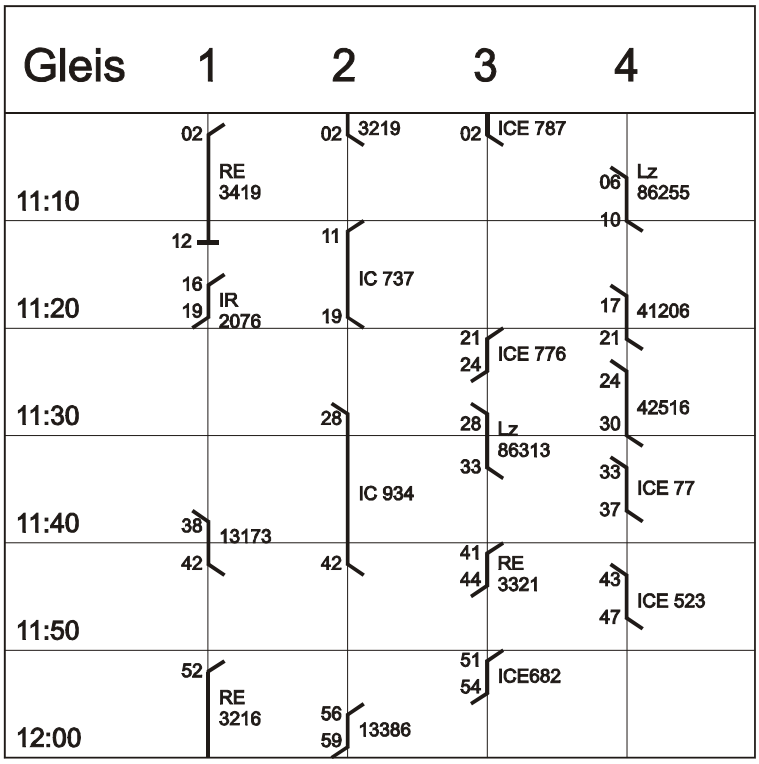


**Abb. 6: Beispielhafte Darstellung einer bildlichen Bahnhofsfahrordnung**

Auch die Darstellung der bildlichen Fahrplanordnung ist nicht dazu geeignet, die Zulässigkeit einer bestimmten Zuglage eindeutig beurteilen zu können. Eine Ergänzung der besetzten Gleise um die zugehörigen Sperrzeiten ist hierfür nicht ausreichend, da die Ausschlüsse zwischen den einzelnen Fahrstraßen nicht ersichtlich sind. Eine Ergänzung der Bahnhofsfahrordnung um alle Fahrstraßenausschlüsse, wie es zu betriebswissenschaftlichen Untersuchungen in Form des Fahrtenabhängigkeitsplans üblich ist, hat sich wegen der äußerst komplexen und unübersichtlichen Darstellung nicht als Fahrplanunterlage durchsetzen können [Pac00]. Bei der manuellen Erstellung einer Bahnhofsfahrordnung kann daher die Zulässigkeit bestimmter Zugfahrten nur aus der betrieblichen Erfahrung heraus beurteilt werden.

Zudem ist im Bereich größerer Knoten mit umfangreichen Fahrstraßenabhängigkeiten die Berücksichtigung der Sperrzeiten durch einen einfachen pauschalen Zuschlag von einer Minute auf die Fahrtzeit nicht praktikabel, da die realen Sperrzeiten im Einzelfall deutlich darüber liegen können [Pac00]. Daher wurden für größere Knoten tabellarische Übersichten über die einzuhaltenden Mindestzugfolgezeiten aufgestellt, die bei der Aufstellung von Bildfahrplan und Bahnhofsfahrordnung zu berücksichtigen sind. Die einzelnen Mindestzugfolgezeiten wurden im laufenden Betrieb gemessen oder beruhten auf Erfahrungen des Stellwerkspersonals [Pac00].

In den 60er-Jahren übernahmen rechnergestützte Verfahren die bis dahin auf Messung, Erfahrung und manueller Berechnung beruhende Ermittlung der Fahrzeiten [BiMi71]. Die Fahrzeiten aller Züge wurden seitdem zentral ermittelt und in Fahrzeitentafeln zusammengestellt. Eine Fahrzeitentafel enthält neben der reinen Fahrzeit des Zuges weitere Daten zur Konstruktion der Zeit-Weg-Linie, wie erforderliche Zuschläge für das Anfahren und Bremsen in einer Betriebsstelle.

Auch mit exakt berechneten Fahrzeitentafeln bleiben jedoch die grundsätzliche Vorgehensweise und die Probleme der manuellen Fahrplankonstruktion erhalten. Ohne unvertretbar hohen Aufwand kann auf diese Art kein wahrer Fahrplan erstellt werden kann.

## 3.2 Rechnergestützte Fahrplankonstruktion

In den 80er-Jahren wurde eine Reihe von Ansätzen entwickelt, um die sich etablierende Rechentechnik nicht nur zur Berechnung von Fahrzeiten, sondern direkt bei der Erstellung von Fahrplänen einzusetzen. Als erstes wurden Verfahren zur rechnergestützten Ermittlung von bei der manuellen Konstruktion zu beachtenden Kenngrößen entwickelt. Nach der Etablierung grafischer Arbeitsplätze war es naheliegend, rechnergestützte Systeme auch zum Zeichnen und Konstruieren von Fahrplänen am Bildschirm einzusetzen. Im Folgenden wird der lange Weg bis zum flächendeckenden Einsatz rechnergestützter Verfahren in der Fahrplankonstruktion beschrieben, um die besondere Problematik der Umsetzung einer naheliegenden Idee in den Bahnalltag herauszustellen. Auch hier wird deutlich, dass im Zuge einer DV-Umstellung nicht die bisherigen Vorgehensweisen in Software gegossen werden sollten, sondern neue Ansätze und Geschäftsprozesse realisiert werden können und müssen.

Ausgangspunkt für die rechnergestützte Ermittlung der Kenngrößen waren entsprechende Systeme zur Unterstützung der Fahrplanerstellung für den städtischen Nahverkehr. Diese betrachten Fahrten von Bussen und Straßenbahnen auf der Basis vertakteter Liniennetze und verwenden graphentheoretische Modelle zur Beschreibung von betrieblichen und fahrplantechnischen Abhängigkeiten zwischen den zeitlichen Komponenten der einzelnen Fahrten. Ausgehend von den entstehenden Graphen wird versucht, entsprechende Gesetzmäßigkeiten für den zu entwickelnden Taktfahrplan zu bestimmen. Beispielsweise werden mit Hilfe linearer Gleichungssysteme zulässige Wertebereiche für Fahrzeugfolgeabstände, Wende- und auch Umsteigezeiten ermittelt [Rüg64]. In einem anderen Ansatz werden Gesetzmäßigkeiten zwischen dem zugrunde liegenden Linienplan und der Anzahl der realisierbaren

Verknüpfungen der einzelnen Linien ermittelt, damit ein entsprechender Taktfahrplan mit einer festen, ebenfalls auf der Lösung eines Gleichungssystems aufbauenden Methodik erstellt werden kann [Weg74]. Die Anzahl der zugelassenen Verknüpfungen ist allerdings ausgesprochen gering.

Um entsprechende Aussagen und Kenngrößen auch für vertaktete Systeme im Eisenbahnverkehr zu erhalten, wurden diese Ansätze um die Berücksichtigung der besonderen Eigenschaften der klassischen Eisenbahn, wie Mindestzugfolgezeiten und Fahrstraßenausschlüsse, erweitert. Ein entsprechendes Verfahren bestimmt einen Fahrplan mit optimalen Übergangszeiten für ein Fernverkehrsnetz auf der Grundlage gegebener Verkehrsströme [Wei81]. Die Bemessung der Übergangszeiten geschieht mit einem wahrscheinlichkeitstheoretischen Ansatz. Der Fahrplan entsteht als Lösung eines Gleichungssystems, das aus dem so genannten Transportkettengraph abgeleitet wird. Mit Hilfe eines Rechners wird eine Anfangslösung für den Fahrplan ermittelt, die vom Bearbeiter durch eine sukzessive Änderung der zeitlichen Abhängigkeiten iterativ verbessert werden kann. In diesem Verfahren liegt der Schwerpunkt auf den verkehrlichen und weniger auf den fahrplantechnischen Aspekten. So werden die zugrunde liegenden Reisendenströme bei der Bewertung der Anschlüsse explizit berücksichtigt.

Ein anderes Verfahren für den Eisenbahnbetrieb betrachtet dagegen die fahrplantechnischen Zusammenhänge sehr detailliert, vernachlässigt dafür aber die verkehrlichen Aspekte weitgehend. Ausgehend von einem vorgegebenen Netzausschnitt mit den zugehörigen Mindestfahr-, Mindestzugfolge- und auch Fahrstraßenausschlusszeiten, einer vorgegebenen Taktzeit, einer fest vorgegebenen Reihenfolge der einzelnen Zuggattungen und den gewünschten Anschlüssen wird ein detailliertes Graphmodell erzeugt [Tre83]. Aus diesem werden unter Verwendung der sich aus dem starren Takt ergebenden Symmetrien Ungleichungen zwischen den zeitlichen Abhängigkeiten ermittelt, um zulässige Wertebereiche für variable Zeiten, wie planmäßige Fahrzeiten und Übergangszeiten, zu ermitteln. Zur Bestimmung der möglichen Werte und Wertebereiche wird wiederum ein interaktives, rechnergestütztes Verfahren verwendet, bei dem die Lösung iterativ ermittelt wird.

Bei den bislang skizzierten Verfahren wird der Rechner als Teil eines interaktiven Prozesses dazu eingesetzt, für eine ganz konkrete Aufgabenstellung im Rahmen getakteter Systeme Vorgaben für die klassische, manuelle Konstruktion zu machen. Obwohl diese Ansätze in der Praxis keine größere Verbreitung fanden, ist die Modellierung der zeitlichen Abhängigkeiten richtungsweisend und in den mathematischen Ansätzen zur automatischen Fahrplankonstruktion weiterhin von großer Bedeutung (vgl. Kapitel 4).

Der andere Ansatz, das Konstruieren mit Papier und Bleistift durch ein DV-gestütztes Verfahren am Bildschirm zu ersetzen, konnte aufgrund der erforderlichen grafischen Rechentechnik erst verhältnismäßig spät realisiert werden. In den 80er-Jahren wurden bei mehreren europäischen Bahnen entsprechende Projekte initiiert. Bei den Schweizer Bundesbahnen (SBB) entstand so SYFA (System Fahrplan) und bei den österreichischen Bundesbahnen (ÖBB) das System RUF (Rechnerunterstützte Fahrplanerstellung). Mit beiden Verfahren wurde insbesondere der Gedanke verfolgt, die Erstellung von Fahrplanunterlagen aus einer Quelle DV-technisch zu unterstützen. Zur Gewinnung dieser Daten wurde jeweils ein Werkzeug eingesetzt, das die Erstellung der Bildfahrpläne nachempfunden hat und dem Bearbeiter sehr viele Freiheitsgrade lässt [Sa99]. Auch bei den deutschen Bahnen gab es entsprechende Projekte zu diesem Thema. Die Deutsche Reichsbahn entwickelte TEFA (Technologen-Arbeitsplatz Fahrplanbearbeitung) und die Deutsche Bundesbahn richtete das Projekt IFB (Interaktive Fahrplan-Bearbeitung) ein.

Die rechnergestützten Verfahren zur Fahrplankonstruktion konnten sich dennoch erst Mitte der 90er-Jahre in der Praxis durchsetzen. Die Ursache liegt in der außerordentlichen Komplexität der zu beachtenden Abhängigkeiten und Randbedingungen, deren Implementierung in eine praxisgerechte DV-Lösung trotz der scheinbaren mathematischen Einfachheit mit einem erheblichen Aufwand verbunden ist [Pac00].

Der endgültige Durchbruch bei der rechnergestützten Fahrplankonstruktion war in Deutschland dem System FAKTUS (Fahrplankonstruktion und -untersuchung) vorbehalten. Dieses wird nach einem erfolgreichen, pilothaften Einsatz an ausgewählten Strecken seit der Erstellung des Jahresfahrplans 1998/99 flächendeckend bei der DB AG eingesetzt.

Im Folgenden werden die Projekte TEFA, IFB und FAKTUS zusammen mit anderen Ansätzen zu diesem Thema genauer vorgestellt.

### 3.2.1 Technologen-Arbeitsplatz Fahrplanbearbeitung (TEFA)

Auch die Deutsche Reichsbahn stellte zunächst das Zeichnen ihrer Bildfahrplanblätter in den Mittelpunkt der Entwicklung von DV-Systemen für die Unterstützung der manuellen Fahrplankonstruktion. In Zusammenarbeit mit der Hochschule für Verkehrswesen in Dresden (HfV) wurde zunächst das auf dem allgemein verfügbaren CAD-System CADdy basierende Programm RFK (Rechnergestützte Fahrplankonstruktion) entwickelt [HeUh92]. Mit diesem können Bildfahrpläne komfortabel an lokalen Arbeitsplatzrechnern (PC) bearbeitet werden, nachdem die zugrunde liegenden Fahrpläne manuell als Texttabellen eingegeben wurden.

Aufbauend auf RFK wurde D-CIF, das „Dezentrale System der computerintegrierten Fahrplanbearbeitung“, an der HfV entwickelt. Anstelle einer manuellen Datenerfassung werden hier die Fahrpläne interaktiv an PCs konstruiert und neben der grafischen Aufbereitung für den Bildfahrplandruck zusätzlich in einer zentralen Fahrplandatenbank für weitere DV-Systeme gespeichert [HoLoKr91]. D-CIF basiert auf einer graphentheoretischen Beschreibung der Streckendaten, besitzt eine integrierte dezentrale Fahrzeitrechnung und stellt eine grafische Benutzeroberfläche zur Festlegung des Laufwegs und der zeitlichen Lage der Züge zur Verfügung. Im Gegensatz zu vergleichbaren Entwicklungen existiert ein Algorithmus zur Konflikterkennung, der allerdings auf Zugfolgekonflikte beschränkt ist. Eine Anzeige der einzelnen Belegungen der Züge zur Unterstützung der Konstruktion des Fahrplans ist nicht vorhanden.

Das beschriebene Verfahren zur rechnergestützten Fahrplankonstruktion ist Teil des Gesamtkonzeptes für einen Technologen-Arbeitsplatz Fahrplanbearbeitung (TEFA) [PuHo89]. Wie in Abb. 7 dargestellt, soll die Konstruktion der Fahrpläne auf lokalen Arbeitsplatzrechnern durchgeführt werden, wogegen sowohl die zugrunde liegenden Infrastruktur- und Zugdaten als auch die Fahrpläne auf zentralen Datenbanken, die den einzelnen Reichsbahndirektionen zugeordnet sind, gespeichert werden. Die Datenbanken werden zentral in den Direktionen gepflegt und schließlich die endgültigen Fahrpläne als Bildfahrpläne geplottet und als Buchfahrpläne gedruckt.

TEFA wurde in der Reichsbahndirektion Dresden seit der Erarbeitung des Jahresfahrplans 1992/93 eingesetzt. Nach der flächendeckenden Einführung von FAKTUS wurde es nicht mehr zur Konstruktion, aber noch übergangsweise für den Fahrplandruck verwendet.

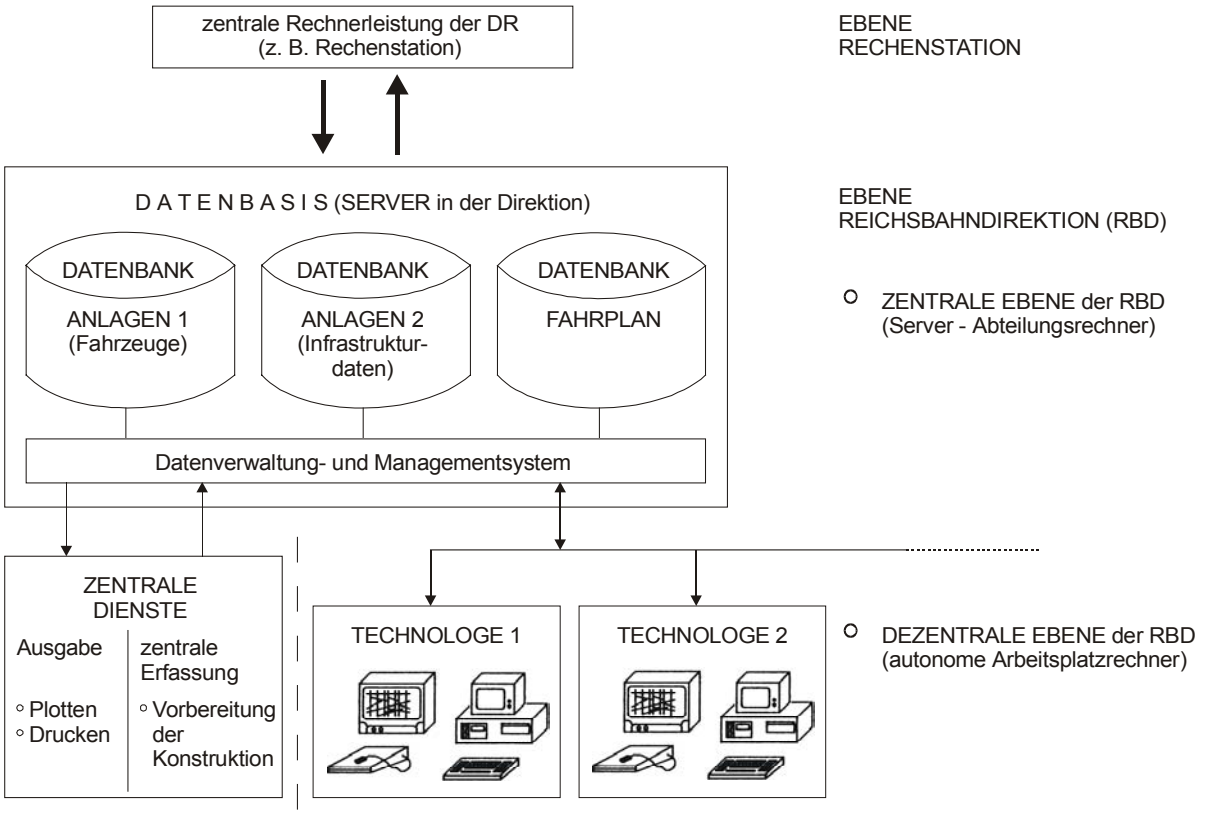


**Abb. 7: Technologen-Arbeitsplatz Fahrplanbearbeitung (aus [HoLoKr91])**

Im Rahmen der Zusammenführung der deutschen Bahnen DB und DR zur DB AG sollten auch die DV-Systeme vereinheitlicht werden. Ausgehend von der richtungsweisenden Konzeption von TEFA mit der Aufteilung in lokale und zentrale Komponenten wurde ein entsprechendes Projekt Gemeinsame Fahrplandatenhaltung (GFD) unter Federführung der DR eingerichtet, das eine einheitliche Datenquelle für die zukünftige Fahrplanarbeit zum Ziel hat [Pom92].

### 3.2.2 Interaktive Fahrplan-Bearbeitung (IFB)

Das Projekt IFB der Deutschen Bundesbahn sollte die Arbeiten am Bildfahrplan in DV-Technik übertragen. Hauptziele waren das Ablösen des zeit- und personalintensiven Zeichnens der Bildfahrpläne durch automatischen Fahrplanplot und die Versorgung weiterer Nutzer mit aktuellen Fahrplan- und Planungsdaten [LeLoSa92]. Das Projekt wurde in mehrere Phasen aufgeteilt und im Jahr 1992 das erste Teilvorhaben IFB-Plot zum Reinzeichnen der Bildfahrpläne nach manueller Dateneingabe realisiert. Hierdurch konnte Personal eingespart und die Darstellungsqualität der Bildfahrpläne erhöht werden. Die Konstruktion der Fahrpläne erfolgte weiterhin mit Papier und Bleistift.

Bei der Arbeit an den nächsten Phasen von IFB wurde deutlich, dass die Umsetzung der bestehenden Verfahrensweise in ein DV-unterstütztes System nicht zielführend sein kann. Die bisherige Philosophie mit festen Streckenabschnitten, vorgerechneten Fahrzeiten und einem umfangreichen Regelwerk war nicht geeignet, die aus der sich abzeichnenden Marktorientierung der Eisenbahnen zu erkennenden Anforderungen an die Fahrplankonstruktion zu erfüllen [Sa99]. Die alte Vorgehensweise wäre mit ihren Nachteilen in Software abgebildet worden, wodurch die Bearbeitung bestenfalls rationalisiert worden wäre, ohne die Qualität der Ergebnisse zu steigern.

Bei der Definition der notwendigen Anforderungen an ein modernes System zur rechnergestützten Fahrplankonstruktion wurde schließlich deutlich, dass die Verwendung von Sperrzeiten notwendig ist, um sicherzustellen, dass die Planung auch technisch durchführbar ist. Bei dem sehr dicht belegten Netz der DB AG sei nur auf diese Weise zu gewährleisten, dass geplante Zugfolgen realisierbar sind und dennoch keine Kapazitäten durch übergroße Pufferzeiten „verschenkt“ werden [Sa99]. Als Konsequenz dieser Entscheidung müssen die Fahr- und Sperrzeiten je nach Fahrweg individuell berechnet und folglich die Infrastruktur als Grundlage für die Planung sehr detailliert abgebildet werden. Mit Hilfe eines Werkzeugs, das diese neuen Anforderungen erfüllt, kann ein wahrer Fahrplan erstellt werden.

Parallel zu den Arbeiten an IFB wurde am Verkehrswissenschaftlichen Institut der RWTH Aachen das Programm FAKTUS entwickelt [Brü95]. Da dieses Programm den Anforderungen des Projektes IFB an ein modernes System zur rechnergestützten Fahrplankonstruktion entsprach, wurde es als Grundlage für die weiteren Entwicklungen unter dem neuen Namen RUT (Rechnerunterstützte Trassenkonstruktion) verwendet.

### 3.2.3 Fahrplankonstruktion und -untersuchung (FAKTUS)

Bei FAKTUS handelt es sich um ein interaktives, grafisches Verfahren mit integrierter Berechnung der Sperrzeitentreppen, das den Bearbeiter bei der Konstruktion eines qualitativ hochwertigen, wahren Fahrplans unterstützt ([Brü95], [Sa99]).

Um die Fahr- und Belegungszeiten jeder Zugfahrt individuell berechnen zu können, ist eine exakte Abbildung der zugrunde liegenden Infrastruktur erforderlich. Die Modellierung erfolgt mit einem gerichteten knotenbewerteten Digraphen, dem so genannten Spurplan-Graph [Brü95]. Jedes punktförmige Element der Eisenbahninfrastruktur kann eindeutig einem Zwischenweichenabschnitt zugeordnet werden. Daher bilden die Weichen und Gleisenden als Knoten und die Zwischenweichen-

abschnitte als Kanten das Grundgerüst dieses Graphen. Jedes Infrastrukturelement, z. B. Signal, Weichenende oder Neigungswechsel, wird als Spurplan-Knoten mit den für seine Art charakteristischen Werten und der Kilometrierung abgebildet und dem jeweiligen Zwischenweichenabschnitt zugeordnet. Innerhalb eines Zwischenweichenabschnitts sind die Knoten entsprechend ihrer Kilometrierung durch gerichtete Kanten miteinander verbunden. Um die Fahr- und Belegungszeiten exakt berechnen zu können, müssen neben Neigungen und Geschwindigkeiten auch Elemente des Signalsystems wie Fahrstraßenzugschlussstellen im Spurplan-Graphen berücksichtigt werden.

In Abb. 8 sind der Lageplan eines einfachen Kreuzungsbahnhofs und der zugehörige Spurplan-Graph dargestellt.

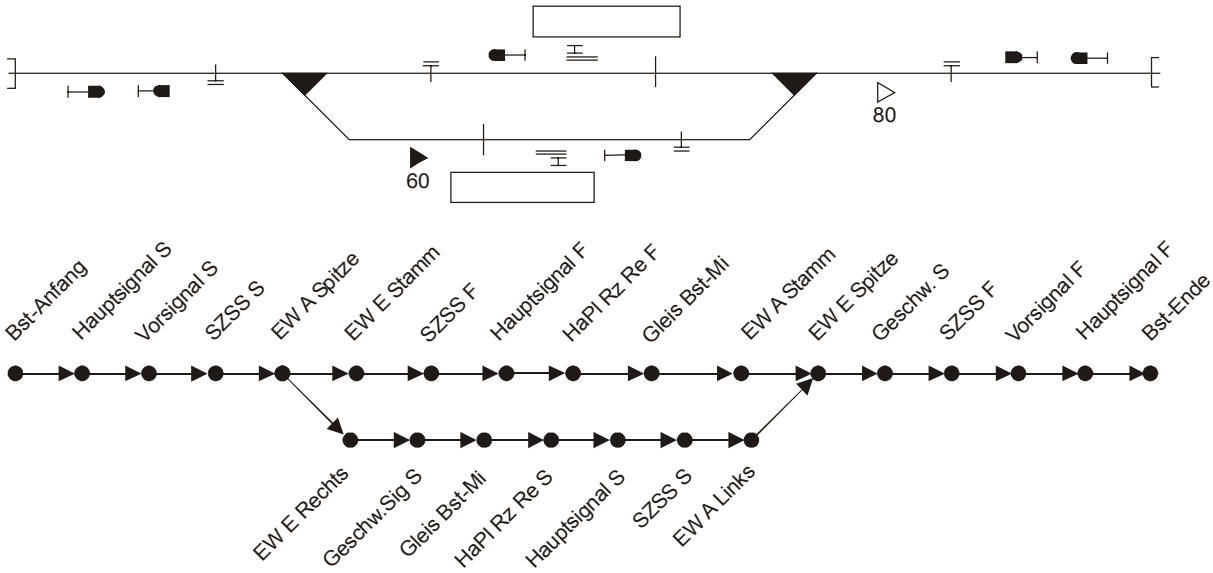


**Abb. 8: Spurplan-Graph eines einfachen Kreuzungsbahnhofs**

Der Laufweg eines Zuges wird in FAKTUS als Folge von Betriebsstellenfahrwegen abgebildet, die die Fahrmöglichkeiten eines Zuges innerhalb einer Betriebsstelle auf der zugrunde liegenden Infrastruktur beschreiben. Bei der Ermittlung der Fahrzeiten mit dem $\Delta v$-Schritt-Verfahren müssen neben der befahrenen Infrastruktur auch die technischen Daten von Triebfahrzeug und Wagenzug berücksichtigt werden. Aufbauend auf den Fahrzeiten können dann die Sperr- bzw. Belegungszeiten ermittelt werden.

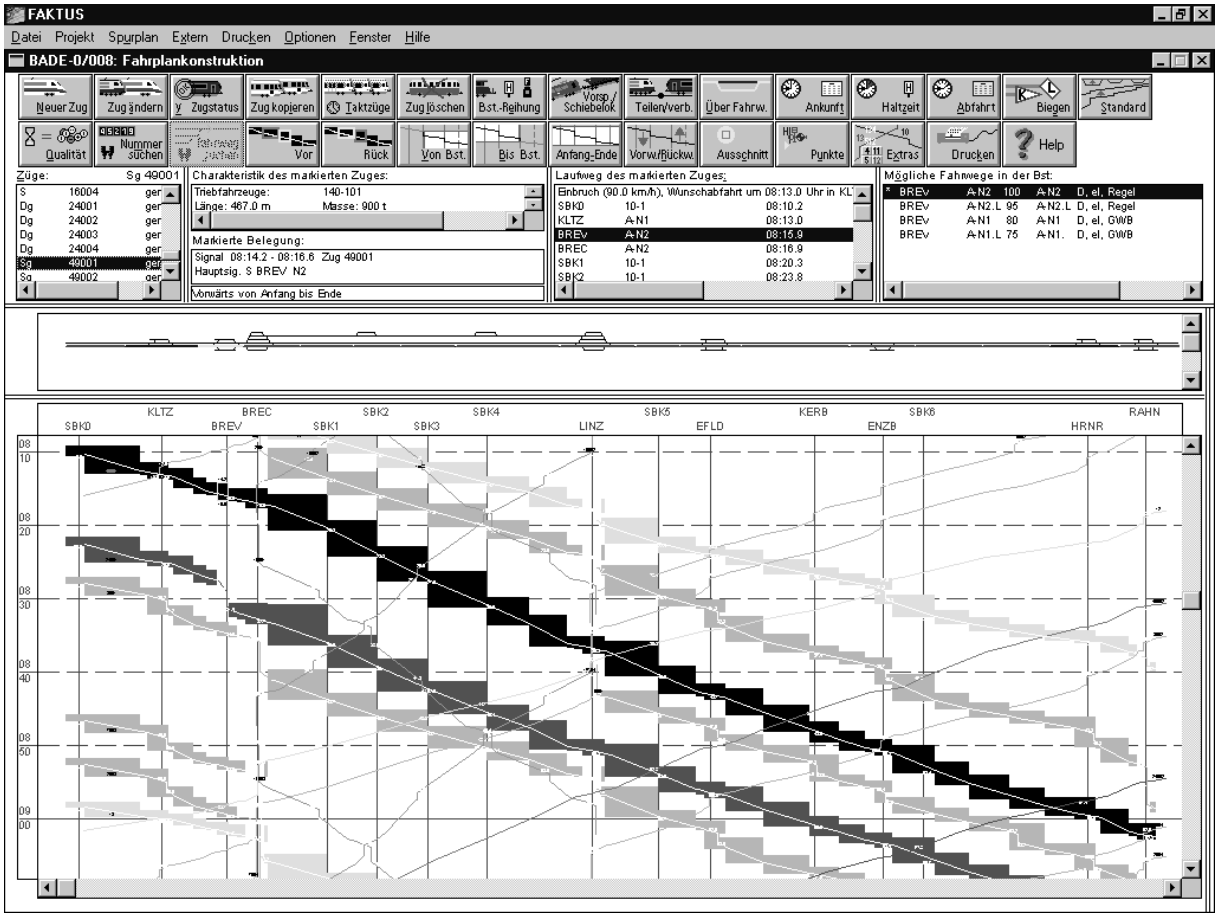


**Abb. 9: Interaktive Fahrplankonstruktion mit FAKTUS**

Der zentrale Teil von FAKTUS ist die in Abb. 9 dargestellte Benutzeroberfläche für die interaktive Trassenkonstruktion. Der Verlauf der einzelnen Zugtrassen wird analog zur manuellen Fahrplanbearbeitung in einem Zeit-Weg-Diagramm dargestellt. Das Bild enthält als Grundraster ein Streckenband mit schematischer Darstellung der Infrastruktur und des Laufweges der aktuellen Trasse sowie die Zeitachse.

Die Trassen sind als Sperrzeitentreppen, entsprechend der jeweiligen Zugfamilie farblich gekennzeichnet, dargestellt. Die erkannten Konflikte werden farblich hervorgehoben und können von dem Bearbeiter mit Hilfe unterschiedlicher „Manipulationen“, wie dem Verschieben der Trasse oder dem Verändern der Haltesituation oder des Laufwegs, interaktiv gelöst werden. Nach jeder Änderung einer Zugtrasse werden die zugehörigen Fahr- und Belegungszeiten aktualisiert. Darauf aufbauend werden die Konflikte neu berechnet und die resultierende Situation am Bildschirm dargestellt.

Zur Beurteilung des konstruierten Fahrplans berechnet FAKTUS zusätzlich Kennwerte für die einzelnen Trassen. Hierzu zählen die minimalen Pufferzeiten nach oben

und unten, die planmäßigen Wartezeiten und der realisierte Beförderungszeitquotient.

### 3.2.4 Datenverarbeitung im Trassenmanagement (DaViT)

Im Rahmen des Projektes RUT wurde FAKTUS durch konkrete Anregungen potentieller Anwender konsolidiert und als RUT-0 zur Einsatzreife gebracht. Der Jahresfahrplan 1998/99 der DB AG wurde mit diesem System erstmalig flächendeckend rechnerunterstützt erarbeitet [Sa99]. Bei RUT-0 handelt es sich um ein Einzelplatzsystem, das Infrastruktur- und Fahrplandaten lokal bearbeitet. Um dennoch eine parallele Bearbeitung durch mehrere Bearbeiter zu ermöglichen, wurde das Gleisnetz in Bearbeitungsbereiche aufgeteilt, die sich analog zu den Bildfahrplanblättern an den Strecken orientieren.

Die Geschäftsprozesse im Trassenmanagement[4] der DB Netz AG sollen im Rahmen des Projektes DaViT (Datenverarbeitung im Trassenmanagement) durch neue DV-Systeme weiter unterstützt werden. Ein zentraler Bestandteil von DaViT ist die Gemeinsame Fahrplandatenhaltung (GFD), die als zentrale Datenbank sowohl die Ausgangs- als auch die Ergebnisdaten aufnimmt. Sie dient insbesondere als Ausgangsstelle für die Lieferung von Fahrplandaten an eine Reihe weiterer DV-Systeme über eine einheitliche Schnittstelle („normierte Schnittstelle“, NSS) [Jäg93]. Beispielhaft seien hier Betriebszentralen, Fahrplanauskunfts- und Abrechnungssysteme genannt.

RUT ist der Konstruktionsteil von DaViT. Die Konzepte aus FAKTUS wurden ergänzt um die Übernahme von Trassenbestelldaten aus der GFD und das Zurückschreiben von Trassenangeboten, d. h. vorläufigen oder endgültigen Konstruktionsergebnissen, in die GFD [Brü00]. Im Rahmen der Einführung der zentralen Datenbank GFD wurde in DaViT ein Redesign von RUT durchgeführt, das dieses zudem zu einem Mehrbenutzersystem erweitert. Hierdurch wird eine parallele Trassenvergabe ohne die Einschränkungen durch voneinander getrennte Bearbeitungsbereiche möglich.

[4] Der Begriff Trassenmanagement wird in dieser Arbeit in seinem engeren Sinne als konkrete Vergabe von Infrastrukturkapazität an Zugfahrten verstanden. DaViT verwaltet darüber hinaus auch Trassenbestellungen und stellt Veröffentlichungsinformationen bereit.

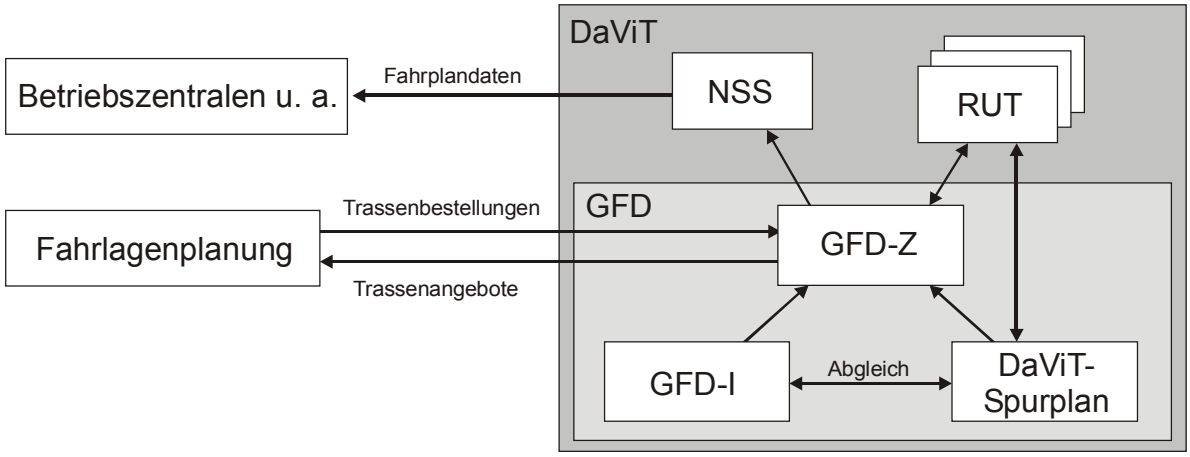


**Abb. 10: Grundkonzept von DaViT zur Erstellung von Jahresfahrplänen**

In Abb. 10 ist das von DaViT zu realisierende Grundkonzept zur Erstellung von Jahresfahrplänen dargestellt. Die aus der Fahrlagenplanung der Eisenbahnverkehrsunternehmen resultierenden Trassenbestellungen werden in der GFD abgelegt. Im Rahmen des Trassenmanagements werden mit RUT parallel auf mehreren Arbeitsplatzrechnern mögliche und schließlich die endgültigen Trassen ermittelt und in die GFD übertragen. Dabei werden die eigentlichen Zugdaten in der GFD-Z gespeichert. Zur Beschreibung der verwendeten Laufwege sind Verweise auf die Infrastrukturdaten der GFD-I erforderlich.

Ausgehend von der GFD können die konstruierten Trassen an weitere DV-Systeme weitergegeben werden. So dient die NSS dem Export fahrplanbezogener Daten an externe Systeme, wie beispielsweise die Betriebszentralen oder die Fahrplanauskunft. Aber auch innerhalb von DaViT existieren weitere, in der Abb. 10 nicht dargestellte Komponenten zur Weiterverarbeitung der in der GFD gespeicherten Daten. Diese dienen beispielsweise der Satzerstellung betrieblicher Fahrplanunterlagen oder dem Druck von Bildfahrplänen [BaBr99].

Die GFD beruht im Wesentlichen auf der streckenorientierten Datenmodellierung von TEFA. Der erste Ansatz, für RUT eine Infrastrukturbasis direkt aus den Daten der GFD-I zu generieren, war wegen der Komplexität der Umwandlungsfunktion zum Scheitern verurteilt [Brü00]. Daher wurde die GFD um einen eigenständigen DaViT-Spurplan erweitert, der wie der Spurplan-Graph von FAKTUS auf Zwischenweichenabschnitten basiert und somit die ideale Modellierung für die rechnergestützte Trassenvergabe mit RUT darstellt. Die konstruktionsrelevanten Infrastrukturdaten können nun aus den flächendeckend vorhandenen Spurplan-Graphen von FAKTUS importiert oder direkt in den DaViT-Spurplan eingegeben werden.

Trotz seiner detaillierten Modellierung kann der DaViT-Spurplan leicht um übergeordnete Informationen, wie den seit 1978 bei der DB für alle Infrastrukturdaten vorgeschriebenen Ordnungsrahmen, ergänzt werden. Dieser verwendet Streckennummern, Richtungskennzeichen und Kilometerangaben zur eindeutigen Bestimmung der vorhandenen Infrastrukturelemente [KuLa00]. Hierdurch wird der erforderliche Abgleich mit den entsprechenden Datensätzen der GFD-I stark vereinfacht.

Im Gegensatz zum FAKTUS-Spurplan ist der DaViT-Spurplan nicht in streckenbezogene Bearbeitungsbereiche aufgeteilt, sondern wird in den Niederlassungen der DB Netz AG erfasst und mit Hilfe der zugrunde liegenden Datenbank an die Zentrale und die anderen Niederlassungen verteilt, so dass ein konsistenter Spurplan-Graph des gesamtes DB-Netzes entsteht [Brü00]. Bei der Fahrplankonstruktion mit RUT kann der Bearbeiter den jeweils zu bearbeitenden Netzausschnitt flexibel festlegen und auf dieser Basis die vorhandene Infrastrukturkapazität an die einzelnen Züge vergeben.

### 3.2.5 TrainPlan

Das weltweit recht verbreitete Fahrplansystem TrainPlan wird bei VST ComrecoRail in England entwickelt [Tsch00]. Es basiert auf dem System ProTim der früheren British Rail Buisiness Group und wird beispielsweise von RailTrack, dem Betreiber der privatisierten britischen Eisenbahninfrastruktur, verwendet [Wei98].

Das Netz von RailTrack ist in 7 regionale Zonen aufgeteilt und wird von insgesamt 28 Eisenbahnverkehrsunternehmen zur Durchführung von Zugfahrten verwendet. Seit dem Sommerfahrplan 1999 wird TrainPlan bei RailTrack zur Fahrplankonstruktion eingesetzt [Tsch00]. Die regionalen Arbeitsplatzrechner der sieben Betriebszonen sind mit einem zentralen Datenbankserver verbunden. So hat jeder Fahrplankonstrukteur Zugriff auf den gesamten Datenbestand und kann auch Züge, die mehrere Zonen durchlaufen, problemlos planen. Zur interaktiven Bearbeitung existieren zwei Darstellungsarten für die Fahrpläne. Diese können wahlweise tabellarisch oder grafisch auf der Basis von Weg-Zeit-Linien angezeigt werden. Im Gegensatz zum deutschen Bildfahrplan wird die Strecke hierbei allerdings vertikal und der Zeitverlauf horizontal dargestellt.

Der Fahrplan wird auf der Grundlage der einzelnen Trassenbestellungen und der zu berücksichtigenden Infrastruktur interaktiv erstellt. Die Fahrzeiten werden nicht innerhalb des Systems berechnet, sondern beruhen auf Erfahrungswerten oder externen Fahrdynamikprogrammen. Hierdurch ist es möglich, die zugrunde liegende

Infrastruktur wesentlich einfacher zu modellieren. Allerdings ist es sehr aufwändig, für alle Zugkompositionen und möglichen Laufwege die exakten Fahrzeiten zu bestimmen und dem Planungssystem zur Verfügung zu stellen.

In TrainPlan ist eine Konflikterkennung integriert, die auf ebenfalls einzugebenden Mindestzugfolgezeiten beruht. Um Konflikte auch innerhalb von Knoten, Kreuzungen, Abzweigstellen und eingleisigen Strecken erkennen zu können, müssen zudem mögliche Behinderungen zwischen einzelnen Fahrwegen zusammen mit den resultierenden Behinderungszeiten in so genannten Behinderungstafeln dokumentiert werden.

Nach der Erstellung eines Fahrplans wird dieser auf vorhandene Konflikte untersucht. Der Anwender kann nun wählen, ob er die Konflikte nur angezeigt bekommen, Vorschläge zur Konfliktlösung erhalten oder die Konflikte automatisch gelöst haben möchte.

Die automatische Konfliktlösung beruht im Wesentlichen auf der zeitlichen Verschiebung einzelner Trassen, die Laufwege der Züge werden nicht geändert. Um auch Kreuzungskonflikte auf eingleisigen Strecken lösen zu können, existiert allerdings ein Verfahren, das mit verschiedenen Ansätzen optimale Kreuzungspositionen für die jeweiligen Züge ermittelt. Als Kriterien werden hierbei wahlweise FIFO[5], festgelegte Prioritäten oder die bisherigen planmäßigen Wartezeiten verwendet. Diese Art der Konflikte treten insbesondere bei der Fahrplanerstellung für lange eingleisige Strecken auf, wie sie im nordamerikanischen Güterverkehr und in Skandinavien die Regel sind.

Auf der Grundlage der automatischen Konfliktlösung ist das System auch in der Lage, für einen neu einzulegenden Zug automatisch eine konfliktfreie Trasse in einem bestehenden Fahrplan zu ermitteln. Hierdurch kann insbesondere das Einlegen zusätzlicher Züge für kurzfristige Verkehre des Güterverkehrs in bestehende Fahrpläne unterstützt werden [Gre00].

Die Systemfamilie von VST ComrecoRail zur Unterstützung der Planungsprozesse im Eisenbahnwesen enthält neben TrainPlan auch das Simulationssystem RailPlan und weitere Programme zur Berechnung der Fahrdynamik und zur Ressourcenplanung von Personal und Fahrzeugen. Zwischen den einzelnen Programmen ist ein direkter Datenaustausch möglich.

[5] FIFO bedeutet *first in first out*; die Ankunftszeit bestimmt die Reihenfolge.

### 3.2.6 SIMUPLAN, Fahrplankonstruktion mit SIMU++

Eine Aufgabe von Fahrplänen ist die Beschreibung des gewünschten Betriebsablaufs. Daher benötigen die im Kapitel 5.2 genauer vorgestellten Simulationsverfahren, die den Betriebsablauf nachvollziehen, Fahrpläne als eine wesentliche Eingabe. Es existieren unterschiedliche Methoden zur Fahrplaneingabe, die von der rein textuellen Erfassung vorhandener Fahrpläne bis zu eigenständigen Fahrplankonstruktionssystemen reichen.

Beispielweise wurde für das Simulationsverfahren SIMU VII ein eigenständiges Modul SIMUPLAN zur interaktiven Fahrplankonstruktion entwickelt [HöKlHa93]. Neben der Eingabe vorhandener Fahrpläne können hiermit interaktiv veränderte Simulationsfahrpläne erzeugt werden. Genau wie bei der Simulation mit SIMU VII werden allerdings auch bei der Fahrplankonstruktion die Züge in so genannten Modellzuggattungen zusammengefasst, die ähnliche fahrdynamische und betriebliche Kenngrößen besitzen. Die Modellierung der Infrastruktur beruht bei SIMU auf einem gerichteten Graphmodell mit attributierten Kanten. Aufbauend auf diesen Kanten werden das vorhandene Sicherungssystem modelliert und die Fahrmöglichkeiten bestimmt.

Die Fahrplankonstruktion basiert bei SIMUPLAN auf der Bearbeitung von Zeit-Weg-Linien. Die Sperrzeiten werden vereinfacht durch feste Beleg- und Räumzeiten angenähert. Die Konflikte werden durch Vergleich der Abfahrt- und Ankunftszeiten in den Bahnhöfen sowie durch einen relativ einfachen Vergleich der Zugtrassen ermittelt [Hau00]. Auf der Basis fester Beleg- und Räumzeiten ist keine exakte Konflikterkennung und damit keine verlässliche Fahrplankonstruktion möglich. Jeder konstruierte Fahrplan muss daher in einem speziellen Simulationslauf überprüft werden. Erhalten die Züge im Rahmen dieser Simulation, bei der keine externen Verspätungen eingespielt werden, Verspätungen, können diese nur auf Konflikten im Fahrplan beruhen, die manuell gelöst werden müssen.

Da mit diesem Ansatz keine verlässliche Fahrplankonstruktion möglich ist, wurde im Rahmen der Weiterentwicklung des Simulationsverfahrens SIMU zur Version SIMU++ auch die Fahrplankonstruktion neu konzipiert [Hau00]. Durch eine Ergänzung der Infrastrukturbasis um bislang fehlende Elemente des zugrunde liegenden Signalsystems können nun Sperrzeiten für die einzelnen Züge berechnet und Konflikte entsprechend erkannt werden. Dennoch wird der Bedeutung eines konfliktfreien Fahrplans bei den Entwicklern des Systems weiterhin ein geringer Stellenwert eingeräumt. So wird empfohlen, nach der Erstellung eines Fahrplans mit Hilfe eines Simulationslaufes zu entscheiden, welche Konflikte für den späteren Betrieb relevant

sind und welche aufgrund vorhandener Fahrzeitreserven ohne Verspätungsfortpflanzung abgebaut werden können [HaKaRa99]. Nur die Konflikte der ersten Kategorie seien in der Fahrplankonstruktion weiter zu beachten. Die in Kapitel 2.2 erläuterte Verwendung des Fahrplans als Rückfallebene bei Ausfall der Sicherungstechnik ist bei konfliktbehafteten Fahrplänen grundsätzlich nicht möglich. Zudem ist die Verwendung von Fahrzeitreserven im Rahmen der Überprüfung des Fahrplans nicht akzeptabel, da mit diesen Unregelmäßigkeiten des Betriebsablaufs und unterschiedliche äußere Rahmenbedingungen ausgeglichen werden sollen.

Zusätzlich zur Fahrplankonstruktion ist in SIMU++ auch eine automatische Trassensuche implementiert [Hau00]. Mit dieser kann für einen bestimmten Zug in einem bestehenden Fahrplan eine neue Trasse gesucht werden. Für den betrachteten Zug werden in einem vorbereitenden Schritt alle Fahr- und Belegungszeiten für Fahrten zwischen zwei Bahnhöfen berechnet. Mögliche außerplanmäßige Halte zur Konfliktlösung werden hierbei direkt berücksichtigt. Allerdings wird zwischen den Gleisen zweier aufeinanderfolgender Betriebsstellen ungeachtet vorhandener paralleler Fahrmöglichkeiten grundsätzlich nur ein Weg betrachtet. In einem weiteren vorbereitenden Schritt werden die möglichen Reihenfolgen der vom Zug zu durchfahrenen Betriebsstellen ermittelt, damit diese in einer Trassensuche fest sind. Durch die mögliche Kombination einzelner paralleler Teilwege müssen so schnell viele sukzessive Trassensuchen durchgeführt werden.

Dann wird für jede feste Betriebsstellenreihung ein Entscheidungsbaum erzeugt, der die dem Zug zur Verfügung stehenden Trassenvarianten enthält. Neben den vorberechneten Belegungszeiten für die einzelnen Teilstrecken werden auch zusätzliche Varianten mit sukzessive gesteigerten Fahrzeitzuschlägen berücksichtigt. Mit Hilfe eines Optimierungsverfahrens wird dann im Entscheidungsbaum unter Beachtung des zugrunde liegenden Fahrplans die konfliktfreie Trasse mit der kürzesten Beförderungszeit für den Zug ermittelt und dem Anwender vorgestellt.

Die automatische Trassensuche von SIMU++ ist insbesondere zur Realisierung einer Importschnittstelle zur Übernahme von Fahrplandaten aus anderen Systemen geeignet [Hau00].

### 3.2.7 Weitere Verfahren

Neben den bereits genauer erläuterten Verfahren zur rechnerunterstützten Fahrplankonstruktion existiert noch eine Reihe weiterer Ansätze. Für einfache Fälle werden beispielsweise nicht selten Tabellenkalkulationsprogramme unter Verwendung bekannter Fahrzeiten eingesetzt [Wei99].

Zudem existieren heute eine ganze Reihe von Programmen, mit denen das Erstellen von Bildfahrplänen am Bildschirm unterstützt wird. Ein Beispiel hierfür ist das Fahrplanbearbeitungssystem (FBS) des Institutes für Regional- und Fernverkehrsplanung [IRFP00]. Mit Hilfe vorgegebener oder auf der Basis vereinfachter Infrastrukturdaten berechneter Fahrzeiten für die eingegebenen Zugfahrten können mit dem Programmteil FPL komfortabel Bildfahrpläne gezeichnet werden. Konflikte zwischen sich folgenden Zügen berechnet das System auf der Basis vom Benutzer einzugebender, bahnhofsspezifischer Vor- und Nachbelegungszeiten. Für eingleisige Strecken können analog bahnhofs- und streckenspezifische Kreuzungszeiten eingegeben und so Konflikte zwischen sich kreuzenden Zugfahrten bestimmt werden. Eine Betrachtung unterschiedlicher Fahrwege und resultierender Konflikte in Bahnhöfen ist in FPL nicht möglich. Zum rechnergestützten Zeichnen der Zugbelegungen in Bahnhöfen dient der Programmteil BFO, der aber auch keine Fahrstraßenausschlüsse berücksichtigt. Trotz der eingeschränkten Funktionalität wird FBS zur Planung der Fahrlagen bei einigen privaten Eisenbahnverkehrsunternehmen eingesetzt. Die Erstellung eines kompletten Fahrplans ist aber nur bei sehr wenigen Zügen und einfacher Infrastruktur sinnvoll.

Zur rechnergestützten Entwicklung von Bahnhofsfahrordnungen unter Beachtung von Fahrstraßenausschlüssen wurde in der Schweiz das System AFAIG (*Affectation Automatique et Interactive des circulation dans les Gares*, zu deutsch: automatische und interaktive Bestimmung der Zugbewegungen in Bahnhöfen) entwickelt [Bou86]. Insbesondere für große Personenbahnhöfe können hiermit interaktiv die Gleisbelegungen und die von den Zügen zu verwendenden Fahrstraßen ermittelt werden. Die Fahrzeitrechnung und Konflikterkennung erfolgt automatisch, die Entscheidung über die zu verwendenden Fahrzeiten und -wege kann beim Bearbeiter verbleiben. Er soll so seine Erfahrung einbringen und schlecht quantifizierbare Ziele und Nebenbedingungen berücksichtigen können. In AFAIG existiert zudem ein komplementärer Modus, in dem ausgehend von einem festen Fahrplan die von den einzelnen Zügen zu verwendenden Fahrstraßen und Bahnsteiggleise mit Hilfe eines mathematischen Optimierungsverfahrens automatisch bestimmt werden können. Da die Rechenzeit des Verfahrens sehr schnell mit der Zahl der Züge ansteigt, ist es allerdings nicht

möglich, Fahrstraßen für eine große Zahl von Zügen in akzeptabler Zeit zu bestimmen [Bou86]. Der automatische und der manuelle Modus arbeiten komplementär, so dass es möglich ist, mit dem einen Vorgaben für den anderen Modus zu erstellen oder Ergebnisse weiter zu bearbeiten. Schließlich unterstützt das System den Anwender auch bei der Erstellung der gedruckten Bahnhofsfahrordnungen und ermittelt Kenngrößen, wie den Belegungsgrad der einzelnen Bahnsteiggleise.

Ein weiteres System zur interaktiven Erstellung von Fahrplänen ist Viriato [SMA99]. Die zugrunde liegende Infrastruktur ist nur sehr grob modelliert. Sie dient der Beschreibung der Betriebsstellen und der jeweiligen Zwischendistanzen. Es werden keine Fahrzeiten berechnet. Diese müssen zusammen mit anderen charakteristischen Werten bei der Definition der Zugfahrten eingegeben werden. Die Fahrplanbearbeitung geschieht interaktiv am Bildschirm. Von Viriato werden weder Zugfolgezeiten noch Fahrstraßenausschlüsse oder Kreuzungsprobleme auf eingleisigen Strecken berücksichtigt. Allerdings steht dem Anwender bei der Bearbeitung neben dem tabellarischen Fahrplan und dem Bildfahrplan zusätzlich noch die so genannte Netzgrafik zur Verfügung. In dieser sind die vorhandenen Bahnhöfe als Kästchen in einem zweidimensionalen Netz angeordnet. Die einzelnen Zugfahrten werden als farbige Linien dargestellt, die die durchfahrenen Bahnhöfe verbinden. Die Ankunfts- und Abfahrtzeiten der Züge sind an den Schnittpunkten von Linien und Kästchen vermerkt. Die Netzgrafik erlaubt eine übersichtliche Gestaltung von regelmäßigen Verkehren in kleineren Netzen. Viriato wird bei den Personenverkehrsgesellschaften der DB AG, einigen europäischen Eisenbahnen und mehreren Bestellerorganisationen des öffentlichen Nahverkehrs in Deutschland zur konzeptionellen Fahrlagenplanung eingesetzt.

Außer den bislang betrachteten Systemen zur interaktiven Fahrplanerstellung für den Schienenverkehr existieren auch intermodale Planungssysteme. So wurde ein Ansatz zur integrierten Planung des öffentlichen Personenverkehrs unter Berücksichtigung von Bussen und Zügen entwickelt [Fer99]. Das zugrunde liegende Konzept basiert auf der Netzplantechnik[6] und die Realisierung geschieht unter Verwendung entsprechender Standardsoftware, die über Programmierschnittstellen erweitert wurde. Die einzelnen Bus- und Zugfahrten werden in mehrere Vorgänge unterteilt, die die Fahrt durch jeweils einen Abschnitt beschreiben. Durch diese Modellierung ist die Verwendung des Projektplanungssystems MS-Project zur Fahrplankonstruktion

[6] Die Netzplantechnik ist ein Teilbereich des Operation Research, der sich mit der optimierten Planung von Projekten befasst. Die Projekte werden hierzu in Ereignisse und Vorgänge, die vorhandene Ressourcen zu ihrer Durchführung benötigen, unterteilt [Zim92].

möglich. Die Fahrzeiten der Busse müssen explizit eingegeben werden, die der Züge werden auf der Basis von Infrastruktur- und Fahrzeugdaten mit Hilfe der Tabellenkalkulation MS-Excel berechnet. Die Belegungen der Blöcke und der Fahrstraßen werden als Vorgänge innerhalb des Netzplanes aufgefasst und so in das Konzept integriert. Die Verwendung von Standardsoftware als Basis für ein Planungssystem erlaubt eine schnelle Implementierung durch Anpassung vorhandener Routinen. Durch den Einsatz einer allgemeinen Planungssoftware erscheint die zwangsweise übernommene kleinste Zeiteinheit von 1 Minute für den Bereich der Fahrplanerstellung im Schienenbahnwesen als sehr groß. Für die Planung eines intermodalen Fahrplans für den öffentlichen Personennahverkehr ist dies allerdings weniger schwerwiegend.

# 4 Automatische Fahrplanerstellung

Neben den Methoden zur rechnerunterstützten Fahrplankonstruktion existiert eine Reihe von Ansätzen, die Fahrplanerstellung vollständig zu automatisieren. Im Gegensatz zu vereinfachten Fahrplänen im Rahmen strategischer Planungen werden Jahresfahrpläne bislang nicht automatisch für komplexere Netze erstellt. Wesentliche Gründe sind hierbei die oft unterschätzte Komplexität der Aufgabenstellung und das Vertrauen der Bahnen in die Erfahrung und Kreativität der Fahrplanbearbeiter.

In diesem Kapitel werden die algorithmische Komplexität der automatischen Fahrplanerstellung diskutiert, die unterschiedlichen Ansätze erläutert und schließlich die heute schon in der Praxis verwendeten Verfahren vorgestellt.

## 4.1 Komplexität der automatischen Fahrplanerstellung

Damit die folgenden Ausführungen über die Komplexität der Berechenbarkeit von Fahrplänen auch ohne genauere Kenntnisse der theoretischen Informatik verständlich werden, sollen zunächst grundlegende Begriffe der Komplexitätstheorie ohne Verwendung formaler Beschreibungen skizziert werden. Eine Darstellung mit exakten Definitionen und Formeln kann der entsprechenden Fachliteratur der theoretischen Informatik entnommen werden ([HoUl00], [Schö01] u. a.).

### 4.1.1 Grundbegriffe der Komplexitätstheorie

In der Komplexitätstheorie, einem Teilgebiet der theoretischen Informatik, werden algorithmische Probleme entsprechend ihres Bedarfs an Berechnungsressourcen in Komplexitätsklassen eingeteilt [Schö01].

Viele algorithmische Probleme sind Entscheidungsprobleme oder können problemlos in solche transformiert werden. Unter einem Entscheidungsproblem versteht man hierbei eine Aufgabenstellung, die mit „Ja“ oder „Nein“ beantwortet werden kann. Von besonderer Bedeutung sind in der Komplexitätstheorie Entscheidungsprobleme, die zur Klasse der NP-Probleme gehören. Diese könnten von einer so genannten „nichtdeterministischen Turing-Maschine“ mit polynomialem Aufwand[7] gelöst werden. Bei dieser Maschine handelt es sich allerdings um ein theoretisches Gedankenmodell,

[7] Ein Algorithmus wird polynomial genannt, wenn die Anzahl der Rechenschritte durch ein Polynom in Abhängigkeit von der Länge der gegebenen Eingabe beschrieben werden kann.

das aufgrund des Nichtdeterminismus bei Entscheidungen die richtige Lösung raten kann und diese dann nur noch verifizieren muss.

Neben der Klasse der NP-Probleme gibt es auch die der P-Probleme. Diese können von einer deterministischen Turing-Maschine mit polynomialem Aufwand gelöst werden. Im Gegensatz zu NP kann ein Algorithmus aus P keine Lösung raten, sondern muss diese wie ein realer Computer selbständig ermitteln. Aufgrund des fehlenden Nichtdeterminismus und der Beschränkung der Rechenschritte durch ein Polynom werden entsprechende Algorithmen als effizient bezeichnet [Schö01]. Probleme dieser Klasse können also von Rechnern in akzeptabler Zeit gelöst werden.

Ein NP-Problem wird als NP-vollständig bezeichnet, wenn alle bekannten Probleme, die zur Klasse der NP-Probleme gehören, von einer deterministischen Turing-Maschine mit polynomialem Aufwand auf das betrachtete Problem reduziert werden können. Viele praxisrelevante Aufgabenstellungen, wie das *Traveling-Salesman*-Problem und das Erfüllbarkeitsproblem der Aussagenlogik, gehören zu dieser Klasse von Problemen. So soll beim *Traveling-Salesman*-Problem zu einer gegebenen Matrix von Entfernungen zwischen n Städten die Frage beantwortet werden, ob es eine Rundreise durch alle Städte gibt, die kürzer als eine vorgegebene Reiselänge ist.

Neben ihrer praktischen Bedeutung kommt den NP-vollständigen Problemen aber auch eine zentrale Rolle innerhalb der theoretischen Informatik zu. So wird als P-NP-Problem die theoretisch bedeutsame Frage bezeichnet, ob P identisch zu NP ist oder ob P eine echte Teilmenge von NP ist. Im ersten Fall würde zu jedem Problem, das von einer nicht-deterministischen Turing-Maschine mit polynomialem Aufwand gelöst werden kann, ein polynomialer, auf Nichtdeterminismus verzichtender Algorithmus für eine deterministische Turing-Maschine existieren. Aufgrund der Erfahrung und vieler gescheiterter Versuche das Gegenteil zu beweisen, wird seit langem allgemein davon ausgegangen, dass P und NP nicht identisch sind [Schö01]. Allerdings existiert hierfür bislang kein mathematisch exakter Beweis. Würde es gelingen, für ein beliebiges NP-vollständiges Problem einen polynomialen Algorithmus für eine deterministische Turing-Maschine zu finden, dann wäre diese Vermutung aufgrund der polynomialen Reduzierbarkeit aller anderen NP-Probleme direkt widerlegt. Da dies allerdings nicht zu erwarten ist, wird die Vermutung allgemein akzeptiert.

Die praktische Komplexität der NP-Probleme wird durch die auf jegliche Definition verzichtende Kernaussage deutlich, dass NP-Probleme zwar prinzipiell entscheidbar,

aber so schwierig sind, dass sie in ihrer vollen Allgemeinheit für alle praktischen Zwecke nicht auf einem Computer gelöst werden können [HoUl00].

### 4.1.2 Periodic Event Scheduling Problem (PESP)

Ein grundsätzliches Entscheidungsproblem, auf das sich eine ganze Reihe weiterer Arbeiten aus dem Bereich der automatischen Fahrplanerstellung beziehen, ist das *Periodic Event Scheduling Problem* (PESP), das erstmals 1989 beschrieben wurde [SeUk89]. Hier wird zu einer gegebenen Menge von periodischen Ereignissen mit einer gemeinsamen Periode eine eindeutige zeitliche Festlegung gesucht, die eine gegebene Menge von ebenfalls periodischen Bedingungen[8] zwischen den einzelnen Ereignissen erfüllt.

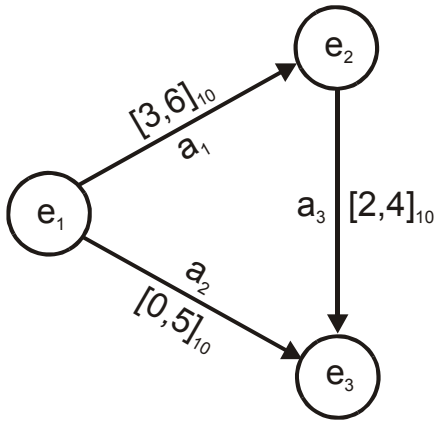


**Abb. 11: Grafische Darstellung eines einfachen PESP**

In Abb. 11 ist ein einfaches PESP als gerichteter Graph dargestellt. Die Knoten stellen die einzelnen periodischen Ereignisse ($e_1$, $e_2$, $e_3$) dar und die gerichteten Kanten ($a_1$, $a_2$, $a_3$) die zugehörigen Bedingungen. Das Entscheidungsproblem besteht nun in der Überprüfung, ob es eine zeitliche Festlegung für alle Ereignisse gibt, die alle vorhandenen Bedingungen unter Beachtung der Periode T = 10 erfüllt.

[8] Der Begriff „Bedingung“ steht in dieser Arbeit einheitlich für das in der englischen Fachliteratur verwendete „*constraint*“, das teilweise direkt ins Deutsche übernommen oder auch mit „Restriktion“ übersetzt wird.

Auf den jeweiligen Kanten ist der gerichtete zeitliche Abstand zwischen den zeitlichen Festlegungen zweier Ereignisse als geschlossenes Intervall angegeben. So verlangt beispielsweise die Bedingung $a_1$ die korrekte Erfüllung folgender Gleichung:

$$3 \le t(e_2) - t(e_1) + z \cdot 10 \le 6$$

Die Periodizität der Bedingung wird durch den dritten Summanden realisiert, wobei z eine beliebige ganze Zahl ist. Aufgrund der Periodizität der Ereignisse kann die Lösung natürlich modulo[9] der Periode T erfolgen. Eine mögliche Lösung des Problems ist

$$t(e_1) = 0, \quad t(e_2) = 3, \quad t(e_3) = 5$$

Neben Anwendungen aus dem Bereich des Flugverkehrs und der Steuerung von Lichtsignalanlagen für den Straßenverkehr werden mit dem PESP auch Fragestellungen aus dem Bereich der Fahrplanerstellung betrachtet [Odi98].

Die Übertragbarkeit des sehr allgemein formulierten Problems PESP für die automatische Erstellung von Taktfahrplänen wird deutlich, wenn man die periodischen Ereignisse als die Ankunfts- oder Abfahrtzeiten in Bahnhöfen betrachtet. Die gewünschten Fahrzeiten zwischen den Bahnhöfen, die einzuhaltenden Mindestzugfolgezeiten zwischen den Zügen und die zu realisierenden Anschlüsse in den Bahnhöfen können dann als die zugehörigen periodischen Bedingungen betrachtet werden.

Der Nachweis der Lösbarkeit eines PESP ist allerdings NP-vollständig, wie durch polynomiale Reduktion des NP-vollständigen Hamilton-Kreis-Problems[10] auf das PESP gezeigt werden kann [SeUk89]. Für die automatische Erstellung von Taktfahrplänen kann also kein effizientes Verfahren existieren, das für realistische Aufgabenstellungen in akzeptabler Zeit Lösungen liefert. Diese Aussage ist besonders erstaunlich, da das Problem schon dann gelöst ist, wenn eine beliebige Lösung gefunden werden konnte. Die Aufgabenstellung ist also auch ohne die Suche nach einer optimalen Lösung schon ausreichend schwer.

---

[9] Als „modulo“ wird in der Mathematik die Operation bezeichnet, die den Divisionsrest einer ganzzahligen Division berechnet.

[10] Das Hamilton-Kreis-Problem überprüft, ob in einem Graphen ein geschlossener Kantenzug existiert, der jeden Knoten genau einmal enthält.

### 4.1.3 Optimierungsprobleme

In der Komplexitätstheorie werden neben Entscheidungsproblemen auch Optimierungsprobleme betrachtet und in entsprechende Klassen eingeteilt. Allgemein versteht man unter einem Optimierungsproblem ein Problem, bei dem zu einer vorgegebenen Aufgabenstellung eine Lösung gefunden werden soll, die bei einer zuvor festgelegten Zielfunktion den maximalen (bzw. minimalen) Wert erreicht. Zielfunktionen beschreiben den Nutzen einer potentiellen Lösung und ermöglichen so Vergleiche.

Allerdings kann bei Optimierungsproblemen nicht so leicht wie bei Entscheidungsproblemen gezeigt werden, dass ein Problem in NP ist. Das Raten einer optimalen Lösung wäre durch den Nichtdeterminismus möglich, allerdings müssten für den Nachweis der maximalen Zielfunktion auch die anderen Lösungen bekannt sein. Daher wird bei der Definition der Komplexitätsklassen für Optimierungsprobleme ein direkter Zusammenhang zu denen der Entscheidungsprobleme hergestellt. Zu jedem Optimierungsproblem kann ein korrespondierendes Entscheidungsproblem konstruiert werden, indem nicht die Zielfunktion optimiert, sondern eine Lösung gesucht wird, bei der diese unter einem festzulegenden Wert ist. So wird ein Optimierungsproblem als NP-hart bezeichnet, wenn sein zugehöriges Entscheidungsproblem NP-vollständig ist [Bru01]. Durch die zusätzliche Optimierungsaufgabe steigt die Komplexität der Aufgabenstellung natürlich weiter an.

In Abb. 12 ist die Infrastruktur für eine grundlegende Optimierungsaufgabe aus dem Bereich des Fahrplanwesens dargestellt. Für diese in einer Richtung betriebene Strecke soll ein optimaler Fahrplan erzeugt werden. Der Startbahnhof A ist mit dem Zielbahnhof B über eine eingleisige Strecke mit m-1 Überholbahnhöfen verbunden, die jeweils eine beliebige, aber feste Anzahl von Überholungsgleisen besitzen.

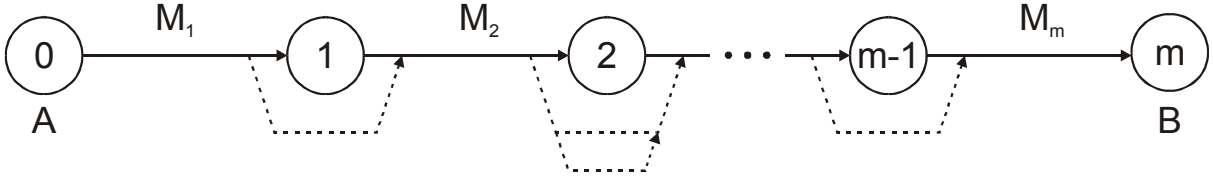


**Abb. 12: Infrastruktur für den Einrichtungsbetrieb (nach [BrHeHu00])**

Es sollen nun n Züge im Einrichtungsbetrieb vom Bahnhof A zum Bahnhof B fahren. Jedem Zug sind eine früheste Abfahrtzeit in A, eine späteste Ankunftszeit in B, feste Fahrzeiten für die einzelnen Abschnitte und ein Gewichtungsfaktor zugeordnet. Das Ziel ist es nun, die Abfahrtzeiten aller Züge so zu ermitteln, dass die geringste gewichtete Verspätungssumme auftritt. Hierbei müssen allerdings die Bedingungen

jedes Zuges beachtet und sichergestellt werden, dass jeder Abschnitt und jedes Überholungsgleis gleichzeitig von maximal einem Zug benutzt werden dürfen. Es kann gezeigt werden, dass dieses Optimierungsproblem NP-hart ist [BrHeHu00]. Das zugehörige Entscheidungsproblem, ob ein Fahrplan mit einer vorgegebenen Verspätungssumme existiert, ist damit NP-vollständig.

### 4.1.4 Exakte, heuristische und Approximations-Verfahren

Aufgrund der Komplexität der beschriebenen, grundlegenden Probleme aus dem Bereich des Fahrplanwesens wird deutlich, dass mathematisch exakte Methoden zur Erstellung von Fahrplänen für größere Anwendungsfälle nur bedingt geeignet sein können.

Dennoch kann man versuchen, für kleinere Anwendungsfälle mit entsprechenden Algorithmen Fahrpläne zu erzeugen. Die Laufzeit der resultierenden DV-Systeme wird immer verhältnismäßig hoch sein, da die Algorithmen genau genommen nie effizient sein können. So beruht ein entsprechendes Standard-Verfahren, das als *Branch-and-Bound* bezeichnet wird, auf der Grundidee, alle möglichen Lösungen in eine geeignete Reihenfolge zu bringen und diese dann systematisch zu durchsuchen. Natürlich können diese aufwändigen Algorithmen die gesuchte Lösung mit jeder neuen Rechnergeneration schneller finden. Aufgrund der NP-Vollständigkeit darf aber nicht erwartet werden, dass mit derartigen Ansätzen größere Aufgabenstellungen unter Beachtung aller notwendigen Rahmenbedingungen in akzeptabler Zeit gelöst werden. Allerdings gibt es auch in der Praxis isolierte Fragestellungen von einfacherer Struktur, die mit diesen exakten Verfahren sinnvoll behandelt werden können.

Bei NP-harten Optimierungsproblemen besteht die Möglichkeit, mit Hilfe heuristischer[11] Verfahren recht gute Lösungen in akzeptabler Zeit zu ermitteln. Heuristische Verfahren suchen bei der Ermittlung des Optimums nicht den gesamten Lösungsraum ab, sondern schließen zur Reduktion des Lösungsaufwandes Teile des Lösungsraumes von der Suche aus, ohne die Garantie zu bieten, dass in den ausgeschlossenen Teilen des Lösungsraumes nicht die eigentlich gesuchte Lösung ist [Zim92]. Die einzelnen Lösungsalternativen werden über die jeweilige Zielfunktion miteinander verglichen. Als Approximationsverfahren wird ein solcher Ansatz bezeichnet, wenn die maximale Abweichung der ermittelten Lösung von der optimalen

[11] Der Begriff „heuristisch“ kommt aus dem Griechischen und bedeutet soviel wie „zum Finden geeignet“ [Zim92].

exakt angegeben werden kann. Hierzu muss allerdings ein formaler Beweis geführt werden, in dem die Obergrenze für die, auf der Reduktion des betrachteten Lösungsraums beruhenden, Abweichung allgemein nachgewiesen wird. Da die Führung dieses formalen Beweises bei den meisten heuristischen Verfahren sehr schwierig ist, sind die resultierenden Abweichungen selten bekannt.

Im *Operations Research* wurden eine ganze Reihe heuristischer Standard-Verfahren entwickelt, die zur Verarbeitung ganz unterschiedlicher Aufgabenstellungen eingesetzt werden. Ist das Problem als lineares Programm formulierbar, können beispielsweise lineare Optimierungsverfahren eingesetzt werden. Ein anderer Ansatz besteht in der Verwendung kombinatorischer Optimierungsverfahren. Hier werden beispielsweise lokale Suchtechniken, wie *Iterative Improvement*, *Simulated Annealing* oder *Tabu Search* eingesetzt, die ausgehend von einer Startlösung versuchen, diese sukzessive zu verbessern. Für eine genaue Beschreibung dieser Verfahren sei auf die entsprechende Fachliteratur aus dem Bereich des *Operations Research* verwiesen ([Bru01], [Hro01], [Zim92], [Zim99] u. a.).

Nach den Erläuterungen zur Komplexität der automatischen Ermittlung konfliktfreier Fahrpläne und möglicher Problemlösungsstrategien werden im folgenden Abschnitt entsprechende Konzepte vorgestellt.

## 4.2 Konzepte zur automatischen Fahrplanerstellung

Aufgrund der praktischen Relevanz der Aufgabenstellung und einem allgemein empfundenen Handlungsbedarf existieren ungeachtet der algorithmischen Komplexität eine ganze Reihe unterschiedlicher Ansätze zur automatischen Fahrplanerstellung, die sich grob in zwei Kategorien einteilen lassen.

Zum einen existiert eine ganze Reihe von „mathematischen Verfahren“, die in einem ersten Schritt den zu erstellenden Fahrplan und die zu beachtenden Rahmenbedingungen in eine mathematische Notation überführen. Das so formulierte abstrakte Problem wird dann mit Hilfe bekannter mathematischer Standard-Verfahren gelöst. Zum anderen existieren „eisenbahnbetriebswissenschaftliche Verfahren“, die die Vorgehensweise der rechnergestützten Fahrplankonstruktion nachbilden und auf der Grundlage von Sperrzeitentreppen konfliktfreie Fahrpläne erzeugen. Im Anschluss werden Konzepte beider Kategorien vorgestellt.

Es soll an dieser Stelle allerdings nur auf Arbeiten eingegangen werden, die sich mit der automatischen Fahrplanerstellung beschäftigen. Ansätze zu anderen Fragestel-

lungen aus dem Bereich des Eisenbahnwesens, wie beispielsweise die Linienplanung oder die Umlaufplanung von Fahrzeugen, werden hier nicht betrachtet. Ein umfassender Überblick über mathematische Verfahren aus allen Bereichen des Eisenbahnwesens wird in mehreren Übersichtsartikeln gegeben ([BuWiZi97], [CoToVi98]).

### 4.2.1 Berechnung von Taktfahrplänen für den Personenverkehr

Eine ganze Reihe mathematischer Ansätze aus dem Bereich der Fahrplanerstellung basiert auf dem in Kapitel 4.1.2 eingeführten NP-vollständigen PESP [SeUk89]. Mit Hilfe der dort eingeführten periodischen Bedingungen können verschiedenste Zusammenhänge zwischen den Ankunfts- und Abfahrtzeiten der einzelnen Züge in Bahnhöfen beschrieben werden, die ein gesuchter Taktfahrplan erfüllen soll. Die von den Zügen verwendeten Fahrwege und die hieraus insbesondere in Bahnhöfen resultierenden Konflikte werden allerdings nicht betrachtet.

Das am CWI (*Centrum for Wiskunde en Informatica*) in Amsterdam entwickelte und auch kommerziell eingesetzte Verfahren CADANS (*Combinatorial Algebraic Timetable Algorithm for Dutch Railways*) verwendet periodische Bedingungen zur Spezifikation von Anforderungen aus unterschiedlichen Bereichen [Hoo95]:

- Infrastrukturbedingungen, die das Sicherungssystem über Mindestzugfolgezeiten abbilden
- Zugbedingungen, die die Fahrzeiten zwischen Bahnhöfen abbilden
- Marktbedingungen, die die erforderliche Frequenz der Züge einer Linie, ihre Haltestellen und Anschlüsse zwischen den einzelnen Linien abbilden

Die Menge aller zyklischen Bedingungen, die ein Taktfahrplan erfüllen soll, wird als Fahrplanstruktur bezeichnet. CADANS verwendet ein auf *Constraint Propagation*, *Branch-and-Bound* und kombinatorischen Methoden beruhendes Verfahren [Schr00], um einen alle Anforderungen erfüllenden Basisfahrplan zu finden. Gelingt dies nicht, wird eine minimale Menge von sich widersprechenden Bedingungen zurück geliefert.

In [Odi98] wird neben einem weiteren Algorithmus zur Lösung des PESP auch ein generisches Verfahren entwickelt, mit dem aus einer Fahrplanstruktur mehrere alternative Fahrpläne erzeugt werden können. Zudem wird ein alternativer Beweis zur NP-Vollständigkeit des PESP geliefert, der auf der polynomialen Reduktion des

Färbbarkeitsproblems[12] beruht. Dieser ist eleganter als der ursprüngliche, da die Periode T des verwendeten PESP nicht ein Ergebnis der Reduktion ist, sondern diese vom ganzzahligen Eingabeparameter des Färbbarkeitsproblems direkt bestimmt wird.

Das PESP kann um Prioritäten für die einzelnen Bedingungen erweitert werden. Hierdurch ist es möglich, bei sich nicht widersprechenden Bedingungen einen optimalen Fahrplan zu finden und ansonsten einen Fahrplan, der möglichst viele Bedingungen erfüllt [PeKr00]. Zur Lösung der resultierenden Optimierungsprobleme wird ein *Branch-and-Bound*-Verfahren vorgeschlagen.

Die unterschiedlichen mathematischen Verfahren zur Lösung des PESP werden in [Lin00] vorgestellt, analysiert und mögliche Verbesserungen aufgezeigt. Zudem wird das PESP zu einem Optimierungsproblem erweitert, indem ein alle Bedingungen erfüllender Fahrplan gesucht wird, der zu den geringsten Kosten bei den einzusetzenden Fahrzeugen führt. Zur Lösung dieser Aufgabenstellung werden die bekannten Methoden des PESP angepasst. Abschließend werden die einzelnen Algorithmen bei der Lösung spezieller Instanzen beider Aufgabenstellungen anhand der benötigten Rechenzeit miteinander verglichen. Zum Testen wurden beispielsweise das deutsche InterCity- und das deutsche InterRegio-Netz verwendet. Grundsätzlich muss als erstes die Anzahl der zu betrachtenden Ereignisse und Bedingungen aufgrund von Symmetriebetrachtungen reduziert werden. Dennoch liefern viele Algorithmen innerhalb der mit 10 Stunden Rechenzeit gesetzten Schranke kein Ergebnis für die betrachtete Aufgabenstellung. Überraschenderweise gibt es sogar verhältnismäßig kleine PESP-Aufgaben, deren Lösbarkeit unabhängig von jeglicher Zeitschranke noch nicht bekannt ist. Es wird zudem deutlich, dass die Rechenzeit sehr stark mit der Anzahl der geforderten Anschlussbedingungen steigt. Für praktische Anwendungen wird die Aufteilung der betrachteten Netze in kleinere Einheiten vorgeschlagen.

### 4.2.2 Fahrplanoptimierung basierend auf der Linienplanung

Für eine realistische Fahrlagenplanung muss neben der Berücksichtigung der Nachfrage der potentiellen Kunden eines Eisenbahnverkehrsunternehmens auch die Infrastruktur des Eisenbahnnetzes berücksichtigt werden. Das zur Fahrlagenplanung

[12] Das Färbbarkeitsproblem überprüft, ob die Knoten eines Graphen mit einer vorgegebenen Anzahl von Farben so eingefärbt werden können, dass benachbarte Knoten des Graphen nie dieselbe Farbe besitzen.

im Personenverkehr verbreitete Linienplanungssystem PROLOP (Programmsystem zur Linienplanung und Belastungssimulation) modelliert die Infrastruktur als grobes Netz von Strecken und Bahnhöfen mit den dazugehörigen Entfernungen und Fahrzeiten zwischen den Bahnhöfen [BoOl94]. Um ausgehend von einer Linienplanung stabile Fahrlagen ermitteln zu können, muss die zugrunde liegende Infrastruktur genauer betrachtet werden. Aus Komplexitätsgründen ist dies innerhalb von PROLOP nicht möglich, weshalb ein zweistufiges Vorgehen verwendet wird. Ausgehend von den Ergebnissen der Linienplanung mit PROLOP wird für die Züge des zu planenden Zugsystems mit dem neuen Verfahren ein Fahrplan konstruiert, bei dem neben den Fahrzeiten auch Mindestzugfolgezeiten, Mindestwendezeiten, Gleisbelegungen in Bahnhöfen und Fahrstraßenkonflikte, allerdings nur bei Abzweigstellen, berücksichtigt werden [Kri96]. Wechselwirkungen mit Zugfahrten außerhalb des betrachteten Liniensystems werden hier nicht berücksichtigt und bleiben dem Trassenmanagement vorbehalten. Die automatische Erstellung eines Fahrplans dient hier dem Nachweis der Durchführbarkeit der Linienplanung auf der zugrunde liegenden Infrastruktur.

Zur automatischen Erstellung dieses Fahrplans erzeugt das neue Verfahren analog zur Vorgehensweise in PROLOP aus allen vorhandenen Bedingungen ein lineares Programm, das dann mit Hilfe eines verbreiteten Optimierungswerkzeugs gelöst wird. Als Zielfunktion wird hierbei die Summe der Wartezeiten aller Umsteiger zwischen den Zuglinien, die auch als Synchronzeiten bezeichnet werden, verwendet. Die Anzahl der Umsteiger wird in PROLOP grundsätzlich ermittelt und steht daher zur Verfügung. Aufgrund der tatsächlichen Lagen der Züge und den sich so ergebenden Umsteigerströmen kann nun wiederum eine verbesserte Linienplanung mit PROLOP durchgeführt werden. Dieser iterative Prozess kann beendet werden, wenn sich die Lage der einzelnen Linien nicht mehr verändert.

Im Rahmen des Trassenmanagements kann auf die Erstellung eines eigenständigen Fahrplans nur dann verzichtet werden, wenn neben dem geplanten Zugsystem keine weiteren Züge verkehren und in den Bahnhöfen keine Fahrstraßenkonflikte auftreten können. Ansonsten muss im Rahmen des Trassenmanagements ein konfliktfreier Fahrplan erstellt werden, der auf den Fahrplanungen der einzelnen Betreiber aufbaut. Ob Veränderungen an den einzelnen Wunschtrassen notwendig sind, hängt neben der Güte der Planungen natürlich auch wesentlich von der Konkurrenzsituation der konkreten Wunschtrassen und den zugehörigen Prioritäten ab.

### 4.2.3 Ermittlung konfliktfreier Bahnhofsfahrordnungen

Die bisher vorgestellten Verfahren legen im Wesentlichen die Ankunfts- und Abfahrtzeiten der Züge in den einzelnen Bahnhöfen fest. Analog zur Erstellung von Bildfahrplänen wird nicht betrachtet, welche Fahrwege die Züge in den einzelnen Bahnhöfen verwenden. So werden die tatsächlich vorhandenen Fahrstraßen beispielsweise in den verbreiteten PESP-Modellen überhaupt nicht berücksichtigt. Daher existieren auch Verfahren, die der Erstellung einer Bahnhofsfahrordnung auf der Grundlage eines gegebenen Bildfahrplans dienen und somit einen Bahnhof losgelöst von dem restlichen Netz betrachten.

So überprüft das Verfahren STATIONS, ob in einem konkreten Bahnhof zu einem vorgegebenen Taktfahrplan eine konfliktfreie Bahnhofsfahrordnung konstruiert werden kann [Zwa96]. Die einzelnen Zugfahrten werden über die gewünschten Verbindungen zum umgebenden Streckennetz und die geplanten Ankunfts- und Abfahrtzeiten am Bahnsteig festgelegt. Dies geschieht mit Hilfe von Intervallen, damit STATIONS zulässige Verschiebungen dieser Zeiten im übergeordneten Bildfahrplan berücksichtigen kann. Die Infrastruktur des betrachteten Bahnhofs wird anhand der vorhandenen Fahrstraßen definiert. Damit keine Konflikte zwischen Zugfahrten existieren, werden Mengen definiert, die zulässige Kombinationen von Fahrten jeweils zweier Züge beschreiben. Eine Fahrt wird dabei als Kombination von gewählter Fahrstraße und zeitlicher Verschiebung zur ursprünglichen Planung beschrieben. Durch diese sehr allgemeine Formulierung können sicherungstechnische Abhängigkeiten, gewünschte Bahnsteiggleise und auch Zugtrennungen und -vereinigungen modelliert werden.

Mit Hilfe binärer Entscheidungsvariablen, die die Verwendung der einzelnen Fahrten durch die Züge beschreiben, wird das zu lösende Problem als lineares ganzzahliges Optimierungsproblem formuliert. Gesucht ist die maximale Anzahl von Zügen, die unter Berücksichtigung der externen Vorgaben und der vorhandenen Fahrstraßen und Sicherungstechnik zu einer konfliktfreien Bahnhofsfahrordnung führt. Wenn keine konfliktfreie Bahnhofsfahrordnung möglich ist, wird durch die Formulierung als Optimierungsproblems gewährleistet, dass STATIONS die minimale Anzahl von Zügen ermittelt, deren Zeitlagen angepasst werden müssen.

Durch Reduktion des Erfüllbarkeitsproblems der Aussagenlogik[13] kann gezeigt werden, dass die Überprüfung dieser Anforderungen NP-vollständig ist, wenn für

[13] Das Erfüllbarkeitsproblem der Aussagenlogik überprüft, ob eine Formel aus der Aussagenlogik durch eine entsprechende Belegung der vorhandenen Variablen erfüllt werden kann.

jeden Zug mindestens 3 Fahrwege zur Verfügung stehen [Zwa96]. In STATIONS wird daher ein heuristisches Verfahren verwendet, das nach der aufwändigen Erzeugung der zulässigen Fahrstraßenkombinationen eine Anfangslösung sucht und ausgehend von dieser mit einem *Branch-and-Cut*-Verfahren versucht, eine optimale Lösung zu finden. Es hat sich gezeigt, dass dieses in vielen praktischen Fällen möglich ist.

### 4.2.4 Automatische Fahrplanerstellung für Güterverkehrsnetze

Neben den insbesondere bei den europäischen Staatsbahnen im 19. und 20. Jahrhundert entstandenen Mischverkehrsnetzen existieren weltweit auch Güterverkehrsnetze. So gibt es in Deutschland bei großen Industrie-, Chemie- und Bergbauunternehmen für den innerbetrieblichen Transport Werksbahnen und in Häfen entsprechende Hafenbahnen, die zum Teil beachtliche Streckennetze von mehreren Hundert Kilometern Streckenlänge betreiben. In Nordamerika und Australien existieren sogar Güterverkehrsnetze von vielen Tausend Kilometern Streckenlänge, bei denen die weit entfernt liegenden Knotenbahnhöfe im Allgemeinen durch in beide Richtungen betriebene eingleisige Strecken miteinander verbunden sind.

Aufgrund der bei einigen Güterverkehren geringen Relevanz verlässlicher Ankunftszeiten und des zum Teil innerbetrieblichen Charakters erfolgt der Betrieb bei einer Reihe von Güterverkehrsnetzen nicht auf der Basis eines zuvor im Detail ausgearbeiteten Fahrplans. Bei diesen Bahnen wird im Rahmen einer strategischen Fahrplanung allein aufgrund der vorhandenen Verkehrsnachfrage ohne Berücksichtigung anderer Züge und der vorhandenen Infrastruktur über den Einsatz von Zügen entschieden. Erst im Rahmen der Betriebsdisposition[14] werden die verkehrenden Züge koordiniert. Bei diesem flexiblen Betriebsverfahren kann es aufgrund der fehlenden Abstimmung in einer Planungsphase zu großen Wartezeiten während der Transportdurchführung kommen. Entsprechend können die Verkehrskunden auch nur vage Auskünfte über die zu erwartende Ankunft eines nachgefragten Transportgutes erhalten. Aufgrund der in den letzten Jahren weltweit auch im Güterverkehr gestiegenen Anforderungen der Verkehrsmärkte an verlässliche Ankunftszeiten ist diese Betriebsform insbesondere für überbetriebliche Verkehre nicht mehr marktgerecht, und die entsprechenden Bahnen müssen zu einem stärker geplanten Betriebsablauf übergehen.

[14] Die Betriebsdisposition wird im Zusammenhang mit den Simulationsverfahren in Kapitel 5.2.2 umfassend erläutert. Ihre primäre Aufgabe besteht in der Behandlung von Unregelmäßigkeiten.

Zur Verbesserung der Planungsprozesse dieser Güterbahnen wurde unter Berücksichtigung der bisherigen Abläufe das Verfahren SCAN I konzipiert [JoHa91]. Dieses überprüft ausgehend von einem durch die strategische Fahrplanung vorgegebenen Zugprogramm mit Ankunfts- und Abfahrtzeiten in den Knotenbahnhöfen, ob ein optimales Dispositionssystem bei pünktlich beginnenden Zügen einen unbehinderten Betrieb zwischen jeweils zwei Knotenbahnhöfen realisieren könnte. Nur wenn es gelingt, entsprechend der vorhandenen Rahmenbedingungen einen behinderungsfreien Fahrplan zu erstellen, ist die Machbarkeit der strategischen Vorgaben gegeben und somit qualitätsgesichert. Zur Lösung dieser Fragestellung werden ausgehend von den ein- und zweigleisigen Streckenabschnitten und den vorhandenen Wartepositionen alle möglichen Überholungs- und Kreuzungskombinationen der auf dieser Verbindungsstrecke verkehrenden Züge betrachtet. Nur wenn eine *Branch-and-Bound*-Methode in der Menge aller möglichen Kombinationen unter Berücksichtigung der Fahr- und Mindestzugfolgezeiten der Züge mindestens eine Kombination von Überholungen und Kreuzungen finden kann, die weder zu einer Blockierung noch zu einem Zugfolgekonflikt oder einer zu großen Planabweichung führt, kann die vorgegebene strategische Fahrplanung überhaupt realisiert werden. Zur Beurteilung der Stabilität dieser Fahrplanung wird zudem die Wahrscheinlichkeit berechnet, dass bei zufällig verlängerten Fahrzeiten die Realisierbarkeit erhalten bleibt. Anhand konkreter Aufzeichnungen einer nordamerikanischen Güterbahn konnte gezeigt werden, dass die Vorgaben der strategischen Fahrplanung in der Praxis nicht immer von den Dispositionssystemen zu realisieren waren. Das jeweilige Zugprogramm hätte entsprechend angepasst werden müssen.

Aufbauend auf den Ansätzen von SCAN I zur Verbesserung des Planungsprozesses bei großen Güterbahnen wurde ein weiteres mathematisches Verfahren entwickelt, das die von autarken Streckendispositionssystemen überwachten Strecken eines Güterverkehrsnetzes miteinander verknüpft [KrHa95]. Ziel ist es, ausgehend von einer strategischen Fahrplanung und einer aktuellen Verspätungslage, die neuen Ankunftszeiten der Züge in den Knotenbahnhöfen zu ermitteln, damit den vorhandenen Streckendispositionssystemen bei einem gestörtem Betriebsablauf die zu erwartenden Ankunftszeiten der Züge auch in Bereichen ohne Zugortung zur Verfügung stehen. Aufgrund der beabsichtigten Kopplung mit realen Dispositionssystemen und den resultierenden Zeitanforderungen wird der netzweite Zugbetrieb bei diesem Ansatz nur vereinfacht modelliert. So können die Laufwege der Züge durch das Netz nicht verändert werden und die Infrastruktur der Knotenbahnhöfe wird nicht betrachtet. Trotzdem sind die resultierenden Laufzeiten der zur Lösung eingesetzten zweistufigen Heuristik so hoch, dass die angestrebte Kopplung mit realen Dispositionssystemen bislang noch ausscheidet.

Die in diesem Abschnitt beschriebenen mathematischen Verfahren dienen einer Verbesserung der Planung und Disposition in großen Güterverkehrsnetzen. Zu diesem Zweck führen sie auf mathematischem Weg eine automatische Fahrplanung für Strecken und Netze unter Berücksichtigung spezieller Rahmenbedingungen durch, die für europäische Verhältnisse nur bedingt akzeptabel sind. Insbesondere wird eine grobe Fahrplanung vorausgesetzt, die Laufwege der Züge können nicht verändert werden und die Aufnahmefähigkeit der Knotenbahnhöfe wird nicht berücksichtigt.

### 4.2.5 Fahrplanberechnung mit Berücksichtigung der Fahrwegwahl

Natürlich existieren auch mathematische Ansätze zur Berechnung von Fahrplänen, die neben der zeitlichen Lage der Züge auch die verwendeten Fahrwege betrachten und hierbei nicht auf einen Bahnhof beschränkt sind.

Ein entsprechendes Verfahren für eine Strecke im Einrichtungsbetrieb wurde schon in Kapitel 4.1.3 vorgestellt. Als Lösungsraum werden Folgen von Permutationen verwendet, die die durch die Infrastruktur realisierbaren Reihenfolgen der Zugfahrten im jeweiligen Abschnitt repräsentieren [BrHeHu00]. Mit Hilfe eines heuristischen Verfahrens auf der Basis einer lokalen Suche wird das Optimierungsproblem, einen Fahrplan mit möglichst geringen, gewichteten Wartezeiten zu erzeugen, dann gelöst.

Daneben existieren Ansätze, die lange, in beide Richtungen betriebene, eingleisige Strecken mit Überholungsbahnhöfen betrachten, wie sie weltweit typisch für die Anbindung von Bergbaubetrieben an zugehörige Verladehäfen sind. So wurde ein effizienter Algorithmus zur Bestimmung entsprechender Fahrpläne entwickelt, der eine aus der manuellen Fahrplankonstruktion stammende Heuristik verwendet [CaGo94]. Alle Züge starten in der betrachteten Problemstellung an einem Endbahnhof und fahren zu dem anderen. Nur die Endbahnhöfe besitzen mehr als ein Überholungsgleis. Jedes Bahnhofsgleis und jeder Streckenabschnitt können nur von einem Zug gleichzeitig verwendet werden. Als Zielfunktion wird eine Kostenfunktion für die zusätzlich erforderlichen Zwischenhalte verwendet, die auf der erforderlichen Wartezeit aufbaut. Als Lösung wird ein zulässiger Fahrplan gesucht, der als binärer Vektor kodiert ist und so die Verwendung der Überholungsgleise durch die einzelnen Züge beschreibt. Durch Reduktion des NP-vollständigen Rucksack-Problems[15] kann gezeigt werden, dass die Berechnung eines zulässigen Fahrplans unter den gegebe-

[15] Als Rucksack-Problem wird die Frage bezeichnet, ob zu einer gegebenen Menge von natürlichen Zahlen eine Teilmenge existiert, deren Summe eine vorgegebene Zahl ergibt.

nen Bedingungen NP-vollständig ist. Daher werden die Elemente des binären Vektors bei der Lösung nicht gemeinsam bestimmt, stattdessen wird ein heuristisches Verfahren verwendet, das gleichzeitig nur einen Zug und seine möglichen Konflikte betrachtet. Die einzelnen Konflikte werden in ihrer zeitlichen Reihenfolge bearbeitet. Liegt ein Konflikt vor, werden analog zur manuellen Fahrplankonstruktion lokale Möglichkeiten zur Lösung des Konflikts mit Hilfe der Überholungsbahnhöfe berechnet und über die entstandenen Wartezeiten bewertet. Die beste Lösung wird gewählt und der nächste Konflikt betrachtet. Die Elemente des binären Lösungsvektors werden also sukzessive bestimmt. Dieser heuristische Algorithmus arbeitet polynomial und liefert schnell eine mögliche Lösung, kann aber naturgemäß keine Optimalität garantieren.

Durch die Verwendung von Ansätzen aus der manuellen Fahrplanbearbeitung wird das zu lösende Problem in entsprechende Teilprobleme zerlegt, die wesentlich leichter zu lösen sind. Die Struktur des zugrunde liegenden Problems wird hierdurch bei der Ermittlung der Lösung explizit berücksichtigt. Der Einsatz der mathematischen Methoden erfolgt so erst auf der Ebene der Teilprobleme. Im Gegensatz dazu betrachten die bisher vorgestellten heuristischen Verfahren den gesamten Lösungsraum und verwenden Heuristiken, um in diesem möglichst effizient ein Optimum zu finden. Bei der Verwendung entsprechender Dekompositionen muss allerdings berücksichtigt werden, dass hierdurch starker Einfluss auf den betrachteten Lösungsraum genommen wird.

Der Einsatz entsprechender Dekompositionen ist für Ansätze, bei denen die betrachtete Infrastruktur frei definiert werden kann, noch wichtiger, da die Komplexität der Aufgabenstellung weiter ansteigt. Andererseits können so nicht nur eingleisige Strecken oder Strecken im Einrichtungsbetrieb, sondern beliebige Netzteile betrachtet werden. Es kann leicht gezeigt werden, dass die Rechenzeit zur Erstellung eines entsprechenden Fahrplans unter Beachtung der gewählten Routen im Netz und in den Bahnhöfen ohne Dekomposition des Problems schon bei wenigen Zügen in kleineren Netzteilen zu nicht akzeptablen Rechenzeiten führt [Car94]. Daher werden auch hier Ansätze zur Dekomposition, die sich an der manuellen Fahrplankonstruktion orientieren, eingesetzt. In diesem Ansatz werden die einzelnen Züge sukzessive über ihren gesamten Laufweg eingelegt und die jeweils entstehenden Konflikte direkt gelöst. Die Reihenfolge bereits eingelegter Züge wird bei der Lösung der entstehenden Konflikte grundsätzlich beibehalten. Zudem sind nur beschränkte Zeitbereiche für jeden Zug zulässig. Bei der Lösung eines aufgetretenen Teilproblems werden analog zur manuellen Vorgehensweise die einzelnen Streckenabschnitte des Netzes in der Reihenfolge betrachtet, in der der Zug sie befahren kann. Hierdurch können

Wege, die der Zug nicht verwenden kann, möglichst früh erkannt und die entsprechende Suche abgebrochen werden. Gerade diese auf den ersten Blick naheliegende Vorgehensweise kann nicht direkt in die mathematische Problemdefinition aufgenommen werden und muss daher durch einen speziellen Problemlöser realisiert werden. Das Laufzeitverhalten kann durch die Verwendung eines entsprechenden individuellen Problemlösers signifikant gesenkt werden.

### 4.2.6 Sperrzeitenbasierter Ansätze

Neben den bislang vorgestellten, eher mathematisch orientierten Verfahren existieren auch Ansätze zur automatischen Erstellung von Fahrplänen, die auf der Verwendung von Sperrzeitentreppen beruhen. Genau wie die entsprechenden Verfahren zur rechnergestützten Fahrplanbearbeitung erstellen diese unter Beachtung der exakten Belegungszeiten der einzelnen Infrastrukturelemente wahre Fahrpläne. Die vorhandenen Kapazitäten von Bahnhöfen und Strecken können so gemeinsam berücksichtigt werden.

Das den sperrzeitenbasierten Ansätzen zugrunde liegende Konzept wurde zunächst für die Simulation der Fahrplanerstellung auf dreigleisigen Strecken entwickelt und ist auch Grundlage der zugehörigen Simulation der Betriebsabwicklung [Put81]. Später wurde es für die Betrachtung komplexer Teilnetze mit beliebigen Bahnhofs- und Streckentopologien erweitert [Schu85].

Die schon im letzten Abschnitt beschriebene Vorgehensweise zur Dekomposition der Aufgabenstellung unter Verwendung von Ansätzen aus der manuellen Fahrplanerstellung wird durch die sperrzeitenbasierten Ansätze noch einen Schritt weiter geführt. Durch die Verwendung der Sperrzeitentreppen können die einzelnen Belegungen der Infrastrukturelemente exakt berücksichtigt werden, ohne die durch die Zugfahrt gegebene Belegungsreihenfolge aufzugeben. Die Erstellung eines konfliktfreien Fahrplans wird so zu einem zweidimensionalen – unter Berücksichtigung alternativer Laufwege sogar zu einem dreidimensionalen – geometrischen Problem.

Zur Lösung werden zunächst unter Berücksichtigung alternativer Laufwege alle möglichen Sperrzeitentreppen der einzelnen Züge vorberechnet. In der eigentlichen Fahrplanerstellung werden die einzelnen Zugfahrten dann entsprechend einer vorgegebenen Rangordnung sukzessive in den Fahrplan eingelegt und die durch Sperrzeitenüberschneidung erkannten Konflikte direkt gelöst.

Bei der Konfliktlösung stehen grundsätzlich die gleichen Möglichkeiten wie bei der rechnerunterstützten Fahrplankonstruktion zur Verfügung. Dies sind im Wesentlichen die Wahl anderer Laufwege, die Verlängerung von Haltzeiten, die komplette Verschiebung von Zugfahrten oder die Einführung zusätzlicher Betriebshalte.

## 4.3 Verfahren zur automatischen Fahrplanerstellung

Wie im letzten Abschnitt gezeigt, existieren unterschiedliche Konzepte zur automatischen Erstellung von Fahrplänen. Dennoch werden nur wenige dieser Ansätze tatsächlich in der Praxis eingesetzt. Dies liegt zum Teil daran, dass in den meisten Konzepten nur Spezialfälle betrachtet werden, die in dieser Form in der Praxis selten auftreten oder auch ohne größeren Aufwand manuell gelöst werden können. Verfahren, die dagegen größere Netze betrachten und auch die Fahrwegwahl berücksichtigen, greifen zur Erzielung eines akzeptablen Laufzeitverhaltens auf einfache Heuristiken aus der manuellen Fahrplanbearbeitung zurück. Die Aussage aus dem Jahre 1975, dass Verfahren der mathematischen Optimierung bei dem Berechnen von Fahrplänen auf Grund des kombinatorischen Charakters der Aufgabe und den daraus resultierenden unverhältnismäßig hohen Rechenzeiten versagen und daher heuristische Ansätze verwendet werden müssen [PlVeSe75], ist also immer noch aktuell. Das ebenfalls beschriebene Problem der Definition einer mathematischen Zielfunktion, die die Belange der Fahrplankonstruktion korrekt abdeckt, konnte ebenfalls noch nicht gelöst werden.

Dennoch werden Verfahren zur automatischen Fahrplanerstellung schon heute in der Praxis eingesetzt. Allerdings nicht im Bereich des Trassenmanagements, sondern für besondere Aufgaben im Rahmen von übergeordneten Planungssystemen. Das niederländische Verfahren DONS zur Entscheidungsunterstützung bei der strategischen Infrastrukturplanung und die Verfahren zur Erzeugung von Fahrplänen im Rahmen eisenbahnbetriebswissenschaftlicher Untersuchungen werden im Folgenden vorgestellt.

### 4.3.1 Designer of Network Schedules (DONS)

Das Verfahren DONS (*Designer of Network Schedules*; früher: *Dienstregelingontwikkeling bij NS*; zu deutsch: Fahrplanerstellung bei der niederländischen Eisenbahn) wird zur Entscheidungsunterstützung im Rahmen strategischer Planungen für das niederländische Eisenbahnnetz eingesetzt [Hoo96]. Bei diesen soll eine Eisenbahninfrastruktur entworfen werden, die die zukünftig zu erwartenden Verkehrsmengen möglichst effizient bewältigen kann. Aufgrund der naturgemäßen Unsicherheit der zugrunde liegenden Prognosen müssen unterschiedliche Szenarien über die zukünftige Entwicklung erstellt werden. Mit Hilfe entsprechender Fahrpläne kann gezeigt werden, welche Szenarien von einer bestimmten Infrastrukturvariante abdeckt werden können. Da sowohl die manuelle als auch die rechnergestützte Erstellung von Fahrplänen sehr zeitintensiv ist und im Rahmen strategischer Planungen dennoch viele Varianten und Szenarien betrachtet werden sollten, wurde mit DONS ein Verfahren zur automatischen Konstruktion entsprechender Fahrpläne entwickelt.

In den Niederlanden verkehren alle nationalen Personenzüge in einem festen Taktsystem. Dieses basiert für alle Linien auf einem 60-Minuten-Grundtakt, der bei stärkerer Nachfrage entsprechend verdichtet wird. Die Fahrplankonstruktion beginnt daher mit der Entwicklung eines netzweiten[16] Basistaktfahrplans für eine Stunde, der die Marktanforderungen an die einzelnen Linien des Personenverkehrs und die vorhandene Infrastruktur berücksichtigt [Hoo95]. Ausgehend von diesem Basistaktfahrplan wird der vollständige Fahrplan entwickelt, indem dieser auf 24 Stunden ausgedehnt, Verstärkerzüge eingeplant, Züge in verkehrsschwachen Stunden gestrichen und schließlich Güterzüge in die verbleibenden Trassen gelegt werden.

Die Aufgabe von DONS besteht daher in der Ermittlung dieses netzweiten Basistaktfahrplans. Aufgrund der strategischen Fragestellung wird auf die weitere Erarbeitung eines konkreten Fahrplans verzichtet. Da Fahrpläne konfliktfrei sein müssen und in den Niederlanden viele Konflikte aufgrund unzureichender Kapazität in den Bahnhöfen entstehen, sollten bei der Ermittlung des netzweiten Basistaktfahrplans die exakten Belegungen der einzelnen Züge berücksichtigt werden. Da dies aus Komplexitätsgründen aber nicht möglich ist, wird ein zweistufiges Verfahren verwendet [Hoo96]. In einer übergeordneten, globalen Ebene wird die netzweite Infrastruktur

[16] Das niederländische Netz umfasst ca. 2800 Streckenkilometer, 400 Bahnhöfe und bewältigt bis zu 5000 Zügen täglich. Im Vergleich hierzu betreibt die DB Netz AG ein Streckennetz von ca. 37.000 km mit 6000 Bahnhöfen, auf dem täglich ca. 30.000 Personen- und 7.000 Güterzüge verkehren.

sehr abstrakt beschrieben. Hier werden alle für die Fahrplankonstruktion relevanten Punkte, wie Bahnhöfe und Abzweigstellen, und die diese verbindenden Strecken betrachtet. Den Zügen werden feste Routen durch das Streckennetz zugewiesen. Auf eine genaue Betrachtung der verwendeten Fahrwege in den Bahnhöfen wird verzichtet. Durch diese Modellierung kann das in Kapitel 4.2.1 vorgestellte Verfahren CADANS zur Suche eines entsprechenden globalen Taktfahrplans verwendet werden. Bleibt diese Suche erfolglos, werden dem Benutzer die sich widersprechenden Bedingungen zurückgeliefert und er muss entscheiden, welche Anforderungen geändert werden sollen.

In einem zweiten Schritt kann mit Hilfe des in Kapitel 4.2.3 vorgestellten Verfahrens STATIONS überprüft werden, ob in ausgewählten Bahnhöfen auf der Grundlage des ermittelten globalen Taktfahrplans eine konfliktfreie Bahnhofsfahrordnung konstruiert werden kann. Ist dies nicht der Fall, müssen die Eingaben der globalen Ebene entsprechend angepasst und danach neue Läufe von CADANS und STATIONS durchgeführt werden.

Neben den genannten Komponenten besteht DONS zudem noch aus einer zentralen Datenbank zur Verwaltung der anfallenden Daten und einer grafischen Benutzeroberfläche, die dem Anwender Eingaben auf einem ihm vertrauten Niveau erlaubt. So muss er die Bedingungen nicht explizit spezifizieren, sondern macht zunächst allgemeine Angaben über die zugrunde liegende Infrastruktur, die Reisezeiten und das Liniennetz mit seinen Anschlussbeziehungen und festen Abfahrtzeiten. Die erforderlichen Bedingungen werden dann automatisch abgeleitet [Hoo95].

DONS wird vom niederländischen Infrastrukturbetreiber *RailNed* bei der Beurteilung strategischer Infrastrukturprojekte und bei der Überprüfung neuer Fahrplankonzepte eingesetzt. Für die eigentliche Fahrplankonstruktion wird es nicht verwendet, da beispielsweise die vorhandene Genauigkeit von CADANS auf Minutenbasis nicht ausreicht. Zudem muss die zugrunde liegende, niederländische Vorgehensweise zur Erstellung des Gesamtfahrplans auf der Grundlage eines Basistaktfahrplans aufgrund der Forderung des diskriminierungsfreien Zugangs Dritter zur Eisenbahninfrastruktur [EG91] angepasst werden, da bislang eine Vermischung der Fahrlagenplanung des Personenverkehrs mit dem Trassenmanagement des Netzbetreibers stattfindet. Sollen die Trassen für den Güterverkehr schon in DONS berücksichtigt werden, führt dies zu einem starken Anstieg der Komplexität der Aufgabenstellung, der bislang von CADANS nicht bewältigt werden konnte [Schr00].

Um die Eigenschaften eines erzeugten Fahrplans im Betrieb nachweisen zu können, wurde DONS um ein entsprechendes Simulationsverfahren erweitert. Dieses wird genauer in Kapitel 5.2.3 vorgestellt.

### 4.3.2 Simulation der Fahrplanerstellung in STRESI und NSIM

Aufgrund der zentralen Rolle des Fahrplans im Eisenbahnwesen und der Bedeutung der planmäßigen Wartezeiten bei der Bemessung von Bahnanlagen existieren mit STRESI und NSIM zwei eisenbahnbetriebswissenschaftliche Simulationsverfahren, die neben der Betriebsabwicklung auch die Erstellung von Fahrplänen betrachten. Beide Verfahren verwenden den sperrzeitenbasierten Ansatz zur Ermittlung konfliktfreier Fahrpläne.

Das Verfahren STRESI (Streckensimulation) ist Teil der recht verbreiteten SLS-Familie und dient zur Simulation zweigleisiger Strecken [Schw00]. Die zugrunde liegende Infrastrukturmodellierung beruht auf sequentiellen Streckendaten und der Verwendung von Standardbahnhöfen.

Mit dem Verfahren NSIM (Netzsimulation), das im Rahmen einer Dissertation entstanden ist und seitdem den wechselnden neuen Anforderungen angepasst wird, können dagegen Teilnetze simuliert werden [Schu85]. NSIM ist allerdings nicht frei verfügbar, sondern wird im Rahmen eisenbahnbetriebswissenschaftlicher Untersuchungen bei dem Ingenieurbüro ISW aus Aachen eingesetzt. Die betrachteten Netzteile müssen per Hand in so genannte Fahrwegelemente eingeteilt und dann textuell eingegeben werden.

Die Beschreibung möglicher alternativer Laufwege unterscheidet sich aufgrund der betrachteten Infrastruktur allerdings bei beiden Systemen. Bei NSIM kann der Anwender neben dem Regellaufweg eines Zuges weitere alternative Laufwege zusammen mit einer Hierarchieziffer definieren. Da STRESI nur für zweigleisige Strecken konzipiert ist und zudem Standardbahnhöfe verwendet, ist der Laufweg bis auf die verwendeten Bahnhofsgleise bereits eindeutig festgelegt. Für die Züge werden die Start- und Zielbetriebsstellen definiert. Zusätzlich ist anzugeben, in welchen Betriebsstellen und welchen Gleisen der Zug halten soll und in welchen Gleisen er überholt werden darf.

Das Vorgehen bei der Erstellung konfliktfreier Fahrpläne auf der Basis von Sperrzeitentreppen ist bei beiden Verfahren recht ähnlich und basiert auf dem in Kapitel 4.2.6 beschriebenen Grundansatz. Vor der eigentlichen Simulation werden die Sperrzeitentreppen der einzelnen Züge für alle möglichen Laufwege berechnet, um in der folgenden Simulationsphase bei der Konfliktlösung eingesetzt werden zu können. Zur Ermittlung möglicher Konfliktlösungen wird eine feste Reihenfolge verwendet, die mit der ersten erfolgreichen abbricht. Als erstes werden die alternativen Laufwege

getestet, dann versucht mit Hilfe der Halte den Konflikt zu lösen, bevor die gesamte Zugtrasse schließlich komplett in die nächste freie Lücke verschoben wird.

Analog zu DONS werden STRESI und NSIM für strategische Fragestellungen bei der Bemessung von Eisenbahnbetriebsanlagen und der Entwicklung neuer Betriebskonzepte eingesetzt. Die Erstellung eines konfliktfreien Fahrplans dient zur Bestimmung der planmäßigen Wartezeiten und als Vorgabe für eine folgende Simulation der Betriebsabwicklung. Aufgrund der Infrastrukturmodellierung und insbesondere der starren Vorgehensweise bei der Konfliktlösung ist ein direkter Einsatz zur Fahrplankonstruktion im Rahmen des Trassenmanagements bislang nicht erfolgt.

# 5 Eisenbahnbetriebswissenschaftliche Verfahren

In Planungsprozessen sollten aus Gründen des Qualitätsmanagements die zu erwartenden Auswirkungen bei einer tatsächlichen Realisierung möglichst früh betrachtet werden [Her94]. Die gewonnenen Erkenntnisse können so in die weiteren Planungsschritte, zum Beispiel bei der Beurteilung von Varianten, einfließen.

Grundsätzlich existieren unterschiedliche Ansätze, um die Auswirkungen von Planungen zu ermitteln. Im Allgemeinen wird hierzu auf geeignete Ersatzsysteme zurückgegriffen, da eine exemplarische Realisierung des geplanten Zielzustandes zu diesem Zweck nur selten sinnvoll ist. Mit Hilfe gegenständlicher Modelle, geschlossener mathematischer Modellierung oder rechnergestützter Simulationen können entsprechende Ersatzsysteme, allgemein als Modelle bezeichnet, geschaffen werden. Ein Modell stellt naturgemäß das Resultat eines Abstraktionsprozesses dar, da nicht alle Vorgänge in dem betrachteten Weltausschnitt für die zu untersuchende Fragestellung von Bedeutung sind [Lie92]. Damit ein Modell als sinnvolle Entscheidungsgrundlage verwendet werden kann, muss es validiert – also seine Gültigkeit bezüglich des Realsystems nachgewiesen – werden.

Im Rahmen der Eisenbahnbetriebswissenschaft wurden entsprechende Modelle zur Beurteilung der Auswirkung neuer Konzepte für Infrastruktur, Fahrplan oder Betriebsprozess entwickelt. Sie werden im Rahmen meist strategischer Planungen eingesetzt und betrachten das komplizierte Wechselspiel zwischen Infrastruktur, Fahrplan und Betriebsablauf.

Neben Verfahren, die die zu erwartende Betriebsabwicklung auf der Grundlage eines Fahrplans und der vorhandenen Infrastruktur nachbilden, betrachten andere Verfahren die Phase der Fahrplanerstellung. Hierdurch ist eine direkte Beurteilung der Eignung einer geplanten Infrastruktur für unterschiedliche Fahrplankonzeptionen möglich, die aufgrund des langen Planungshorizontes noch nicht festliegen können und sich zudem während der langen Nutzungsdauer ändern werden. Ausgehend von der jeweiligen Infrastruktur und den Wunschlagen der Züge modellieren diese Verfahren die Trassenvergabe. Hierbei werden entsprechende Kennwerte und zum Teil sogar komplette, wahre Fahrpläne ermittelt.

Bei der Beurteilung der zu erwartenden Betriebsabwicklung müssen die im Bahnbetrieb auftretenden Unregelmäßigkeiten berücksichtigt werden, die Änderungen an der existierenden Fahrplanung erforderlich machen. Aufgrund der signaltechnischen Abhängigkeiten und der Anschlüsse zwischen einzelnen Zugfahrten können sich diese Unregelmäßigkeiten schnell auf größere Bereiche des Netzes ausbreiten,

wenn nicht ausreichend Reserven in den Fahrplan eingebaut wurden und die Betriebsdisposition nicht geeignet eingreifen kann. Je nach Infrastrukturkapazität, Struktur des Fahrplans und aufgetretenen Unregelmäßigkeiten können im Rahmen der Betriebsdisposition nur kleinere Änderungen an den geplanten Fahrwegen und Haltzeiten notwendig sein. Im schlimmsten Fall muss die gesamte Planung der vorhandenen Zugfahrten neu durchgeführt werden.

In diesem Kapitel werden zunächst die unterschiedlichen Ansätze zur Konstruktion eisenbahnbetriebswissenschaftlicher Modelle und die besondere Bedeutung der rechnergestützten Simulation erläutert. Danach werden die Konzepte und Verfahren zur Simulation des Betriebsablaufes kurz vorgestellt.

## 5.1 Grundbegriffe der Modellierung und der Simulation

Die Verfahren der Eisenbahnbetriebswissenschaft unterscheiden sich in der Modellierung recht stark voneinander und reichen von Systemen, die Kennwerte ermitteln bis hin zu Systemen, die konfliktfreie Fahrpläne erzeugen oder den zu erwartenden Betriebsablauf mit gegenständlichen oder rechnergestützten Modellen im Detail nachbilden.

### 5.1.1 Gegenständliche Modellierung

Die gegenständliche Modellierung wird seit langer Zeit in so genannten Eisenbahnbetriebsfeldern oder Eisenbahnsicherungstechnischen Versuchsanlagen verwendet, um beispielsweise neue Ansätze bei der Steuerung von Bahnbetriebsprozessen erproben und die Auswirkungen von Unregelmäßigkeiten analysieren zu können.

So existierte an der Hochschule für Verkehrswesen in Dresden ein entsprechendes Labor, in dem, unter Verwendung von originaler Stellwerkstechnik der Deutschen Reichsbahn und angepasster Modellbahntechnik, ein gegenständliches Modell realisiert wurde, das exakt im Zeitmaßstab 1:1 und im Längenmaßstab 1:200 arbeitete [BrGi92]. Die Modelllokomotiven waren feinmechanische Spezialanfertigungen, die in ihrem fahrdynamischen Verhalten dem Vorbild exakt nachgebildet waren. Die tatsächlichen Bedienhandlungen an den Stellwerken und die Verwendung von Modellbahnzügen, die reale, fahrdynamische Kennlinien nachbilden, führten zu einem zeitlichen Verhalten des gegenständlichen Modells in Echtzeit. Mit der Etablierung der rechnergestützten Simulation geraten diese klassischen Anlagen zunehmend in Vergessenheit.

An der TU Dresden wurde allerdings in den letzten Jahren ein neues Eisenbahnlabor unter Verwendung moderner Rechentechnik aufgebaut [Tri00]. Bei dieser Anlage wird weiterhin der Zeitmaßstab 1:1, der Längenmaßstab 1:200 und originale Stellwerkstechnik verwendet. Allerdings wird moderne Modellbahntechnik eingesetzt, um die Fahrdynamik der einzelnen Zugkompositionen in einem Fahrzeugsteuerrechner berechnen und dann an handelsübliche Modellbahnlokomotiven übertragen zu können. Die für die Steuerung erforderliche Feinortung der Modellbahnzüge beruht auf der Verwendung ortsfester Einrichtungen in geringen Abständen. Durch den Einsatz computergestützter Schnittstellen ist es zudem möglich, unterschiedliche Stellwerkstechniken für die einzelnen Bahnhöfe einzusetzen, um so die Auswirkungen von Stellwerksumbauten studieren zu können. Neben den klassischen Sicherungssystemen auf der Basis von Außensignalisierung können mit entsprechenden Anpassungen im Fahrzeugsteuerrechner auch moderne, funkbasierte Sicherungssysteme nachgebildet und im Modell erprobt werden. Als nächster Realisierungsschritt ist analog zur DB Netz AG die Einrichtung einer Betriebszentrale geplant, von der aus der Zugverkehr zentral disponiert werden kann.

Der große Vorteil dieses in der Eisenbahnbetriebswissenschaft nur scheinbar überholten Ansatzes vom gegenständlichen Modell liegt in der Verwendung von Originalkomponenten auf der Sicherungsebene und der unmittelbaren Visualisierung der jeweils aktuellen Modellzustände. Stellwerksbedienungen und Dispositionsmaßnahmen werden wie in der Realität von Bedienern durchgeführt. Durch die Integration rechnergestützter Systeme in gegenständliche Modelle entstehen – analog zu den bekannten Flug- und Fahrsimulatoren – Simulatoren für Bahnbetriebsprozesse.

### 5.1.2 Analytische Verfahren

Analytische Verfahren sind geschlossene mathematische Modelle aus dem Bereich des *Operations Research*, die mit Hilfe impliziter oder expliziter Gleichungssysteme Kennwerte für ein durch Parameter spezifiziertes System erzeugen. Die Realität wird in einem analytischen Modell in einer abstrakten mathematischen Struktur abgebildet, die oftmals recht rigide Voraussetzungen postuliert [Lie92].

In den analytischen Verfahren der Eisenbahnbetriebswissenschaft wird davon ausgegangen, dass die Zugfahrten und die betrieblichen Vorgänge als Zufallsgrößen aufgefasst werden können, die mit statistischen Verteilungen beschreibbar sind. Anstatt einzelner Zugfahrten werden Verkehrsströme betrachtet und die Belegungen der einzelnen Infrastrukturelemente werden zusammenfassend über Mindestzugfolgezeiten modelliert.

Es existieren zwei Klassen von analytischen Modellen. Mit der einen wird die Trassenvergabe im Rahmen der Fahrplanerstellung betrachtet, um die resultierenden planmäßigen Wartezeiten zu ermitteln. Die andere modelliert die Betriebsabwicklung auf der Grundlage eines vorhandenen Fahrplans und berücksichtigt hierbei die betrieblichen Auswirkungen von auftretenden Unregelmäßigkeiten.

Planmäßige Wartezeiten können mit Hilfe warteschlangen- bzw. bedienungstheoretischer Modelle [FiHe90] berechnet werden. Die Trassennachfrage wird als Forderung an die betrachtete Komponente der Infrastruktur und diese wiederum als Bedienungssystem aufgefasst. Behindern sich zwei Trassenwünsche, wird dieser Konflikt in Abhängigkeit von der Rangordnung und der zugehörigen Mindestzugfolgezeit gelöst [Schw78]. Aus den resultierenden Wartezeiten wird die Länge der Warteschlange vor dem Bedienungssystem berechnet und mit einem vorgegebenen Qualitätsmaßstab verglichen, der von der geforderten Betriebsqualität abhängt. Aufgrund der Verwendung von Gleichungssystemen kann die Zuganzahl, die zu einer vorgegebenen Qualität führen würde, auch direkt ermittelt werden. Auf der Basis dieses Ansatzes kann die Fahrplan-Nennleistung einer Eisenbahnbetriebsanlage definiert werden.

Die in der Betriebsabwicklung zu erwartende Summe der Folgeverspätungen kann nach dem Verfahren von SCHWANHÄUßER mit Hilfe eines wahrscheinlichkeitstheoretischen Ansatzes berechnet werden [Schw74]. Hierbei werden zum einen die vorhandenen Pufferzeiten und Rangordnungen der Züge und zum anderen die im Eisenbahnbetrieb nicht gänzlich zu vermeidenden Unregelmäßigkeiten berücksichtigt. Folgeverspätungen entstehen, wenn Änderungen am geplanten Fahrplan, wie zeitliche Verschiebungen oder Reihenfolgewechsel, erforderlich werden. Die resultierenden Wartezeiten im Betrieb werden als auslastungsabhängige Größe zur Beurteilung der Qualität des Betriebsablaufs eingesetzt.

Die analytischen Verfahren beruhen auf einer sehr abstrakten, mathematischen Formulierung, die strenge Voraussetzungen an die modellierten Realsysteme stellt. Bei der Validierung der einzelnen analytischen Ansätzen wurde von den Modellentwicklern nachgewiesen, unter welchen Bedingungen die jeweiligen Verfahren eingesetzt werden können. So ist es bei Warteschlangenmodellen problematisch, Züge von im Takt verkehrenden Linien als zufällige Forderungen an ein Bediensystem aufzufassen. Allerdings entschärft sich dieses Problem durch die Überlagerung mehrerer vertakteter Linien oder das Vorhandensein weiterer, nicht vertakteter Züge. Ansonsten muss auf eine andere Modellierung zurückgegriffen werden. Eine genaue Beschreibung der analytischen Verfahren der Eisenbahnbetriebswissen-

schaft kann der entsprechenden Fachliteratur entnommen werden ([FiHe90], [Schw74], [Schw00], [Wak85], [Wen99]).

Mit ANKE (Analytische Netzkapazitätsermittlung) steht ein DV-System zur Verfügung, das den Stand der Forschung auf dem Gebiet der analytischen Verfahren repräsentiert, auf der Modellierung der Infrastruktur mit dem Spurplan-Graphen beruht und kompatibel zum Fahrplankonstruktionssystem FAKTUS ist [Vak02].

Aufgrund der mathematischen Formulierung und der Verwendung von Gleichungssystemen kann ein Teil der in Kapitel 4.2 beschriebenen Ansätze zur automatischen Fahrplankonstruktion ebenfalls als analytische Verfahren aufgefasst werden. Allerdings werden bei der Beschreibung keine Zufallsgrößen verwendet, sondern die möglichen Werte der einzelnen Variablen und die sich ergebenden Kombinationen explizit betrachtet. Hierdurch sind keine so strengen Voraussetzungen an die Anwendbarkeit dieser Verfahren geknüpft, allerdings gehen auch die geringen Rechenzeiten und die implizite Abbildung der Variabilität der Trassenbestellungen und der Betriebsabläufe als Vorteile der klassischen analytischen Verfahren verloren.

### 5.1.3 Rechnergestützte Simulation

Die VDI-Richtlinie 3633 definiert Simulation sehr anschaulich als das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind [VDI00]. Diese Definition beschreibt die grundlegende Vorgehensweise ohne Betrachtung der notwendigen Realisierung und umfasst auch die schon beschriebene, gegenständliche Modellierung. Seit der Verfügbarkeit leistungsstarker Rechnersysteme wird die im Mittelpunkt einer Simulation stehende Nachbildung der dynamischen Prozesse im Allgemeinen mit Hilfe der Datenverarbeitung durchgeführt. Im Folgenden wird der Begriff Simulation daher – wie in der Literatur verbreitet – im Sinne von rechnergestützter Simulation verstanden.

Im Gegensatz zur gegenständlichen Modellierung und insbesondere den Simulatoren ist es nicht das Ziel einer Simulation, das Geschehene zeitlich identisch abzubilden und den Benutzer unmittelbar an den Vorgängen teilnehmen zu lassen. In Analogie zu den früher üblichen militärischen Sandkastenspielen wird stattdessen versucht, im Vorhinein eine Vorstellung über Geschehnisse und Ergebnisse in einem Weltausschnitt, dem Realsystem, zu erlangen [Lie92]. Da nicht alle Vorgänge in dem betrachteten Weltausschnitt für die zu untersuchende Fragestellung von Bedeutung

sind, muss zunächst entschieden werden, welche Prozesse die Simulation explizit nachbilden soll.

Der gesamte Bereich des Schienenverkehrs bietet eine Reihe von Anwendungsmöglichkeiten für Simulationen. Mit den Systemen der Eisenbahnbetriebswissenschaft werden wiederum die Vorgänge Trassenvergabe und Betriebsabwicklung detailliert betrachtet. Im Zusammenhang mit der automatischen Fahrplanerstellung wurden die entsprechenden Verfahren zur Simulation der Trassenvergabe bereits in Kapitel 4.3.2 dargestellt. Diese ermitteln neben den wahren Fahrplänen auch die zugehörigen planmäßigen Wartezeiten, ohne Einschränkungen bezüglich der Vertaktung der Zugfahrten unterworfen zu sein. Die Ansätze und Verfahren zur Simulation der Betriebsabwicklung werden im folgenden Kapitel 5.2 erläutert.

Mit Hilfe von Simulationsverfahren sind allerdings keine direkten Aussagen über die Kapazität oder die Leistungsfähigkeit einer Strecke oder eines Netzteils möglich, da mit einer hohen Abbildungsgenauigkeit einzelne Kennzahlen zu einem festen Betriebsprogramm auf einer zugrunde liegenden Infrastruktur ermittelt werden. Das Leistungsverhalten, also der funktionale Zusammenhang zwischen Auslastung und Qualität, kann mit dieser Betrachtungsweise nicht direkt bestimmt werden. Hierzu dienen analytische Verfahren, wie beispielsweise das schon erwähnte Verfahren ANKE, zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit von Bahnanlagen, die jedoch fahrplantechnische und betriebliche Details nicht so genau abbilden können.

Um diese Details bei der Ermittlung des Leistungsverhaltens trotzdem zu berücksichtigen, kann mit Simulationsverfahren anhand sukzessive gesteigerter Zugzahlen die Entwicklung von Wartezeiten und Verspätungen hochgerechnet werden. Die Struktur des Fahrplans darf sich hierbei allerdings nicht ändern. Gelingt dies für einzelne Zugzahlen, stehen punktuelle Aussagen über das Verhalten von Auslastung und Qualität zur Verfügung. Eine allgemeine Bestimmung der zu einer vorgegebenen Qualität führenden Auslastung ist auf diese Weise weiterhin nicht möglich. Die hierzu erforderliche Bestimmung der inversen Funktion des Leistungsverhaltens bleibt den analytischen Verfahren vorbehalten.

## 5.2 Simulation der Betriebsabwicklung

Verfahren zur Simulation der betrieblichen Auswirkungen eines Fahrplans müssen neben dem Fahrplan und der vorhandenen Infrastruktur auch die im Betrieb nie vermeidbaren Unregelmäßigkeiten und die Arbeitsweise der Betriebsdisposition geeignet berücksichtigen. Für unterschiedliche eisenbahnbetriebswissenschaftliche Fragestellungen wurde eine Reihe entsprechender Simulationssysteme entwickelt, die sich in der Modellierung des Systems Bahn teilweise stark unterscheiden.

### 5.2.1 Modellierung der Infrastruktur

Wie schon bei den Ansätzen zur rechnergestützten und automatischen Fahrplanerstellung deutlich wurde, kann die zugrunde liegende Infrastruktur unterschiedlich modelliert werden. Die als makroskopisch bezeichneten, gröberen Modelle betrachten Bahnhöfe und Abzweigstellen als Knoten und die dazwischen liegenden Streckenabschnitte als Kanten. Fahr- und Belegungszeiten müssen vorgegeben werden, da sie auf dieser Basis nicht berechnet werden können. Mikroskopische Modelle betrachten die Infrastruktur genauer und ermöglichen so eine integrierte Ermittlung der exakten Fahr- und Belegungszeiten der Züge. Hierzu muss die Fahrdynamik und die verwendete Sicherungstechnik innerhalb der Simulation allerdings explizit betrachtet werden, wodurch die Komplexität entsprechend ansteigt. Das Zusammenspiel der einzelnen Zugfahrten über die Sicherungstechnik kann dafür realitätsnah nachvollzogen werden.

Auch Fahrplankonstruktionssysteme, die wie FAKTUS selbständig Fahr- und Belegungszeiten ermitteln, enthalten für diese Zwecke entsprechende Simulationskomponenten. Um doppelte Datenerfassung zu vermeiden, sollte in diesem Fall die gleiche Infrastrukturmodellierung für Fahrplankonstruktion und Simulation verwendet werden. So können die in Kapitel 3.2 vorgestellten Systeme Spurplan und GFD auch zur Versorgung von Simulationssystemen mit Infrastrukturdaten verwendet werden.

### 5.2.2 Modellierung der Betriebsdisposition

Bei der Nachbildung der Betriebsabwicklung müssen auch die möglichen Unregelmäßigkeiten und ihre Auswirkungen auf den weiteren Bahnbetrieb geeignet berücksichtigt werden. Da es sich bei Simulationen definitionsgemäß um Einzelexperimente handelt, die im Gegensatz zu den analytischen Verfahren jeweils einen konkreten Fall nachbilden, werden einzelne Störungen explizit erzeugt und in den Simulations-

lauf eingestreut. Für allgemeine Aussagen über den zu erwartenden Betriebsablauf ist es daher erforderlich, eine größere Anzahl von Simulationsläufen durchzuführen und diese dann mit Hilfe statistischer Verfahren auszuwerten.

Störungen können sich sowohl über die Sicherungstechnik und die Anschlussbeziehungen als auch über die Betriebsdisposition auf weitere, nicht direkt beteiligte Züge auswirken. Die Aufgabe der Disposition kann definiert werden als das Erkennen und Lösen von Konflikten im Betriebsablauf auf der Grundlage eingetretener oder zu erwartender Ereignisse. Anschaulich gesprochen ist es die Aufgabe der Disposition, aktiv in die Steuerung eines gestörten Betriebsablaufs einzugreifen, um den Planzustand möglichst wiederherzustellen oder entsprechend der vorhandenen Möglichkeiten und den vorgegebenen Rahmenbedingungen einen möglichst guten weiteren Betrieb zu ermöglichen. Bei der Disposition werden analog zur Fahrplankonstruktion die im Rahmen der Betriebsabwicklung gewünschten Prioritäten der Zugfahrten berücksichtigt.

Schon Anfang des letzten Jahrhunderts wurde erkannt, dass die weitgehend auf den eigenen Steuerbereich begrenzte Sicht des einzelnen Fahrdienstleiters auf höher belasteten Strecken sowie in großen Knoten eine über die örtliche Fahrdienstleitung hinausgehende Disposition erforderlich macht. Zu diesem Zweck wurden Zugüberwachungen (Zü) eingerichtet, in denen Disponenten den Betriebsablauf überwachend disponieren [Pac00]. Die Kommunikation zwischen örtlichem Fahrdienstleiter und Disponenten, also die Übertragung von Zuglaufmeldungen und von Anweisungen zur Regelung der Zugfolge, geschah lange Zeit fernmündlich. Die Arbeit des Disponenten erfolgte analog zur Fahrplankonstruktion manuell auf der Basis von gezeichneten Zeit-Weg-Linien. Die Rechnerunterstützte Zugüberwachung (RZü) mit Anzeige der aktuellen Zeit-Weg-Linien auf einem Bildschirm wurde erst Ende der 80er-Jahre unter Verwendung von Zugnummernmeldeanlagen, die die Standorte der Züge automatisch verfolgen, realisiert [OsRo89]. Die Konflikterkennung und -lösung erfolgte weiterhin ohne Rechnerunterstützung.

Zur Zeit richtet die DB Netz AG Betriebszentralen ein, von denen aus die Steuerung und Disposition des Betriebes für große Netzteile zentral geschehen wird. Durch die Fernsteuerung der örtlichen Stellwerke wird es möglich, Steuerung und Disposition wieder enger zusammenzubringen ([OsThBi94], [EcKa99]). Ein weiteres Ziel ist es, die Disponenten mit Hilfe rechnergestützter Verfahren auch bei der Konflikterkennung und -lösung zu unterstützen.

Ein grundlegend neuartiger Ansatz zur rechnergestützten Disposition ist die Verwendung einer automatischen Fahrplanerstellung, die auf der Fahrplankonstruktion mit

Sperrzeitentreppen aufbaut, und jeweils dann wiederholt wird, wenn Züge von den geplanten Trassen signifikant abweichen [Schw98]. Die automatische Fahrplankonstruktion wird so zur „Asynchronen Disposition des Eisenbahnbetriebes“ (ASDIS), die auch ferne Konflikte erkennen kann und nicht nur Konflikte, die wenige Blockabschnitte voraus liegen, berücksichtigt. Eine detaillierte Beschreibung der Verfahren zur Betriebsdisposition und insbesondere der Arbeitsweise einer asynchronen Disposition ist in [Jac02] enthalten. Rechnergestützte Dispositionssysteme haben eine Reihe von Parallelen zu den in dieser Arbeit betrachteten Planungssystemen. Dispositionssysteme müssen aber im Gegensatz zu Planungssystemen reale Daten verarbeiten und geeignete Lösungen in Echtzeit finden, die dann von Stellwerken oder Betriebszentralen realisiert werden.

Mit Hilfe zweier, völlig unterschiedlicher Ansätze versuchen Simulationsverfahren die Betriebsabwicklung und insbesondere die Disposition geeignet abzubilden.

In so genannten synchronen Verfahren stellen die Zugbewegungen den zentralen Prozess der Simulation da. Entsprechend einer Modellzeit laufen die einzelnen Züge unter Beachtung der vorhandenen Sicherungstechnik durch das Netz. Konflikte werden erkannt, wenn Anschlüsse nicht realisiert werden können oder sich zwei Züge über die Sicherheitstechnik behindern. Das letztere ist beispielsweise der Fall, wenn ein Zug einen Block der Sicherungstechnik belegen will, den bereits ein anderer verwendet. Die Konflikte werden entsprechend der aktuellen Situation gelöst, wobei eine großräumige, übergeordnete Disposition in synchronen Verfahren nicht nachgebildet werden kann. Bei kleineren Störungen fällt dies nicht weiter auf. Würde allerdings bei größeren Störungen von der Betriebsdisposition ein neuer Dispositionsfahrplan erstellt, der strukturelle Umplanungen enthält, kann dies von einer synchronen Simulation nicht adäquat nachgebildet werden. Synchrone Simulationen haben ihre Stärken daher bei Verkehrssystemen, in denen die einzelnen Einheiten selbständig agieren, keine Prioritäten haben und der Fahrtverlauf nicht extern disponiert wird, wie dies im individuellen Straßenverkehr und auch bei Straßenbahnen der Fall ist.

Dagegen kommt dem Dispositionsprozess in asynchronen Simulationssystemen eine zentrale Rolle zu. Analog zu RZü und BZ wird von einer übergeordneten Disposition ausgegangen, die die Laufwege der Züge überwachen und Konflikte frühzeitig erkennen kann. Während der Simulation werden Störungen eingestreut, die zu Abweichungen gegenüber dem geplanten Betrieb führen können. Analog zu einem entsprechenden Dispositionsverfahren werden in der Simulation bei erkannten Konflikten neue konfliktfreie Dispositionsfahrpläne unter Berücksichtigung der aktuellen Bedingungen berechnet. Hierzu können im Wesentlichen die gleichen

Methoden wie bei der Simulation der Fahrplanerstellung verwendet werden. Der große Vorteil der asynchronen Simulation besteht in der realitätsnahen Modellierung einer übergeordneten, rechnergestützten Disposition. Der hierdurch im Simulationsverfahren entstehende höhere algorithmische Aufwand ist heute beherrschbar.

### 5.2.3 Verfahren zur Betriebssimulation

Nachdem die unterschiedlichen Möglichkeiten zur Modellierung des Bahnbetriebes erläutert und entsprechende Kategorien eingeführt wurden, sollen im Folgenden einige verbreitete und charakteristische Simulationssysteme skizziert werden. An dieser Stelle kann allerdings keine vollständige und detaillierte Dokumentation erfolgen. Hierfür sei auf entsprechende Veröffentlichungen verwiesen ([Schw94a], [SchwGr97], [Bär98]).

Zur Überprüfung der Stabilität der berechneten, netzweiten Taktfahrpläne wurde das System DONS (vgl. Kapitel 4.3.1) um ein entsprechendes Simulationsmodul SIMONE (*Simulation Model of Networks*) erweitert [MiBo00]. Dieses basiert auf der makroskopischen Modellierung des Netzes von CADANS. In SIMONE wird ein generischer Ansatz zur Erzeugung konkreter Simulationsanwendungen verwendet. Hierzu wurden mit Hilfe der allgemeinen Simulationsumgebung ARENA wieder verwendbare Softwarekomponenten, so genannte *Templates*, für Basiselemente der Betriebssimulation, wie Bahnhof, Streckenabschnitt, Zug und Verspätungserzeugung, entwickelt. Aus diesen kann für einen netzweiten Fahrplan und die ihm zugrunde liegenden Bedingungen eine synchrone, makroskopische Simulationsanwendung generiert werden. Die einzelnen Züge verkehren anhand ihres Fahrplans unter Berücksichtigung der Fahrzeiten und Anschlüsse durch das Netz. Der geplante Ablauf wird durch Verspätungen einzelner Züge gestört, die sich über Mindestzugfolgezeiten, Bahnhofskapazitäten und Anschlüsse auch auf andere Züge auswirken können. Nach einem Simulationslauf werden die entstandenen Folgeverspätungen und die Pünktlichkeit der Züge statistisch ausgewertet und als Simulationsergebnisse ausgegeben. Interessanterweise halten es die Entwickler von SIMONE für nicht erforderlich, die Disposition bei einer Stabilitätsuntersuchung zu berücksichtigen, obwohl diese die Verspätungsfortpflanzung analog zur Realität reduzieren würde.

Bei SABINE (Simulation und Auswertung des Betriebsablaufs im Netz) handelt es sich ebenfalls um ein synchrones, makroskopisches Simulationssystem. Es basiert auf höheren, zeitbewerteten Petrinetzen[17] und dient insbesondere zur Feststellung von Wechselwirkungen zwischen entfernten, scheinbar unabhängigen Netzteilen [Fis95]. Das betrachtete Gleisnetz wird hierzu in die Grundbausteine Bahnhof, Abzweigstelle und Strecke zerlegt, für die jeweils eigenständige Petrinetze generiert werden. Während der eigentlichen Simulation werden diese vom Haupt-Petrinetz aufgerufen und für die Topologieelemente Gleis und Weiche Belegungszeiten berechnet. Anhand der Belegungszeiten und der Mindestzugfolgezeiten wird überprüft, ob eine Ressource für einen Zug tatsächlich zur Verfügung steht oder ob sie von mehreren Zügen gleichzeitig beansprucht wird. Im Konfliktfall entscheidet ein Dispositionsalgorithmus, welcher Zug diese Ressource zuerst zugeteilt bekommt. Durch die Verwendung von Mindestzugfolgezeiten bei der Abbildung der Betriebsdisposition wird bei diesem synchronen Verfahren erreicht, dass sich die Züge auf der freien Strecke nicht behindern können und so die Wartezeiten in die Bahnhöfe gelegt werden.

Es existiert eine ganze Reihe synchroner, mikroskopischer Simulationsverfahren, deren Simulationskonzeption sich nur geringfügig unterscheidet. Daher soll an dieser Stelle die sehr verbreitete und kommerziell erfolgreiche SIMU-Familie als Vertreter genauer dargestellt werden. Zu der Familie gehören die heute im Einsatz befindlichen Systeme UX-SIMU, SIMU VII und SIMU++, die im Laufe der Jahre basierend auf mehreren wissenschaftlichen Arbeiten an der Universität Hannover für unterschiedliche Rechnersysteme entstanden sind ([Kre85], [Kla94], [Hau00] u. a.). Die mikroskopische Infrastrukturmodellierung basiert bei diesen Verfahren grundsätzlich auf einem kantenbewerteten Graphmodell, das aufgrund von Redundanzen für die synchrone Fahrzeitenrechnung besonders gut geeignet ist. So besitzt jede Kante je ein Attribut für die Länge, die Neigung und die zulässige Geschwindigkeit. Darüber hinaus existiert ein weiteres Kantenattribut, mit dem die Belegung der Kante durch einen Zug gekennzeichnet werden kann. Fahrstraßenausschlüsse werden im Modell dadurch berücksichtigt, dass eine Kante nur von jeweils einem Zug belegt werden kann [Kla94]. Die bei den einzelnen SIMU-Varianten verwendeten Verfahren zur Eingabe von Fahrplänen als zentrale Eingangsgröße für die Simulation wurden bereits in Kapitel 3.2.6 erläutert. Ein Konflikt wird dadurch erkannt, dass ein Zug während der Simulation eine schon belegte Kante selbst belegen will. In diesem Fall wird durch eine sofortige, lokale Dispositionsmaßnahme versucht, den Konflikt zu

[17] Petrinetze sind logische Netze aus Zuständen und Aktionen, die zur Modellierung und Analyse dynamischer Systeme eingesetzt werden (näheres hierzu siehe [Bau97] u. a.).

lösen, damit der Zug nicht vor dem nächsten Blocksignal außerplanmäßig halten muss. In dem jüngsten Vertreter SIMU++ wurde die Konflikterkennung verfeinert, indem die Konflikte in einem begrenzten Vorschaubereich mit Hilfe vorberechneter Sperrzeitentreppen erkannt werden [Hau00]. Eine übergeordnete Disposition kann auf dieser Basis weiterhin nicht abgebildet werden, da strukturelle Umplanungen bei größeren Störungen durch die lokale Konflikterkennung und insbesondere -lösung nicht möglich sind. Für Bahnsysteme ohne übergeordnete Disposition ist dies natürlich unerheblich. Zudem können Blockierungen von Zügen insbesondere auf eingleisigen Strecken aufgrund des begrenzten Vorschaubereiches nicht verhindert werden. Ein synchrones, mikroskopisches Simulationssystem ist blockiert, wenn mehrere simulierte Züge bereits von anderen Zügen belegte Gleiskanten für die eigene Weiterfahrt benötigen und sich hierbei geschlossene Zyklen von Abhängigkeiten ergeben haben.

Dieser auch aus anderen Systemen mit einer Vergabe von exklusiv nutzbaren Ressourcen an unabhängige Prozesse bekannte Zustand wird in der Informatik als Verklemmung oder *Deadlock* bezeichnet. Seit Mitte der 60er Jahre wurden das *Deadlock*-Problem und mögliche Lösungsansätze im Zusammenhang mit der Einführung von *Multitasking*-Betriebssystemen umfassend theoretisch untersucht. Die Ergebnisse sind zentraler Bestandteil vieler Lehrbücher zum Thema Betriebssysteme. Ein guter Überblick verbunden mit weiterführenden Literaturhinweisen wird beispielsweise in [Tan01] gegeben.

Klassischerweise werden *Deadlocks* im Eisenbahnbetrieb durch organisatorische Maßnahmen vermieden, indem der Betrieb auf Basis eines zuvor erstellten, konflikt- und damit auch *deadlock*-freien Fahrplans abläuft und bei Planabweichungen mögliche Blockierungen von einer übergeordneten, vorausschauenden Disposition verhindert werden. Einen anderen Ansatz verfolgt die regelbasierte *Deadlock*-Vermeidung für Zuglenkanlagen, die ohne Betrachtung eines vorgegebenen Fahrplans und einer übergeordneten Disposition vor jedem Stellauftrag konkret prüft, ob dieser zu einer Blockierung von Zugfahrten führen würde [Pac93]. Darf ein Stellauftrag nicht ausgeführt werden, muss der zugehörige Zug so lange an seinem Standort warten, bis die Gefahr der Blockierung durch neue Positionen der anderen Zugfahrten nicht mehr vorhanden ist. Eine vorausschauende Behandlung ist mit diesem Ansatz nicht möglich. Ein weiterer theoretischer Ansatz, der darin besteht, *Deadlocks* prinzipiell zuzulassen und gegebenenfalls durch Entziehen bereits zugeteilter Ressourcen aufzulösen, scheidet im Eisenbahnbetrieb weitgehend aus. Das Sperren von Streckengleisen und das Zurücksetzen der Züge ist zu zeitaufwändig und die Entfernung eines Zuges von den Gleisen kaum praktikabel.

Eine vorausschauende Planung ist mit einem beschränkten Vorschaubereich grundsätzlich nicht möglich. Analog zum Realsystem kann erst durch die Einführung einer übergeordneten, vorausschauenden Dispositionskomponente die *Deadlock*-Problematik in einem mikroskopischen Simulationssystem adäquat behandelt werden.

Die schon im Rahmen der automatischen Fahrplanerstellung in Kapitel 4.3.2 erläuterten asynchronen, mikroskopischen Simulationsmodelle STRESI und NSIM können auch die Betriebsabwicklung simulieren. Hierzu werden Verspätungen in einen vorhandenen Fahrplan eingestreut und mit Hilfe der Algorithmen zur automatischen Fahrplanerzeugung konfliktfreie Dispositionsfahrpläne erzeugt. Die im Fahrplan enthaltenen Fahrzeitreserven werden bei verspäteten Zügen zur Verspätungsreduktion verwendet. Aufgrund der Nachbildung einer übergeordneten Disposition können in diesen mikroskopischen Systemen Blockierungen verhindert werden. Allerdings existiert durch die Beschränkung von STRESI auf zweigleisige Strecken und die eingeschränkten Nutzungsmöglichkeiten von NSIM bislang kein allgemein verfügbares, asynchrones Simulationssystem für beliebige Netzstrukturen.

# 6 Konzeption eines neuen Simulationsverfahrens

In den vorigen Kapiteln wurden die Aufgaben von Fahrplänen erläutert, Konzepte und Verfahren zur Konstruktion von Fahrplänen vorgestellt, die algorithmische Komplexität einer automatischen Fahrplanerstellung diskutiert und Modelle der Eisenbahnbetriebswissenschaft erläutert. Auf dieser breiten Basis wird in diesem Kapitel ein neues Simulationsverfahren konzipiert, das sowohl die diskriminierungsfreie Vergabe von Trassen als auch die Betriebsabwicklung geeignet nachvollzieht und dabei die Probleme existierender Verfahren soweit wie möglich überwindet. Die in [Grö00] diskutierten Anforderungen an ein solches Simulationsverfahren werden hierbei berücksichtigt.

## 6.1 Grundsatzentscheidungen zur Modellierung

Im Rahmen der Konzeption des neuen Simulationsverfahrens müssen einige Grundsatzentscheidungen getroffen werden. Diese betreffen insbesondere die Verwendung der vorgestellten Grundkonzepte.

### 6.1.1 Verwendung des sperrzeitenbasierten Ansatzes

Aufgrund der inhaltlichen Nähe zwischen der Simulation der Trassenvergabe und der automatischen Fahrplanerstellung ist es scheinbar naheliegend, ein mathematisches Verfahren zur Lösung der Aufgabenstellung zu verwenden. Wie in Kapitel 4.1 erläutert wurde, ist es aufgrund der algorithmischen Komplexität der automatischen Fahrplanerstellung und der allgemein anerkannten Gültigkeit der Hypothese P ungleich NP unmöglich, ein effizientes, mathematisches Lösungsverfahren zu finden. Die existierenden Verfahren verwenden daher Heuristiken und beschränken sich zudem auf Aufgabenstellungen, die vom Trassenmanagement eines größeren Infrastrukturbetreibers weit entfernt sind. So werden keine Sperrzeiten betrachtet, obwohl der Begriff der Fahrplantrasse nur im Sinne einer Sperrzeitentreppe sinnvoll interpretiert werden kann [Wen99]. Die Erweiterung der mathematischen Ansätze zur automatischen Fahrplanerstellung um Sperrzeiten würde allerdings die Komplexität der Aufgabenstellung weiter steigern, insbesondere wegen der Notwendigkeit einer abstrakten, mathematischen Formulierung der strukturellen Eigenschaften der Sperrzeitentreppe.

Bei Verwendung des sperrzeitenbasierten Ansatzes sind die Sperrzeitentreppen dagegen der zentrale Grundbaustein der Modellierung. Unter Beachtung der Kapazität der einzelnen Infrastrukturelemente werden wahre Fahrpläne erzeugt, indem konkrete Zugtrassen betrachtet und auftretende Konflikte explizit gelöst werden. Durch diese Vorgehensweise sinkt zudem die Anzahl der zu betrachtenden Zuglagen im Gegensatz zu den mathematischen Verfahren signifikant. Dies ermöglicht ein akzeptables Laufzeitverhalten für reale Aufgabenstellungen unter Beachtung alternativer Laufwege und großer Netzteile.

Das neue Simulationsverfahren soll daher auf dem sperrzeitenbasierten Ansatz beruhen und diesen, um die Grenzen der bisherigen asynchronen Simulationsverfahren zu verlassen, geeignet erweitern. Im Rahmen der Simulation der Betriebsabwicklung wird auf die Algorithmen zur Trassenvergabe zurückgegriffen und entsprechend dem in Kapitel 5.2.2 vorgestellten asynchronen Ansatz eine übergeordnete Disposition realitätsnah nachgebildet.

### 6.1.2 Spurplan-Graph und FAKTUS als Basis

Analog zur rechnergestützten Trassenvergabe der DB Netz AG mit FAKTUS stehen bei dem neuen Simulationsverfahren die Sperrzeitentreppen im Mittelpunkt des Prozesses zur Erzeugung eines wahren Fahrplans. Obwohl die Vergabe der Fahrplantrassen bei einem Simulationssystem und bei einem rechnergestützten Verfahren auf unterschiedliche Art und Weise realisiert wird, ist es sinnvoll, die bewährte konzeptionelle Basis des Systems FAKTUS, das in Kapitel 3.2.3 erläutert wurde, für das neue Simulationsverfahren zu nutzen.

Die Verwendung des redundanzfreien, auf Zwischenweichenabschnitten beruhenden und bei der DB Netz AG zur Aufnahme des gesamten Netzes verwendeten Spurplan-Graphen führt zu einer mikroskopischen Simulationsanwendung, der direkt eine große Menge existierender Infrastrukturdaten zur Verfügung stehen. Der Spurplan-Graph wurde im Zusammenhang mit FAKTUS entwickelt und stellt auf effiziente Weise alle zur Ermittlung von Sperrzeiten relevanten Infrastruktur-Informationen zur Verfügung. Durch die Verwendung einer einheitlichen Infrastrukturdatenbasis für unterschiedliche Planungsphasen eines Eisenbahninfrastrukturbetreibers können zudem ein durchgängiger Datenfluss garantiert und Qualitätsverluste durch Schnittstellenprobleme ausgeschlossen werden [Wen01].

Die exakte Modellierung der Fahrdynamik, die aufgrund der Sicherungstechnik resultierenden Belegungen der Züge und die ggf. entstehenden Konflikte sind nicht

nur bei dem rechnergestützten Trassenmanagement, sondern auch bei dem neuen Simulationsverfahren von zentraler Bedeutung. Es ist daher sinnvoll, bewährte Konzepte und Module auch in dem neuen DV-System zu verwenden. Für den Einsatz in einem Simulationssystem, das im Gegensatz zu FAKTUS und anderen interaktiven Systemen für das rechnergestützte Trassenmanagement mit einer automatischen Konfliktlösung arbeitet, sind allerdings Anpassungen und Erweiterungen erforderlich.

Eine weitgehende Kompatibilität beider Verfahren ermöglicht den wechselseitigen Austausch von beliebigen Daten und Algorithmen, der zu erheblichen Synergieeffekten führen kann. Neben der Nutzung vorhandener Ressourcen in dem neuen Simulationsverfahren ist es ebenfalls möglich, die neuen Algorithmen zur automatischen Konfliktlösung auch im Rahmen des rechnergestützten Trassenmanagements einzusetzen. Hierdurch kann ein großer Teil der von der DB Netz AG geforderten neuen Funktionalitäten [Kan00] realisiert werden. Dies gilt insbesondere für die Generierung von Lösungsvorschlägen, die Suche nach Sonderzugtrassen und die Überprüfung eines im Rahmen des rechnergestützten Trassenmanagements konstruierten Fahrplans auf seine Stabilität in der Betriebsabwicklung.

## 6.2 Simulationsparameter

Bei der Verwendung eines Simulationsalgorithmus müssen auch solche Parameter explizit festgelegt werden, die bei der rechnergestützten Trassenvergabe oder Disposition implizit vom Bearbeiter berücksichtigt werden, aber dennoch einen wesentlichen Einfluss auf die Gestalt und Qualität eines Fahrplans haben. Hierbei handelt es sich insbesondere um die Prioritäten der Zugfahrten und die Pufferzeiten.

### 6.2.1 Prioritäten der Zugfahrten

Mit Hilfe von Prioritäten kann die grundsätzliche Reihenfolge beim Einlegen der Zugfahrten in das Bildfahrplan-Blatt geregelt werden. Zu Zeiten der Deutschen Bundesbahn hatte jede Zugklasse einen expliziten Rang. Die Züge wurden entsprechend dieser Ränge eingelegt und Konflikte zwischen zwei Zügen aufgrund der Rangordnung gelöst. Hierdurch konnte eine hohe Auslastung der Infrastruktur erreicht werden.

Wie in Kapitel 2.4 beschrieben, ist seit der Bahnreform das Trassenmanagement die zentrale Schnittstelle zwischen den einzelnen Eisenbahnverkehrsunternehmen und

dem Infrastrukturbetreiber geworden. Aufgrund der unterschiedlichen Interessen kommt es zu Konflikten zwischen den Kundenwünschen und den Zielen des Infrastrukturbetreibers. Daher wurden in den verschiedenen Trassenpreissystemen Anreize für diejenigen Züge geschaffen, die bei der Fahrplankonstruktion durch planmäßige Wartezeiten benachteiligt werden, um so weiterhin eine hohe Auslastung der Infrastruktur erreichen zu können. So gibt es im jüngsten Trassenpreissystem 2001 verschiedene Produktarten, aus denen das Eisenbahnverkehrsunternehmen bei einer Trassenbestellung wählen kann. In Abhängigkeit von der Produktart kommt den Trassen eine unterschiedliche Priorität zu, die sich über einen zugehörigen Produktfaktor direkt auf den Trassenpreis auswirkt. Bei den vorherigen Systemen wurde versucht, mit der Planungsqualität bzw. der Fahrplanflexibilität vergleichbare Anreize zu schaffen.

Da die bestmögliche Auslastung der Eisenbahninfrastruktur aufgrund ihres hohen Fixkostenanteils betriebswirtschaftlich erforderlich ist, gibt es neben den Produktfaktoren weitere gesetzlich geregelte Konstruktionsprioritäten, durch die regelmäßige Verkehrsleistungen, vertraglich gebundene Trassen und fristgerechte Anmeldungen bevorzugt werden [BGBl97].

Auch wenn die klassischen Zugränge heute nicht mehr existieren, muss ein Simulationsverfahren weiterhin Prioritäten der einzelnen Züge bei der Simulation der Trassenvergabe und der Betriebsabwicklung berücksichtigen können. Theoretisch kann auch allen Zügen die gleiche Priorität gegeben werden, allerdings sollte dann nicht erwartet werden, dass ein marktgerechter Fahrplan entsteht.

### 6.2.2 Pufferzeiten

Die Qualität der Betriebsdurchführung ist maßgeblich von der Größe der im zugrunde liegenden Fahrplan vorhandenen Pufferzeiten abhängig. Als Pufferzeit bezeichnet man den minimalen zeitlichen Abstand zwischen den Sperrzeitentreppen zweier Zugfahrten, da dieser die Zeit angibt, um die sich der erste Zug verspäten kann ohne den zweiten zu behindern. Wie schon in Kapitel 2.2 erläutert, hat die Festlegung der Pufferzeiten innerhalb der Fahrplankonstruktion weitreichende Auswirkungen, da durch sie die Stabilität des Fahrplans in der Betriebsabwicklung auf Kosten der zur Verfügung stehenden Kapazität der Eisenbahnanlage erhöht werden kann. Bei falsch bemessenen Pufferzeiten, die keinen Beitrag zur Reduzierung der Verspätungsübertragung liefern, ist der Kapazitätsaspekt besonders problematisch.

Die Größe der im Fahrplan erforderlichen Pufferzeiten hängt stark von den im Betrieb zu erwartenden Verspätungen und der geforderten Betriebsqualität ab. Je genauer ein Fahrplan im Betrieb eingehalten wird, um so weniger Pufferzeiten sind erforderlich, wodurch wiederum mehr Fahrplantrassen realisiert werden können. So kann bei artreinen S-Bahn-Systemen schon mit geringen Pufferzeiten ein stabiler Betrieb realisiert werden, während dies in klassischen Mischverkehrsnetzen aufgrund des höheren Verspätungsrisikos nicht möglich ist.

Ohne eine genaue Betrachtung des zu erwartenden Betriebsablaufes können Pufferzeiten nicht korrekt bemessen werden. Wenn sich die Jahresfahrpläne und damit die resultierenden Zugfolgefälle nur geringfügig voneinander unterscheiden, ist es durchaus üblich, bei der Konstruktion eines neuen Fahrplans die Pufferzeitbemessung auf Erfahrungen über den Betriebsablauf der zurückliegenden Fahrplanperioden basieren zu lassen. Damit dennoch ein gewisses Niveau nicht unterschritten wird, können Mindestpufferzeiten verwendet werden. So sind bei der DB Netz AG grundsätzlich Mindestpufferzeiten von 1 Minute vorgeschrieben, die für bestimmte Zugfolgefälle auf 2 Minuten erhöht werden [DB01c]. Dabei handelt es sich um größere Geschwindigkeitsdifferenzen und um haltende Zügen, die von durchfahrenden Zügen überholt oder auf einer eingleisigen Strecke gekreuzt werden. Diese Regeln berücksichtigen weder das Verspätungsniveau der Züge noch die angestrebte Betriebsqualität. In Absprache mit der Betriebsführung können die genannten Mindestpufferzeiten zudem gekürzt werden.

Aufgrund der zentralen Bedeutung der Pufferzeiten werden diese im Rahmen der Eisenbahnbetriebswissenschaft explizit betrachtet. So stellt das in Kapitel 5.1.2 erläuterte analytische Verfahren von SCHWANHÄUßER einen mathematischen Zusammenhang zwischen dem Verspätungsniveau der Züge, den Mindestzugfolgezeiten, den mittleren Pufferzeiten und den zu erwartenden Folgeverspätungen her, anhand derer die Qualität des zu erwartenden Betriebsablauf abgeschätzt werden kann. Aufbauend auf dem klassischen Ansatz wurde zudem ein Verfahren zur Unterstützung der rechnergestützten Fahrplankonstruktion entwickelt, das die bei einer konkreten Trasse zu erwartenden Folgeverspätungen aufgrund verspäteter Nachbartrassen berechnet [Schw94b].

Zur Zeit wird in FAKTUS weder dieses Konzept berücksichtigt noch können Mindestpufferzeiten explizit vorgeschrieben werden. Der Bearbeiter kann aber zusätzliche, rein informative Linien im Abstand einer frei einstellbaren Sollpufferzeit um die aktuelle Sperrzeitentreppe legen. Bei der Bemessung ist der Bearbeiter ansonsten auf Erfahrungswerte und die beschriebenen Vorgaben angewiesen. Auf Nachfrage bestimmt das System allerdings die vorhandenen Pufferzeiten.

In einem neueren Ansatz wird die Größe der für einen Zugfolgefall notwendigen Pufferzeit auf 80 Prozent der zu erwartenden mittleren Einbruchsverspätung des ersten Zuges festgelegt, wobei dieser Wert sukzessive um die kumulierten Fahrzeitzuschläge reduziert wird [Kam01]. Aufgrund der fehlenden Berücksichtigung der angestrebten Betriebsqualität und einer möglichen Verspätung des zweiten Zuges wird mit diesem einfachen Ansatz die Bemessung der Pufferzeiten nicht adäquat modelliert.

Für ein automatisches Verfahren zur Fahrplankonstruktion sind explizite Vorgaben für die in einem Zugfolgefall zu verwendenden Pufferzeiten erforderlich. So können im Verfahren NSIM globale Mindestpufferzeiten festgelegt werden. Darüber hinaus erscheint die Verwendung von zugfolgespezifischen Pufferzeiten, die durch entsprechende Verfahren ermittelt werden, sinnvoll. Dies ist mit dem geschilderten Ansatz, die Pufferzeit in Abhängigkeit von der mittleren Einbruchsverspätung und dem Regelzuschlag zu bemessen, keinesfalls möglich. Dagegen kann aufbauend auf den Verfahren von SCHWANHÄUßER ein analytisches Modell realisiert werden, das in Abhängigkeit von den Einbruchsverspätungen und den für eine akzeptable Betriebsqualität zulässigen Folgeverspätungen die für einen Zugfolgefall erforderliche Pufferzeit zuverlässig berechnet.

Im Rahmen eines Simulationsverfahrens, das sowohl die Simulation der Fahrplanerstellung als auch die Simulation des Betriebsablaufes betrachtet, ist allerdings ein iteratives Vorgehen naheliegender. Im Rahmen der Simulation der Betriebsabwicklung können Verspätungsübertragungen und ungenutzte Pufferzeiten ermittelt werden. Durch eine Berücksichtigung dieser Ergebnisse ist es möglich, die Pufferzeiten bei der nächsten Simulation der Fahrplanerstellung besser zu verteilen. Mit Hilfe einer entsprechenden Iteration von Simulationsläufen können ausgehend von einer relativ einfachen Festlegung der Pufferzeiten in der ersten Simulation der Fahrplanerstellung mit Hilfe der Simulation der Betriebsabwicklung schnell sinnvolle Werte für die erforderlichen Pufferzeiten ermittelt werden.

Für den neuen Simulationsalgorithmus ist in erster Linie wesentlich, dass zugfolgespezifische Pufferzeiten zwischen den Sperrzeiten berücksichtigt werden. Das exakte Verfahren zur Bemessung ist an dieser Stelle zweitrangig.

## 6.3 Simulationsstrategie und Konfliktlösung

Nachdem die prinzipielle Entscheidung über die Verwendung des sperrzeitenbasierten Ansatzes auf der konzeptionellen Basis von FAKTUS getroffen wurde, kann nun ein neues Konzept entwickelt werden, das die bisherigen Verfahren verbessert. Hierzu soll die Vorgehensweise der existierenden, asynchronen Simulationsverfahren und die Funktionalität von FAKTUS im Detail vorgestellt werden.

### 6.3.1 Vorgehen in bestehenden asynchronen Verfahren

Wie schon in Kapitel 4.3.2 beschrieben, können mit den Simulationsverfahren STRESI und NSIM wahre Fahrpläne auf der Basis von Sperrzeitentreppen automatisch erzeugt werden.

Bei beiden Verfahren werden die einzelnen Züge während der Simulation sukzessive in der Reihenfolge ihrer Ränge in das Bearbeitungsblatt eingelegt. Die Unterschiede in den betrachteten Infrastrukturtopologien führen bei der Reihung der Zugfahrten mit gleicher Priorität zu verschiedenen Vorgehensweisen. Bei STRESI können aufgrund der ausschließlich betrachteten zweigleisigen Strecken die Wunschabfahrtzeiten der Züge verwendet werden. In einem Netz führt der Vergleich der Start- bzw. Einbruchszeitpunkte aufgrund der unterschiedlichen Laufwege und Laufweiten zu einer unbefriedigenden Reihenfolge, da grundsätzlich der Zug, der schon länger im betrachteten Netz unterwegs ist, früher eingelegt und damit bevorzugt wird. Dies kann aber nicht generell erwünscht sein. Um dieses Problem zu lösen, müssen in NSIM für die einzelnen Züge Betriebsstellen als so genannte Sortierquerschnitte definiert werden, damit anhand der dort resultierenden Durchfahrtzeit der Züge in ihrer Wunschlage eine eindeutige Reihung vorgenommen werden kann [Schu85].

Tritt bei einem neu eingelegten Zug aufgrund der Überschneidung von Sperrzeiten ein Konflikt auf, werden bei beiden Verfahren in einer starren Reihenfolge verschiedene Lösungsansätze durchlaufen.

Bei NSIM kann der Anwender neben dem Regellaufweg eines Zuges weitere alternative Laufwege zusammen mit einer Hierarchieziffer definieren [Schu85]. Vor der eigentlichen Simulation werden für alle Züge die Sperrzeiten für alle angegebenen Laufwege berechnet und in Dateien abgespeichert. Bei einem Konflikt wird dann zuerst versucht, mit Hilfe vorberechneter Sperrzeiten der alternativen Laufwege den Konflikt zu lösen. Hierbei wird in der Reihenfolge ihrer Hierarchie vorgegangen. Gelingt es so, den Konflikt zu lösen, bricht die Lösungssuche ab und der entspre-

chende Laufweg wird gewählt. Ist die Verwendung alternativer Laufwege überhaupt nicht erfolgreich, wird versucht, den Konflikt durch Verwendung einer vorliegenden Warteposition zu lösen. Hierfür kann der Anwender vor der Simulation Wartepositionen in den einzelnen Laufwegen definieren und mit Prioritäten versehen. Nun wird für alle konfliktfrei erreichbaren Wartepositionen in der Reihenfolge der Prioritäten untersucht, ob durch eine entsprechende Haltzeitverlängerung der Konflikt lösbar ist. Gelingt dies, wird diese Konfliktlösung verwendet. Anderenfalls wird versucht, den Zug erst zu einem späteren Zeitpunkt einzulegen. Der Algorithmus arbeitet also in einer sehr starren Reihenfolge, die durch Vorgaben des Anwenders in Details beeinflussbar ist und viele Benutzereingaben erfordert. Die explizite Festlegung der möglichen Laufwege und Wartepositionen für jeden Zug mit der Vergabe von zugehörigen Prioritäten insbesondere bei der Betrachtung von größeren Teilnetzen ist für den Bearbeiter sehr aufwändig und erfordert eine genaue Kenntnis der in der Simulation zu erwartenden Konflikte, da ansonsten keine sinnvollen Simulationsergebnisse zu erwarten sind.

Da STRESI nur für zweigleisige Strecken konzipiert ist und zudem Standardbahnhöfe verwendet [Schw00], wird hier ein etwas anderes Verfahren eingesetzt. Für die Züge werden die Start- und Zielbetriebsstellen definiert. Zusätzlich ist anzugeben, in welcher Betriebsstelle und welchem Gleis der Zug halten soll und in welchen Gleisen er überholt werden darf. Vor der Simulation werden dann wiederum für alle Züge die Sperrzeiten auf dem Hauptlaufweg und zwischen den einzelnen Überholungspositionen berechnet und in Dateien abgespeichert. Tritt nun ein Konflikt im Bahnhof auf, wird versucht, diesen durch einen Überholungshalt in einem anderen Gleis zu lösen. Ist dies nicht erfolgreich oder liegt der Konflikt auf der Strecke, wird in einer rückliegenden Warteposition der Halt des Zuges verlängert. Dabei werden die Wartepositionen der zurückliegenden Bahnhöfe entsprechend der Entfernung zum Konflikt in der Reihenfolge seitenrichtiges, seitenmittiges und seitenfalsches Überholungsgleis durchsucht. Lässt sich mit Hilfe einer Warteposition der Konflikt lösen, wird diese gewählt und die Suche bricht sofort ab. Anderenfalls wird der gesamte Zuglauf so weit zeitlich verschoben, bis kein Konflikt mehr auftritt. Auch bei diesem Verfahren liegt ein starrer Konfliktlösungsalgorithmus vor, der durch die Wahl der Zielgleise und Überholungsmöglichkeiten in den einzelnen Betriebsstellen vom Anwender in Grenzen beeinflusst werden kann.

Die starre Reihenfolge bei der Konfliktlösung und der Abbruch nach der ersten erfolgreichen Konfliktlösung bei den vorhandenen asynchronen Verfahren STRESI und NSIM ist sehr inflexibel und kann zu schlechten Ergebnisse führen [Meh92]. So gibt es Fälle, in denen eine kurze Haltzeitverlängerung wesentlich weniger Zusatzverspä-

tung erzeugt als die beste Wahl eines anderen Fahrwegs, und andere Fälle, in denen genau das Gegenteil der Fall ist. Um dieses Problem zu umgehen, soll in dem neuen Verfahren eine grundlegend andere Vorgehensweise verwendet werden.

Mit den bisher beschriebenen Ansätzen kann zudem die Kapazität eingleisiger Strecken nicht ausreichend genutzt werden. Die einzelnen Zugfahrten werden entsprechend einer Reihung nacheinander über ihren gesamten Laufweg in das „Bearbeitungsblatt“ eingelegt. Dieses Verfahren führt allerdings bei eingleisigen Strecken schnell zu Belegungen durch abwechselnde Fahrten, die alle weiteren Zugfahrten unmöglich machen. Im Gegensatz zu NSIM ist dieses Problem in STRESI allerdings irrelevant, da es nur für zweigleisige Strecken konzipiert wurde.

Der asynchrone Simulationsalgorithmus von NSIM wurde daher um synchrone Elemente ergänzt, die eine optimale Disposition zwischen sich begegnenden, gleichrangigen Fahrten gewährleisten sollen. Die Sperrzeitentreppen von Zügen derselben Rangstufe, die gleichzeitig im Untersuchungsraum unterwegs sind, werden nun abwechselnd und jeweils nur abschnittsweise weiterverfolgt [ISW98]. Die Abschnitte werden vom Bearbeiter mit Hilfe so genannter Brechpunkte definiert. An diesen wird das Einlegen einer Zugfahrt zunächst unterbrochen und anhand des FIFO-Prinzips entschieden, welche Zugfahrt den jeweiligen Streckenabschnitt als nächste belegen soll. Durch diese Regelung sollen bei Behinderungen die geringsten Wartezeiten hervorgerufen werden.

Allerdings kann das abschnittsweise Einlegen der Zugfahrten dazu führen, dass bei der Belegung eines späteren Teilabschnittes keine unmittelbare Konfliktlösung möglich ist, und daher bereits eingelegte Teilabschnitte und realisierte Konfliktlösungen zurückgenommen werden müssen. Treten bei dem späteren Wiedereinlegen ähnliche Konflikte auf, sind aufgrund des starren FIFO-Prinzips sogar Blockierungen möglich.

### 6.3.2 Konflikterkennung und Konfliktlösung bei FAKTUS

Da das neue Simulationsverfahren auf einem interaktiven Fahrplankonstruktionsprogramm aufsetzt und wie dieses konfliktfreie Fahrpläne liefern soll, ist es von grundsätzlichem Interesse, die dem Anwender in FAKTUS zur Verfügung stehenden Ansätze zur Konfliktlösung genauer zu untersuchen. In Abb. 13 ist ein typischer, von FAKTUS ermittelter Konflikt zwischen zwei Zügen dargestellt, bei dem sich die zugehörigen Sperrzeitentreppen überschneiden.

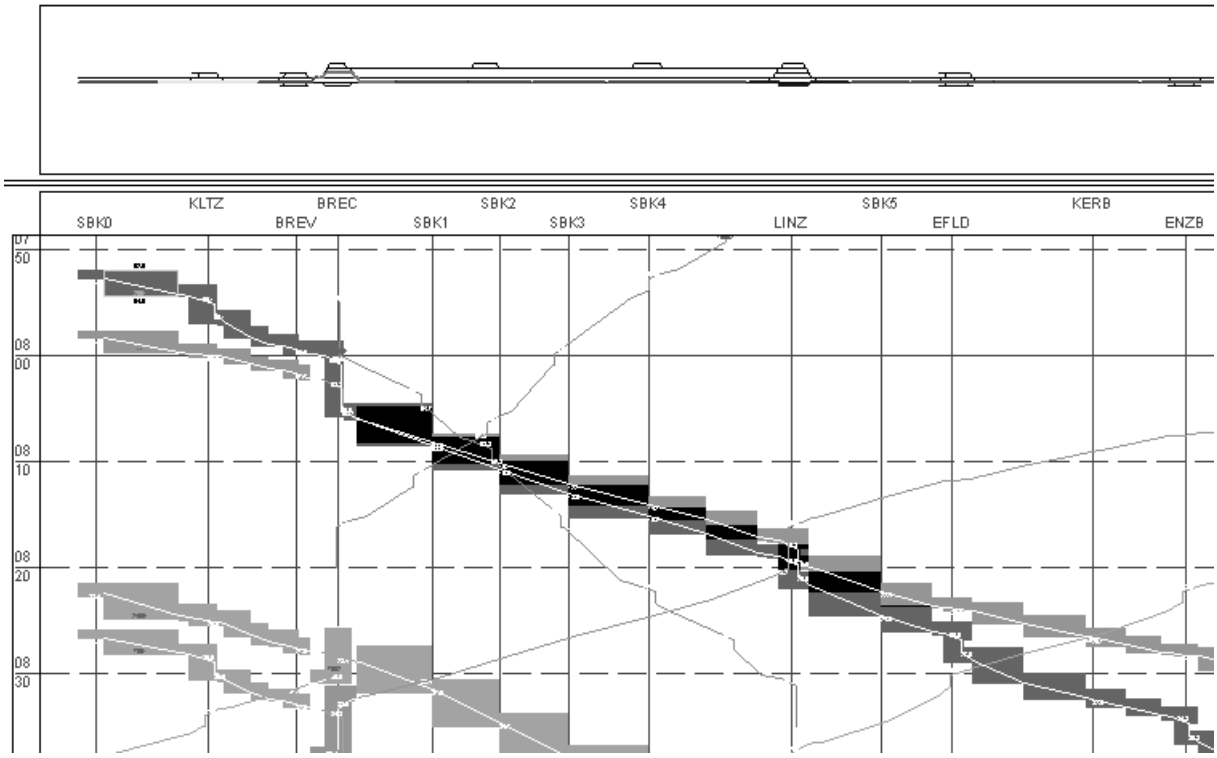


**Abb. 13: Beispiel für einen Konflikt in FAKTUS**

Mögliche Ansätze zu einer manuellen Konfliktlösung in FAKTUS sind

- die Änderung des Laufweges, d. h.
  - ein anderer Fahrweg in einer Betriebsstelle oder
  - eine andere Reihung der befahrenen Betriebsstellen,
- die Änderung der Haltzeiten, d. h.
  - die Verlängerung bestehender Haltzeiten oder
  - das Einfügen zusätzlicher Halte,
- die Änderung der Fahrzeiten, d. h.
  - das Biegen der Zugfahrt durch Zuschläge oder
  - die Änderung der Geschwindigkeit eines Zuges, und
- die Änderung der zeitlichen Lage einer Zugfahrt.

Diese unterschiedlichen Ansätze können natürlich auch kombiniert verwendet werden, um zu einer möglichst optimalen Lösung zu gelangen. Kann ein Konflikt auf keine sinnvolle Weise gelöst werden, bleibt als letztes immer noch die Möglichkeit, eine Zugfahrt nicht weiter zu betrachten und mit ihrer Sperrzeitentreppe aus dem Bearbeitungsblatt zu entfernen. In diesem Fall kann allerdings kein konfliktfreier

Fahrplan entsprechend aller Trassenbestellungen realisiert werden und es sind Veränderungen an diesen erforderlich.

Bei Konfliktlösungen können zwei unterschiedliche Konstruktionsrichtungen verwendet werden. Neben der standardmäßigen Lösung der Konflikte mit Fixierung der Sperrzeiten vor dem Konflikt, dem so genannten Vorwärtskonstruieren, wird auch das korrespondierende Rückwärtskonstruieren unterstützt, bei dem die Sperrzeiten hinter dem Konflikt fixiert werden. Hierdurch ist es möglich, Trassen für Züge, deren Wunschlage mit einer Ankunftszeit verbunden ist, einfacher zu konstruieren. In FAKTUS muss für jeden Zug eine Wunschlage festgelegt werden. Da die minimalen Belegungsdauern der einzelnen Elemente des gewünschten Laufwegs unabhängig von zeitlichen Verschiebungen sind, kann die Wunschlage eindeutig über eine Abfahrts- oder Ankunftszeit an einer frei wählbaren Betriebsstelle definiert werden. Dieses sollte die Zeit sein, zu der der Besteller das wirtschaftliche Optimum für die jeweilige Zugfahrt erreicht [Brü95]. Im Allgemeinen handelt es sich hierbei um eine Abfahrtzeit am Laufweganfang oder eine Ankunftszeit am Laufwegende. Die Wunschlage ist eine zentrale Eigenschaft jeder Trasse und wird bei der Konstruktion und der anschließenden Qualitätsauswertung von FAKTUS berücksichtigt.

Neben den beschriebenen Konflikten, die auf einer Überschneidung von Sperrzeitentreppen beruhen und daher auch als Belegungskonflikte bezeichnet werden, betrachtet FAKTUS zudem so genannte Verknüpfungskonflikte. Verknüpfungen sind vom Trassenbesteller geforderte Eigenschaften der Trassen, die sich auf Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Zugfahrten oder auf geforderte Ankunfts- oder Abfahrtzeiten in Betriebsstellen beziehen. Das wichtigste Beispiel ist der Anschluss zwischen zwei Zügen zur Gewährleistung eines Reisendenüberganges. Aber auch die Vertaktung einzelner Trassen und die Berücksichtigung der geplanten Umläufe von Triebfahrzeugen, Wagenmaterial oder Personal kann in FAKTUS durch Verwendung entsprechender Verknüpfungen gefordert und überprüft werden.

Im ursprünglichen Konzept von FAKTUS werden Verknüpfungen erst im Ausblick als mögliche Erweiterungen genannt [Brü95] und auch in der jetzigen Realisierung werden sie anders behandelt als die Belegungskonflikte. Diese Ambivalenz hängt mit der Aufgabenteilung zwischen Trassenbesteller und Infrastrukturbetreiber und dem daraus resultierenden Spannungsfeld zwischen Kundenwünschen und Infrastrukturauslastung zusammen, das schon in Kapitel 2.4 beschrieben wurde. Im Blickpunkt des Eisenbahninfrastrukturunternehmens liegt die bestmögliche Auslastung seiner Infrastruktur unter Berücksichtigung der Trassenwünsche, die das Eisenbahnverkehrsunternehmen im Rahmen seiner Fahrlagenplanung aufeinander abgestimmt hat. Im zentralen Konstruktionsfenster von FAKTUS werden die einzelnen Trassen

mit Hilfe der Sperrzeitentreppen und die sich bei Überschneidungen ergebenden Belegungskonflikte direkt angezeigt, während Verknüpfungen und die resultierenden Verknüpfungskonflikte im Wesentlichen separat behandelt werden.

In einem eigenständigen Programmteil können entsprechende Verknüpfungen definiert, verändert und überprüft werden. Darüber hinaus werden bei einigen Verknüpfungsarten zusätzlich Meldungen auf dem Bildschirm ausgegeben, wenn durch die zuletzt ausgeführte Änderung an einer Trasse eine Verknüpfung, beispielsweise ein Anschluss, verletzt wird. Zur Lösung der Verknüpfungskonflikte müssen analog zu den Belegungskonflikten die Sperrzeiten der Züge vom Bearbeiter mit Hilfe der schon genannten Methoden angepasst werden.

Bei anderen Verknüpfungsarten, insbesondere bei Taktverknüpfungen, wird der Bearbeiter sogar bei jeder Anpassung eines betroffenen Zuges über ein zwingend zu bearbeitendes Auswahlmenü explizit gefragt, wie sich die Änderungen auf die verknüpften Züge beziehen sollen. Insbesondere dieses Nachfragen bedeutet einen starken Eingriff in den ansonsten in keiner Weise reglementierten Bearbeitungsablauf eines Konstrukteurs und wurde daher im ursprünglichen Konzept von FAKTUS abgelehnt.

Dem neuen Simulationsverfahren stehen zur Erkennung und insbesondere zur Lösung beliebiger Konflikte keine grundsätzlich anderen Optionen zur Verfügung. Es kann allerdings schneller Varianten überprüfen als dies bei einer rechnergestützten Bearbeitung mit manueller Konfliktlösung möglich ist.

### 6.3.3 Globale Simulationsstrategie des neuen Verfahrens

Der grundlegende Zielkonflikt zwischen den Trassenbestellern und dem Infrastrukturbetreiber hat wesentlichen Einfluss auf das Trassenmanagement. So kann der Infrastrukturbetreiber einerseits die für ihn zentrale optimale Auslastung der Infrastruktur nur unter Berücksichtigung aller Vorgaben der Trassenbesteller betrachten. Andererseits ist die Planung der Anschlüsse und die Bemessung der hierfür erforderlichen Synchronisationszeiten[18] eine zentrale Aufgabe der Fahrlagenplanung des Trassenbestellers, die nicht komplett in das Trassenmanagement verlagert werden kann.

[18] Eine Synchronisationszeit ist die Beförderungszeitverlängerung, die zur verkehrlichen Abstimmung einer Zugfahrt auf eine oder mehrere andere erforderlich ist, z. B. zur Herstellung von Anschlüssen oder zur Harmonisierung von Taktverkehren [DB01c].

Das neu konzipierte Simulationsverfahren soll nicht nur im Trassenmanagement, sondern analog zu den existierenden sperrzeitenbasierten Verfahren auch im Rahmen eisenbahnbetriebswissenschaftlicher Untersuchungen eingesetzt werden, bei denen planmäßige und außerplanmäßige Wartezeiten zur Infrastrukturbemessung von zentraler Bedeutung sind. Die hierbei als Forderungen an die Infrastruktur betrachteten Trassenwünsche sind aufgrund des Planungsvorlaufes und der Lebensdauer der Infrastruktur zumindest teilweise fiktiv und der erstellte konfliktfreie Fahrplan, der vermutlich nie Grundlage einer Betriebsabwicklung sein wird, ist in erster Linie ein hochwertiges Hilfsmittel zur Ermittlung planmäßiger Wartezeiten. Die alleinige Betrachtung von Belegungskonflikten in den entsprechenden eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Verfahren ist vollkommen unproblematisch, da weder rückwärts konstruierte Trassen noch Verknüpfungen die prinzipiellen Anforderungen des Zugprogramms an eine zugrunde liegende Infrastruktur ändern.

Das neue Simulationsverfahren soll in unterschiedlichen Anwendungsgebieten eingesetzt werden. Um die verschiedenen Anforderungen adäquat berücksichtigen zu können, ist ein mehrstufiges Vorgehen erforderlich. Zunächst wird eine verbesserte Simulationsstrategie entworfen, bei der analog zu den bestehenden sperrzeitenbasierten Verfahren nur Belegungskonflikte betrachtet werden. Dieser neue Ansatz kann im Rahmen klassischer Simulationen der Fahrplanerstellung und der Betriebsabwicklung verwendet werden, wobei die Kompatibilität mit den Konzepten der existierenden Systeme und den zugehörigen Kenngrößen von zentraler Bedeutung ist. Auf der Basis der neuen Simulationsstrategie werden die für das Trassenmanagement erforderlichen Erweiterungen und konkrete DV-Systeme konzipiert, die die heutige rechnergestützte Bearbeitung auf unterschiedlichen Ebenen automatisieren.

Im Gegensatz zu den bestehenden asynchronen Simulationsverfahren sollen die Konflikte bei dem neuen Simulationsverfahren nicht mit Hilfe vorberechneter Sperrzeitentreppen gelöst werden. Stattdessen soll das durch die Infrastrukturmodellierung mit dem Spurplan-Graphen und der Fahrzeit- und Belegungsrechnung von FAKTUS geschaffene Potential voll ausgenutzt werden, indem jedem Zug während der Simulation alle vorhandenen Fahrmöglichkeiten zur Verfügung gestellt werden. Bei der alternativen Vorberechnung müssen die Sperrzeitentreppen aller in der Simulation verwendbaren Laufwege dagegen vor der Simulation explizit berechnet und abgespeichert werden, weshalb aus Aufwandsgründen eine Beschränkung auf ausgewählte Fahrwege vorgenommen werden muss. Zusätzlich entfällt der Zwang, die Züge zu Modellzügen zusammenzufassen, um die Anzahl der vorberechneten Sperrzeitentreppen weiter reduzieren zu können, wie dies in STRESI, NSIM, aber auch bei der Fahrplanerstellung mit SIMU++ der Fall ist. Eine genaue Betrachtung

aller möglichen Fahrwege und der exakten Zugparameter entspricht zudem dem Ansatz des exakten Trassenmanagementsystems FAKTUS, wodurch eine Kompatibilität beider Verfahren bezüglich der Zugfahrten erreicht wird, die für die angestrebten Synergieeffekte unbedingte Vorraussetzung ist.

Das neue Simulationsverfahren beruht auf dem sperrzeitenbasierten Ansatz und soll Prioritäten beim Einlegen der einzelnen Zugfahrten berücksichtigen. Daher werden vor der eigentlichen Simulation alle Zugfahrten entsprechend ihrer Prioritäten sortiert und dann alle Zugtrassen einer Prioritätsstufe vollständig in den Bildfahrplan eingelegt. Erst danach werden die aufgetretenen Konflikte sukzessive in ihrer zeitlichen Reihenfolge gemäß dem im folgenden Kapitel 6.3.4 ausführlich beschriebenen Verfahren gelöst.

Durch das gebündelte Einlegen entfällt direkt das bei der Betrachtung von Netzstrukturen auftretende Problem, die Zugfahrten mit gleicher Priorität in eine sinnvolle Reihenfolge bringen zu müssen. Das bedeutet, es müssen weder Sortierquerschnitte wie in NSIM definiert noch die für Netze problematischen Start- bzw. Einbruchszeitpunkte der Züge verwendet werden.

Zudem kann durch das komplette Einlegen eine verbesserte Variante des in Kapitel 6.3.1 vorgestellten abschnittsweisen Einlegens zur realistischen Betrachtung eingleisiger Strecken realisiert werden. Ursprünglich legten alle asynchronen Verfahren die Zugfahrten entsprechend einer Reihung nacheinander über ihren gesamten Laufweg in das „Bearbeitungsblatt“ ein. Da dieses Vorgehen nicht abschnittsweise arbeitet, führt es bei eingleisigen Strecken schnell zu Belegungen durch abwechselnde Fahrten, die vorzeitig weitere Zugfahrten unmöglich machen. Derselbe negative Effekt tritt natürlich auch bei iterativ durchgeführten, automatischen Trassensuchen auf, wie sie beispielsweise für SIMU++ vorgeschlagen werden [Hau00].

Durch das komplette Einlegen und das sukzessive Lösen der Konflikte werden die Zugfahrten bei dem neuen Verfahren nicht grundsätzlich abschnittsweise betrachtet. Stattdessen werden die Abschnitte erst bei der Lösung eines Konfliktes berücksichtigt, da dieses zur realistischen Behandlung eingleisiger Strecken vollkommen ausreichend ist und zu einem effizienteren Vorgehen führt.

Ist es im Rahmen einer Konfliktlösung erforderlich, dass ein Zug eine planmäßige Wartezeit erhält, soll diese möglichst im rückliegenden Bahnhof abgewartet werden. Ein Abbummeln der Wartezeit auf der Strecke erhöht die erforderliche Belegungszeit und senkt die im Weiteren zur Verfügung stehende Trassenkapazität der Strecke. Im neuen Verfahren werden aufgrund der zentralen Rolle der Haltzeitverlängerungen die

aus den analytischen Verfahren bekannten Überholungsabschnitte zur Unterteilung der Zugfahrten in Abschnitte verwendet.

Ein Überholungsabschnitt startet und endet an einem Überholungsbahnhof oder dem Rand des betrachteten Netzes. Unter einem Überholungsbahnhof versteht man eine Position, an der ein Zug hält und dabei überholt (oder gekreuzt) werden kann. Überholungsabschnitte sind abhängig von den Halten des Zuges und weiteren Zugparametern, wie seiner Länge und Traktionsart.

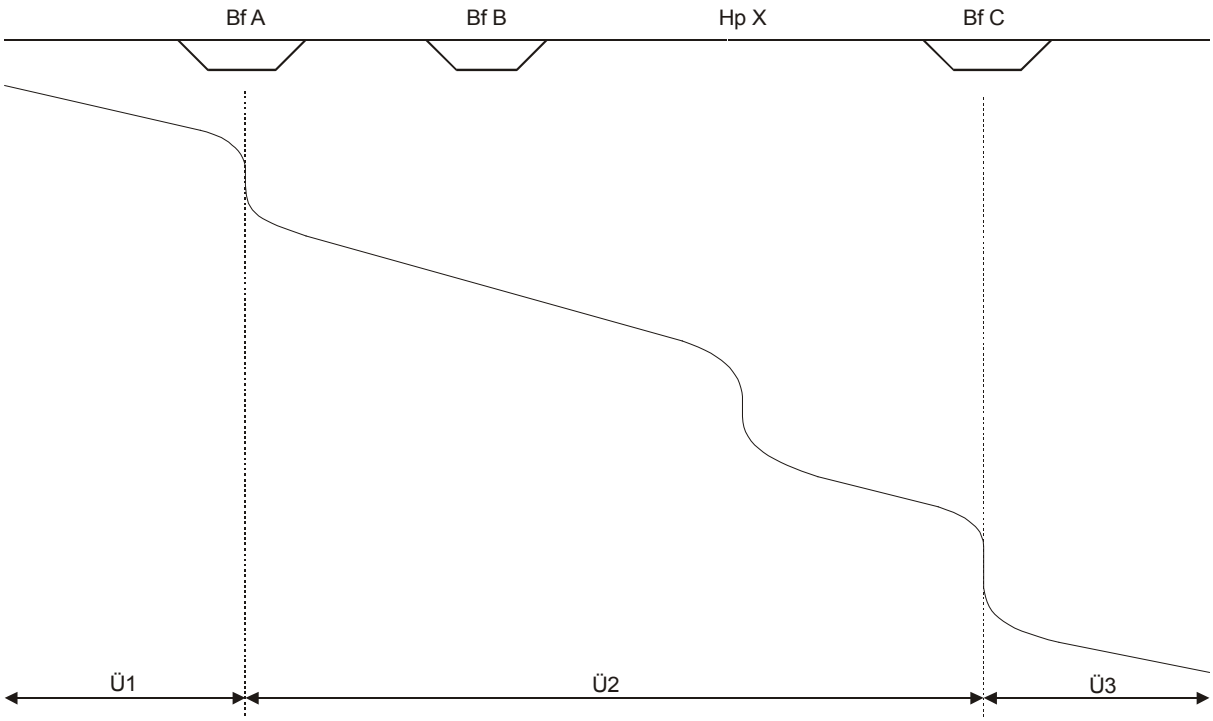


**Abb. 14: Überholungsabschnitte eines Zuges**

In Abb. 14 ist eine Zugfahrt zusammen mit ihren Überholungsabschnitten dargestellt. Der erste Überholungsabschnitt beginnt am Anfang des betrachteten Netzes und verläuft bis zum ersten Halt des Zuges im Bahnhof A. Der anschließende endet erst in dem nächsten Bahnhof, in dem der Zug hält und dabei auch überholt werden kann. Der Halt des Zuges an dem Haltepunkt X ist also nicht maßgebend. Der letzte Überholungsabschnitt endet wiederum mit dem Netzende.

Die vorhandenen Konflikte werden bei dem neuen Verfahren so gelöst, dass die betrachteten Züge in ihrem aktuellen Überholungsabschnitt keinen weiteren Konflikt haben. Ein späterer Konflikt führt daher im Allgemeinen zu einer Verlängerung in einer folgenden Warteposition. Da die Konflikte in ihrer zeitlichen Reihenfolge unter Betrachtung der Überholungsabschnitte gelöst werden, entstehen keine Fahrpläne mit zu geringer Kapazitätsauslastung.

Durch das abschnittsweise Vorgehen bei der Konfliktlösung ist es analog zu NSIM allerdings möglich, dass Konfliktlösungen realisiert werden, die zu einem späteren Simulationszeitpunkt zurückgenommen werden müssen, da sie für den weiteren Verlauf des Zuges nicht sinnvoll sind. Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn ein alternativer Fahrweg in einer Betriebsstelle am Ende eines Überholabschnitts gewählt wird, der eine Verlängerung des bestehenden Halts aufgrund eines späteren Konflikts nicht zulässt. In diesem Fall wird bei der späteren Konfliktlösung der betrachtete Überholungsabschnitt nach vorne vergrößert, um so eine gute Konfliktlösung für den gesamten Bereich zu erreichen. Durch die Vergrößerung des betrachteten Abschnittes kann es insbesondere auch nicht zu dauerhaften Blockierungen im Simulationsablauf kommen.

Allerdings kann es sich nach einigen erfolgreichen Konfliktlösungen zu Beginn des Zuglaufes herausstellen, dass ein Zug aufgrund fehlender Kapazität eines später zu durchlaufenden Netzteils nicht weiter betrachtet werden kann und daher gelöscht werden muss. In diesem Fall können Trassen anderer Züge noch Veränderungen gegenüber ihrer Bestellung enthalten, die auf Konfliktlösungen mit dem jetzt gelöschten Zug beruhen und daher zurückgenommen werden müssen. Hierzu ist eine Dokumentation der Veränderungen an den bestellten Trassen erforderlich.

### 6.3.4 Lösung eines einzelnen Konfliktes

Nach der Vorstellung der globalen Strategie zur Simulation kann nun die Lösung eines einzelnen Konfliktes beschrieben werden. Der Anwender soll in dem neuen Verfahren nicht alle möglichen Laufwege des Zuges explizit definieren müssen. Stattdessen werden diese von dem neuen Verfahren unter Berücksichtigung der zugehörigen Trassenbestellung selbständig ermittelt. Erst die moderne Rechnertechnik erlaubt diese Vorgehensweise, da sie die Berechnung der aktuellen Sperrzeiten innerhalb der Simulation voraussetzt. Die Berechnung der Fahr- und Belegungszeiten in FAKTUS bietet zudem gute Vorraussetzungen für die notwendigen Erweiterungen.

Wie schon in Kapitel 6.3.1 erläutert, führt die starre Vorgehensweise der bestehenden asynchronen Simulationsverfahren zu schlechten Ergebnissen bei der automatischen Konfliktlösung. Alternativ wurde vorgeschlagen, dass der Anwender für jeden Zug die Reihenfolge der anzuwendenden Konfliktlösungsstrategien explizit festlegen muss [Meh92]. Dieses Vorgehen ist bei der Betrachtung größerer Teilnetze allerdings nicht besonders benutzerfreundlich und vernachlässigt zudem, dass ein fester Satz

von Hierarchieziffern zur optimalen Lösung aller möglichen Konfliktfälle ebenfalls nicht geeignet sein kann.

Bei dem neuen Verfahren werden für jeden Konflikt unterschiedliche Alternativen zur Konfliktlösung berechnet, mit Hilfe einer lokalen Zielfunktion bewertet und die beste Lösung wird realisiert. So ist es möglich, den Konflikt optimal zu lösen, ohne eine starre Reihenfolge oder eine explizite Steuerung durch den Anwender einzusetzen. Bei der Ermittlung von Lösungsalternativen werden die bislang getrennt betrachteten Konfliktlösungsansätze „Änderung des Laufweges“ und „Änderung der Haltzeiten“ miteinander verknüpft. Dieser Ansatz wird der Tatsache gerecht, dass jede Zugfahrt auf einem Laufweg beruht und Haltzeiten nie unabhängig von diesem definiert werden können.

Nach dem neuartigen Konzept zur Konfliktlösung werden für die bisherigen Laufwege der beiden Züge und mögliche alternative Laufwege die notwendigen Veränderungen an den Haltzeiten berechnet, die erforderlich sind, um alle Konflikte des betrachteten Zuges im aktuellen Überholungsabschnitt zu lösen. Die betrachteten Konfliktlösungen beziehen sich jeweils nur auf einen Zug.

Zur Lösung eines Konfliktes wäre auch die Berechnung der notwendigen Anpassungen zweier Zugfahrten denkbar. Diese ist technisch durchaus möglich, aber der notwendige Aufwand und der zusätzliche Nutzen stehen in keinem akzeptablen Verhältnis zueinander. Man müsste zu beiden am Konflikt beteiligten Zugfahrten mögliche Änderungsoptionen berechnen, die für sich genommen den Konflikt nicht zu lösen brauchen, und diese mit denen des anderen Zuges beliebig kombinieren. Hierdurch entstehen eine Vielzahl von Handlungsalternativen, von denen die wenigsten den Konflikt lösen. Zudem kann die Berechnung der Änderungen eines Zuges nicht zielgerichtet erfolgen, da der Konflikt nicht gelöst werden muss. Es muss bei diesem Ansatz also ein großer, schwer abgrenzbarer Suchraum betrachtet werden, der nur in seltenen Fällen zu einem besseren Ergebnis führen kann. Daher wird diese Vorgehensweise auch bei der manuellen Fahrplankonstruktion nur in extremen Ausnahmefällen verwendet. Außerdem würde sich bei der Betrachtung von zwei Zügen direkt die Frage aufdrängen, warum man nicht weitere, nur indirekt am Konflikt beteiligte Züge, auch berücksichtigt. Diese theoretische Möglichkeit kann zu keinem effizienten Verfahren führen und geht auch an der Realität der manuellen Fahrplanerstellung vorbei.

Ist der Konflikt mit den bisherigen Ansätzen noch nicht lösbar, können Fahrzeiten geändert und Betriebshalte eingelegt werden. Erst wenn es gar keine Möglichkeit gibt, einen Konflikt sinnvoll zu lösen, muss entschieden werden, welche der beteilig-

ten Zugfahrten nicht weiter betrachtet werden soll. Die zugehörige Sperrzeitentreppe ist dann aus dem Bearbeitungsblatt zu entfernen. In diesem Fall kann das bestellte Zugprogramm nicht entsprechend der Vorgaben realisiert werden und es sind Veränderungen an diesen erforderlich.

Die Konfliktlösung durch Änderung der Fahrzeiten eines Zuges ist aus eisenbahnbetriebswissenschaftlicher Sicht problematisch, da die bei der Fahrplanerstellung auftretenden planmäßigen Wartezeiten in die Bahnhöfe und nicht auf die Strecke gelegt werden sollen. Nur so kann ein qualitativ hochwertiger Fahrplan unter Berücksichtigung der gewünschten Prioritäten und Geschwindigkeiten (so genannter Zugmix) entstehen. Anderenfalls würde wegen der gestiegenen Fahr- und Mindestzugfolgezeiten die Kapazität der Strecken bezogen auf den bestellten Zugmix künstlich gesenkt werden. Aufgrund der an die langsameren Züge angepassten Geschwindigkeitsprofile könnten so mehr langsamere Züge auf der Strecke fahren und der Durchsatz der Strecke steigt. Daher wird diese Methode zur Konfliktlösung beim rechnergestützten Trassenmanagement in der Praxis insbesondere in Bereichen mit mangelnder Kapazität verwendet. Genau genommen werden hierdurch aber die bestellten Geschwindigkeitsprofile der Zugfahrten nicht korrekt berücksichtigt und die Möglichkeit, weitere schnelle Zugfahrten einlegen zu können, verringert sich. Erst durch ein neues Wunschprogramm mit entsprechend verändertem Zugmix kann korrekterweise ein hochwertiger Fahrplan mit geänderten Geschwindigkeitsprofilen erzeugt werden. In einer klassischen Simulation der Fahrplanerstellung, die insbesondere der Ermittlung von Kapazitätsengpässen dient, werden daher Änderungen der Fahrzeiten zur Konfliktlösung nicht verwendet. Im Rahmen eines automatischen Trassenmanagements sollte diese Art der Konfliktlösung aber zumindest als Option vorhanden sein.

Abschließend müssen für die einzelnen Alternativen zur Lösung eines Konfliktes die aufgrund der veränderten Fahrzeiten und der erforderlichen Haltzeitveränderungen resultierenden Zusatzverspätungen ermittelt werden, damit diese als Parameter bei der Bestimmung einer optimalen Konfliktlösung verwendet werden können.

### 6.3.5 Bewertung der ermittelten Konfliktlösungen

Nach der Ermittlung möglicher Alternativen zur Konfliktlösung muss nun diejenige ausgewählt werden, die tatsächlich verwendet werden soll. Hierzu sind alle berechneten Konfliktlösungen mit Hilfe von Kriterien zu bewerten, die dann in einer Zielfunktion zur Bestimmung des Optimums verwendet werden. Wie schon im Zusammenhang mit der automatischen Fahrplanerzeugung erläutert wurde, konnte bislang

keine grundsätzlich gültige Zielfunktion für die mathematischen Verfahren gefunden werden.

Da das neu entwickelte Verfahren auf der Ebene von Sperrzeitentreppen arbeitet und die Zielfunktion dem Vergleich konkreter Alternativen zur Konfliktlösungen dient, liegt hier eine grundliegend andere Situation vor, die große Analogien mit dem rechnergestützten Trassenmanagement besitzt. Daher sollen Kriterien aus diesem Bereich auch bei dem neuen Verfahren verwendet werden und gewichtet in die Zielfunktion eingehen.

Es existieren eine Reihe sinnvoller Kriterien:

- Die Beförderungszeitverlängerung beschreibt die sinkende Attraktivität der Zugfahrt für den Kunden. Sie wird in vielen Verfahren verwendet.
- Die Hierarchieziffern der verwendeten Betriebsstellenfahrwege ermöglichen eine Berücksichtigung der Erschwernis für das Einlegen weiterer Züge, da seitenfalsche Überholungsgleise und Betriebsstellenfahrwege der Gegenrichtung, die schnell zu Problemen bei weiteren Zügen führen können, besonders kleine Hierarchieziffern haben.
- Führt eine Konfliktlösung direkt zu einem Konflikt in dem nächsten Überholungsabschnitt, dann sollte sie schlechter beurteilt werden, auch wenn sie den aktuellen Konflikt gut löst. Auf diesem Weg kann die Suche nach einem lokalen Optimum leicht auf die Betrachtung benachbarter Konfliktfälle erweitert werden.
- Mit Hilfe von Erfahrungen oder den Ergebnissen eisenbahnbetriebswissenschaftlicher Verfahren zur Kapazitätsberechnung, wie z. B. ANKE, können einige Betriebsstellenfahrwege oder Infrastrukturelemente als besonders belastet gekennzeichnet werden, die bei der Fahrplanerstellung speziell behandelt werden sollten.
- Die Kosten einer Konfliktlösung aufgrund der verwendeten Trasse oder der verbrauchten Energie können ermittelt werden, wenn eine entsprechende Datengrundlage vorhanden ist.

Je nach Einsatzzweck können Zielfunktionen zusammengesetzt werden, die dann entsprechende Auswirkungen auf die Ergebnisse haben. Für eine klassische Simulation der Betriebsabwicklung ist beispielsweise die Verwendung der ersten beiden Kriterien sinnvoll.

## 6.4 DV-Systeme auf der Basis des neuen Konzeptes

Mit Hilfe des vorgestellten Simulationskonzeptes können DV-Systeme für unterschiedliche Planungsaufgaben im Eisenbahnwesen realisiert werden. So ist auf dieser Basis ein Simulationsverfahren realisierbar, das analog zu den existierenden sperrzeitenbasierten Verfahren Kennwerte für eisenbahnbetriebswissenschaftliche Untersuchungen ermittelt und hierbei sowohl die Phase der Fahrplanerstellung als auch die der Betriebsabwicklung betrachtet. Aufgrund der Verwendung des bei der DB Netz AG als Standardverfahren zur Infrastrukturmodellierung eingesetzten Spurplan-Graphen, der Kompatibilität zum Trassenmanagementsystem FAKTUS und der diversen Verbesserungen der neuen Simulationsstrategie erfordert ein solches Verfahren einen geringeren Datenerfassungsaufwand und liefert genauere Ergebnisse als die bisherigen Verfahren. Aufgrund der konzeptionellen Nähe des neuen Simulationskonzeptes zum Trassenmanagement und der Kompatibilität der Datenstrukturen können zudem DV-Systeme realisiert werden, die das rechnergestützte Trassenmanagement schrittweise automatisieren.

Im Folgenden wird die Verwendung des neuen Simulationsansatzes in den einzelnen Verfahren genau beschrieben. Zunächst wird die Simulation der Fahrplanerstellung und die der Betriebsabwicklung erläutert, bei denen die Kompatibilität mit den Konzepten der existierenden Verfahren und den zugehörigen Kenngrößen von großer Bedeutung ist. Danach werden DV-Systeme für das rechnergestützte Trassenmanagement erläutert, die über die bisherigen hinausgehen.

### 6.4.1 Simulation der Fahrplanerstellung

Im Rahmen der klassischen Simulation der Fahrplanerstellung kann das neue Simulationskonzept direkt eingesetzt werden, um ausgehend von den Wunschtrassen der einzelnen Züge wahre Fahrpläne zu erzeugen. Das Ergebnis eines Simulationslaufes ist daher mit dem einer rechnergestützten Konstruktion vergleichbar.

Analog zu den bestehenden sperrzeitenbasierten Verfahren ist das primäre Ziel einer solchen Simulation die Beurteilung neuer Infrastrukturkonzepte unter Berücksichtigung geplanter Betriebsprogramme. Der Prozess der Fahrplanerstellung wird hierbei zur Ermittlung entsprechender Kenngrößen verwendet.

Aufgrund der Begrenztheit der Ressourcen und der Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Zugfahrten ist die Realisierbarkeit eines Betriebsprogramms nicht grundsätzlich gewährleistet. Daher ist ein wesentliches Ergebnis die Aussage, ob alle

gewünschten Trassen in einem konfliktfreien Fahrplan von möglichst hoher Qualität realisiert werden können. Darüber hinaus sind die planmäßigen Wartezeiten, die aus den Konfliktlösungen bei der Trassenvergabe resultieren, der Beförderungszeitquotient, der das Verhältnis zwischen realisierter und kürzester betriebstechnisch erreichbarer Beförderungszeit darstellt, und die planmäßige Auslastung der Netzelemente wichtige Kennwerte zur Beurteilung der betrachteten Variante.

### 6.4.2 Simulation der Betriebsabwicklung

In der Betriebsabwicklung können die Züge ihre geplanten Trassen aufgrund von Unregelmäßigkeiten und Störungen nicht immer nutzen. Wie in Kapitel 5.2.2 erläutert, besteht die zentrale Idee bei der Simulation der Betriebsabwicklung in asynchronen Verfahren in der Erstellung konfliktfreier Dispositionsfahrpläne, die die aktuellen betrieblichen Rahmenbedingungen berücksichtigen. Ausgehend von den geplanten Zugtrassen, den derzeitigen Zugpositionen und Störungen kann unter Verwendung des neuen Simulationskonzeptes ein konfliktfreier Fahrplan erzeugt werden, damit alle Züge möglichst unbehindert verkehren können und so eine hohe Qualität des Betriebs erreicht wird.

In der Simulation der Betriebsabwicklung wird der konstruierte Fahrplan mittels Einbruchs- und Urverspätungen aufgrund vorgegebener Verteilungen gestört. Einbruchsverspätungen sind Verspätungen, die Züge von außen in den betrachteten Untersuchungsraum hineinbringen. Urverspätungen sind dagegen Verspätungen, die unabhängig von anderen Zugfahrten im Untersuchungsbereich selber auftreten, z. B. die Verlängerung eines Reisezughaltes aufgrund einer einsteigenden Schülergruppe, die Störung eines Signals oder auch ein Gleisbruch. Durch Verspätungen verändern sich die realisierten Fahrlagen der Züge gegenüber der planmäßigen Trasse. Aufgrund der Sicherungstechnik und der Anschlüsse wirken sich diese Veränderungen auch auf andere Züge aus. Es entstehen so genannte Folgeverspätungen für bislang störungsfreie Zugfahrten. Die in den Fahrplan eingebauten Reservezeiten werden auch innerhalb der Simulation eingesetzt, um ein Aufschaukeln der Verspätungen zu vermeiden. So werden bei verspäteten Zügen die Regel- und Fahrzeitzuschläge gelöscht und die Pufferzeiten zur Reduzierung der Folgeverspätungen verwendet. Des Weiteren können auch betriebliche Maßnahmen wie das vorzeitige Beenden einer Zugfahrt berücksichtigt werden.

Die Simulation der Betriebsabwicklung liefert als wesentliche Kennwerte die außerplanmäßigen Wartezeiten, die auf den erforderlichen Änderungen an den geplanten Zugtrassen beruhen. Zudem kann für die einzelnen Zugläufe die Entwicklung der

Verspätung entlang des Laufwegs dokumentiert und die Auslastungen der Netzelemente im Betrieb angegeben werden.

Da bei einer Simulation aufgrund der zufällig eingestreuten Verspätungen einzelne Szenarien zusammen mit den zugehörigen Dispositionsentscheidungen sehr genau betrachtet werden, sind zur Erzielung statistisch gesicherter Ergebnisse grundsätzlich mehrere Simulationsläufe erforderlich.

### 6.4.3 Trassenmanagement

Aufgrund der verbesserten Konfliktlösungsstrategie und der Kompatibilität zum System FAKTUS können auf der Basis des neuen Konzeptes zur sperrzeitenbasierten Simulation eine Reihe von Anwendungen für das Trassenmanagement realisiert werden. Hierbei handelt es sich insbesondere um

- Konfliktlösungsvorschläge für die rechnergestützte Bearbeitung,
- Suche nach freien Einzeltrassen in bestehenden Fahrplänen,
- automatische Erstellung konfliktfreier Fahrpläne und
- Nachweis der Stabilität eines Fahrplans in der Betriebsabwicklung.

Im Gegensatz zu den bisher betrachteten strategischen Fragestellungen im Rahmen der Infrastrukturplanung ist die Infrastruktur beim Trassenmanagement im Wesentlichen fest. Wie in Kapitel 2.4 erläutert, ist die zentrale Aufgabe des Trassenmanagements, ausgehend von konkreten Trassenbestellungen wahre Jahresfahrpläne zu konstruieren. Darüber hinaus wird die verbliebene Infrastrukturkapazität den Eisenbahnverkehrsunternehmen für kurzfristige Verkehre angeboten.

Ausgehend von konkreten Trassenbestellungen wird mit Hilfe von Sperrzeitentreppen überprüft, ob diese Trassen unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen der Besteller und der vorhandenen Infrastrukturkapazität realisiert werden können. Die gleiche Vorgehensweise wird auch zur Überprüfung neuer Betriebskonzepte, wie einem Integralen Taktfahrplan, der Einrichtung von Direktzügen im Fernreiseverkehr oder dem Aufbau von Ringzugkonzepten im Güterverkehr, eingesetzt. Können Trassen nicht wie gewünscht realisiert werden, sind erneute Verhandlungen mit den Bestellern erforderlich. Hierbei kann sich im Extremfall sogar herausstellen, dass die vorhandene Infrastrukturkapazität nicht ausreichend ist und daher den neuen Anforderungen angepasst werden muss.

Kann ein konfliktfreier Fahrplan ermittelt werden, liegen für alle Züge exakte Zugtrassen fest, die die genauen Fahr- und Haltzeiten im Fahrplan und die zu benutzenden Laufwege enthalten. Darüber hinaus spielen die planmäßigen Wartezeiten und insbesondere die Beförderungszeitquotienten eine wichtige Rolle als statistische Qualitätskriterien für den Fahrplan. Die Störanfälligkeit im späteren Betrieb kann allerdings erst die Betrachtung der Betriebsabwicklung zeigen.

Mit Hilfe der skizzierten Anwendungen werden unterschiedliche Teilbereiche des Trassenmanagements unterstützt. Die Ermittlung von Konfliktlösungsvorschlägen ergänzt die bislang rein manuelle Konfliktlösung im Rahmen des rechnergestützten Trassenmanagements. Die Suche nach einzelnen Trassen ermöglicht die automatische Bestimmung im Jahresfahrplan ungenutzter Einzeltrassen für kurzfristige Verkehre. Die bislang im Zusammenhang mit strategischen Fragestellungen vorgestellte Simulation der Trassenvergabe kann auch im Rahmen des Trassenmanagements zur automatischen Erstellung konfliktfreier Fahrpläne oder zur kapazitätsschonenden Vergabe der vorhandenen Restkapazität an mehrere Zugfahrten verwendet werden. Das Ergebnis der genannten Anwendungen im Trassenmanagement führt zu einer Rationalisierung der bisherigen rechnergestützten Bearbeitung mit manueller Konfliktlösung und ermöglicht eine einfachere Erzeugung von Varianten aufgrund geänderter Rahmenbedingungen. Darüber hinaus kann mit der Simulation der Betriebsabwicklung die Stabilität eines konkreten Fahrplans im Betrieb überprüft werden.

Wie in Kapitel 6.3.3 erläutert, werden im neuen Simulationskonzept zunächst weder rückwärts konstruierte Trassen noch Verknüpfungen zwischen Zugfahrten betrachtet. Im Gegensatz zur Bemessung der Infrastruktur ist diese Einschränkung im Rahmen des Trassenmanagements nicht in jedem Fall unproblematisch. Solange es keine entsprechenden Trassenbestellungen gibt, können die beschriebenen DV-Systeme für das Trassenmanagement direkt auf der Basis des vorgestellten Konzeptes realisiert werden. Ansonsten muss das Konzept geeignet erweitert werden.

Die Erweiterung um das Rückwärtskonstruieren von Trassen ist aufgrund von Symmetrieüberlegungen einfach möglich. Im Gegensatz zu dem bislang betrachteten Vorwärtskonstruieren muss bei der Konfliktlösung nicht der Anfang des ermittelten Überholungsabschnittes, sondern sein Ende als Warteposition verwendet werden. Die erforderlichen Haltzeitverlängerungen führen daher nicht zu späteren Abfahrtzeiten am Anfang des Überholungsabschnittes, sondern erfordern frühere Ankunftszeiten an seinem Ende. Auf die Ermittlung von alternativen Laufwegen hat die Konstruktionsrichtung überhaupt keinen Einfluss.

Die bei einer Konfliktlösung zu verwendende Konstruktionsrichtung kann anhand der Wunschlage der Trasse bestimmt werden. Um die festgelegte Zeit in der Wunschbetriebsstelle realisieren zu können, muss bei früheren Konflikten rückwärts und bei späteren Konflikten entsprechend vorwärts konstruiert werden. Da es sich bei der Wunschbetriebsstelle in den meisten Fällen um die Start- oder Zielbetriebsstelle handelt, können alle Konflikte eines Zuges im Allgemeinen mit der gleichen Konstruktionsrichtung gelöst werden.

Wie schon in Kapitel 6.3.2 deutlich wurde, kann in den DV-Systemen für das Trassenmanagement nicht komplett auf die Betrachtung von Verknüpfungen verzichtet werden. Allerdings sind die zur Realisierung der Verknüpfungen erforderlichen Synchronisationszeiten grundsätzlich Teil der Trassenbestellungen und müssen im Rahmen der Fahrlagenplanung von den Eisenbahnverkehrsunternehmen bemessen werden. Da eine komplette Verlagerung in das Trassenmanagement der Aufgabenteilung zwischen Trassenbestellern und Infrastrukturbetreiber widerspricht, sollen Verknüpfungen im neuen Simulationskonzept zwar berücksichtigt, aber die erforderlichen Synchronisationszeiten nicht komplett bemessen werden.

Mit einem zweistufigen Verfahren ist eine Auflösung des Problems möglich. Zunächst werden bei der automatischen Konfliktlösung nur Belegungskonflikte betrachtet und so ein wahrer Fahrplan erzeugt. Danach wird die Einhaltung der bestellten Verknüpfungen der Züge überprüft und den Bestellern das Ergebnis mitgeteilt. Zur Vermeidung von Verknüpfungskonflikten sind Änderungen an den Bestellungen, wie zum Beispiel andere Produktarten oder größere Synchronisationszeiten, notwendig.

Aufgrund einer Analogieüberlegung ist auch eine Erweiterung des sperrzeitenbasierten Ansatzes möglich, die die Verknüpfungen schon innerhalb der automatischen Konfliktlösung berücksichtigt. Die bislang betrachteten Belegungskonflikte führen zu planmäßigen Wartezeiten der Trassen in den Bahnhöfen, wohingegen Verknüpfungskonflikte zu entsprechenden planmäßigen Synchronisationszeiten führen. Prinzipiell kann der sperrzeitenbasierte Ansatz auch die zur Realisierung einer geforderten Verknüpfung erforderlichen Veränderungen einer Trasse ermitteln. In Kombination mit den zentralen Belegungskonflikten können so die Verknüpfungen betrachtet werden, die mit den Wunschlagen der Züge und den resultierenden Konstruktionsrichtungen korrespondieren.

Die Wunschlage beschreibt die zeitliche Lage eines Zuges in der Wunschbetriebsstelle, bei der der Besteller ein wirtschaftliches Optimum erreicht. Hierbei kann es sich auch um die Realisierung einer Verknüpfung zu einer anderen Zugfahrt handeln. Nur Trassenbestellungen mit gegenläufigen Verknüpfungsanforderungen können auf

diese Weise nicht behandelt werden. Soll beispielsweise ein Zug zu einer festen Zeit in einer Wunschbetriebsstelle sein und zudem einen Anschluss in einem früheren Bahnhof abwarten, würde eine Verlängerung der Synchronisationszeit für die Verknüpfung zu einer nicht akzeptablen Veränderung der Wunschlage in der Wunschbetriebsstelle führen.

Genau genommen dürfen Trassenbestellungen keine gegenläufigen Anforderungen enthalten, da die geschilderte Problematik bei einer manuellen Konfliktlösung genauso auftritt. Fahrlagen und Anschlüsse müssen im Rahmen der Fahrlagenplanung so bemessen werden, dass eine möglichst große Nachfrage am Endkundenmarkt entsteht und zugleich eine eindeutige Trassenbestellung an den Infrastrukturbetreiber abgegeben werden kann.

Die geschilderte Erweiterung des Simulationskonzeptes berücksichtigt Verknüpfungen innerhalb der Trassenkonstruktion in angemessener Weise, die grundsätzliche Bemessung verbleibt aber entsprechend der Aufgabenteilung bei der Fahrlagenplanung.

# 7 Entwicklung der erforderlichen Algorithmen

Nachdem das neue Simulationsverfahren im vorherigen Kapitel konzipiert wurde, müssen nun die zur Realisierung erforderlichen Algorithmen entwickelt werden. Hierbei handelt es sich insbesondere um die automatische Ermittlung alternativer Laufwege, die Bestimmung der erforderlichen Veränderungen an den Haltzeiten und die Einführung zusätzlicher Betriebshalte. Da das neue Verfahren auf der Basis von FAKTUS konzipiert wird, können zur Realisierung der neuen Funktionalitäten die für das rechnergestützte Trassenmanagement entwickelten Algorithmen verwendet und entsprechend erweitert werden.

## 7.1 Ermittlung alternativer Laufwege

Der Laufweg eines Zuges setzt sich in FAKTUS als Folge von Betriebsstellenfahrwegen zusammen, wie schon in Kapitel 3.2.3 erläutert wurde. Die Reihenfolge der Betriebsstellen ergibt sich aus der so genannten Betriebsstellenreihung, die der Bearbeiter bei der Definition einer Zugfahrt festlegen muss [Brü95]. Ein Betriebsstellenfahrweg beschreibt auf der Basis des zugrunde liegenden Spurplan-Graphen eine Fahrmöglichkeit für eine Zugfahrt innerhalb einer Betriebsstelle. Er beginnt gewöhnlich an einem Rand der Betriebsstelle und endet ebenfalls an einem solchen. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, Fahrwege für startende und endende Zugfahrten zu definieren, die an Halteplätzen beginnen bzw. enden. Jeder Fahrweg besitzt eine eindeutige Bezeichnung, die den Namen der Betriebsstelle enthält, und eine Liste von Attributen, die beispielsweise beschreiben, ob der Fahrweg elektrifiziert und eine Durchfahrt zulässig ist. Ein Vektor von Hierarchieziffern gibt schließlich die betriebliche Bedeutung des Fahrwegs für die einzelnen Zugklassen an und ermöglicht so Vergleiche verschiedener Fahrwege.

Die Unterteilung der Strecken in Betriebsstellen wird von den Bearbeitern bei der Datenaufnahme entsprechend der üblichen Regeln der DB Netz AG vorgenommen. So werden Bahnhöfe in mehrere Betriebsstellen aufgeteilt, wenn es eigenständige Stellwerke für einzelne Bahnhofsteile gibt. Zudem gibt es per Definition nur ein- und zweigleisige Strecken, die wiederum in Betriebsstellen aufgeteilt sind. Liegen mehr als zwei Gleise außerhalb eines Bahnhofs parallel zueinander, handelt es sich dabei formal um mehrere eigenständige Strecken mit zugehörigenBetriebsstellen. Die sich nach diesen Regeln ergebenden Betriebsstellen sind für eine Konfliktlösung auf der Basis von geänderten Fahrwegen nicht optimal geschnitten, da schon in einfachen Konfliktfällen Fahrwege in mehreren Betriebsstellen geändert werden müssen.

Zur Ermittlung alternativer Laufwege ist es also nicht sinnvoll, nur in einer bestimmten Betriebsstelle alternative Fahrwege zu betrachten. Es soll stattdessen ein komplexer Algorithmus entwickelt werden, der Fahrwege in mehreren Betriebsstellen und auch die Betriebsstellenreihung selbst ändern kann. Hierbei müssen allerdings die bestellten Halte in der gewünschten Reihenfolge und Zugparameter, wie beispielsweise Zuglänge und elektrische Traktion, berücksichtigt werden. Mit einem entsprechenden Algorithmus zur Fahrwegsuche können auch großräumige Umfahrungen von Konflikten insbesondere für Güterzüge gefunden werden.

Zur Ermittlung der alternativen Fahrwege wird im Folgenden ein so genanntes Fahrnetz konzipiert, das auf den Fahrwegen der einzelnen Betriebsstellen und ihren möglichen Verknüpfungen über „gemeinsame Anstoßpunkte“ beruht. Mit Hilfe dieses Fahrnetzes können dann in konkreten Konfliktfällen zwischen den von den Kunden bestellten Halten[19] alle möglichen Wege durch das Netz gefunden werden, auch solche, die eine andere Betriebsstellenreihung haben. Allerdings müssen bei der Verwendung solcher neuen Fahralternativen auch neu auftretende Konflikte und ggf. längere Fahrzeiten berücksichtigt werden.

### 7.1.1 Modellierung eines Fahrnetzes für die Suche

In konkreten Konfliktfällen müssen alternative Wege durch das Eisenbahnnetz gefunden werden, die die vorhandenen Vorgaben für den jeweiligen Zug erfüllen und hierbei auch bislang nicht durchfahrene Betriebsstellen verwenden können. Die Fahrwege werden in FAKTUS entsprechend ihrer Bezeichnung alphabetisch sortiert gespeichert und können so leicht in entsprechenden Listenfenstern auf dem Bildschirm angezeigt werden. Müssen bei der manuellen Fahrplanbearbeitung die möglichen Nachfolger eines Fahrwegs angezeigt werden, wird jedes Mal die gesamte Liste sequentiell durchlaufen. Anhand gemeinsamer Betriebsstellengrenzen werden dann die Fahrwege ermittelt, die an den bisherigen Fahrweg anschließen.

Dieses Vorgehen ist für ein interaktives System wie FAKTUS angemessen, für ein Simulationsverfahren, das laufend die Nachfolger eines Fahrwegs ermitteln muss, aber nicht effizient genug. Daher soll ein Ansatz verwendet werden, der alle Nachfolger der einzelnen Fahrwege einmal ermittelt und in einem so genannten Fahrnetz speichert, wodurch diese für folgende Suchen nach alternativen Laufwegen dauerhaft zur Verfügung stehen.

[19] Die DB Netz AG bezeichnet die von Kunden bestellen Halte als Kundenhalte [DB01b].

Die Knoten dieses Fahrnetzes sind die einzelnen Fahrwege. Über entsprechende Knotenattribute kann auf die Daten der Fahrwege zugegriffen werden. Die gerichteten Kanten des Fahrnetzes sind nicht attributiert und verbinden Fahrwegknoten mit ihren potentiellen Nachfolgern (siehe Abb. 16). Jedem Laufweg entspricht eine korrespondierende Knotenfolge im Fahrnetz.

Die Suche nach alternativen Laufwegen ist also gleichbedeutend mit der Suche nach anderen Knotenfolgen im Fahrnetz, die die Anforderungen der Bestellung ebenfalls berücksichtigen. Da die alternativen Laufwege zur Lösung von konkreten Konfliktfällen ermittelt werden, sind in den meisten Fällen lokale Änderungen an der ursprünglichen Knotenfolge ausreichend. In diesen Fällen kann die Suche sehr effizient zwischen zuvor explizit ermittelten Start- und Zielfahrwegen durchgeführt werden. Aufgrund der allgemeinen Modellierung des Fahrnetzes ist auch die Ermittlung von weitläufigen Umfahrungen ohne Einschränkung durch die bisherige Betriebsstellenreihung problemlos möglich.

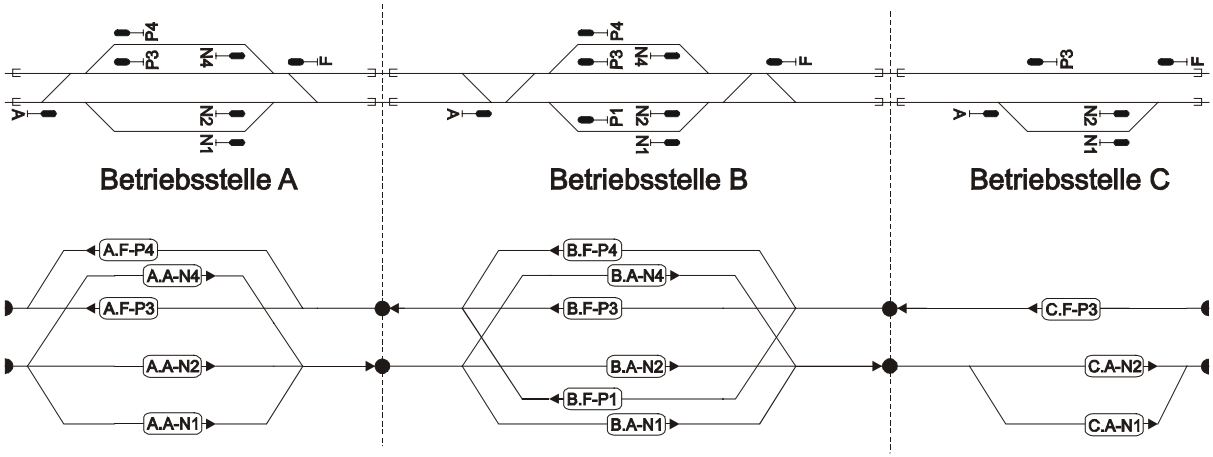


**Abb. 15: Beispiel für Fahrwege mit zugrunde liegender Infrastruktur**

In Abb. 15 sind die Infrastruktur und die zugehörigen Fahrwege für drei Betriebsstellen dargestellt. Die Fahrwege sind entsprechend der Notation „Betriebsstellenname.Einfahrsignal-Ausfahrsignal“ bezeichnet. In Abb. 16 ist das zugehörige Fahrnetz dargestellt. Mit Hilfe der Kanten können von einem Knoten diejenigen Knoten erreicht werden, die als Fortsetzung möglich sind.

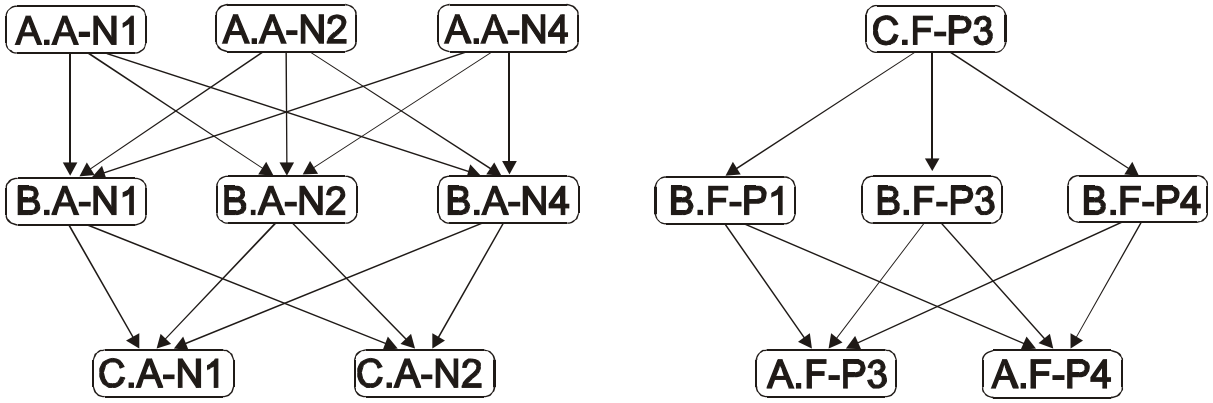


**Abb. 16: Fahrnetz für das Beispiel aus Abb. 15**

Das Fahrnetz beruht direkt auf den Fahrwegen der Infrastruktur und ist unabhängig von einer konkreten Suchaufgabe für einen bestimmten Zug aufgrund eines konkreten Konfliktfalls. Da es in den Bahnhöfen gewöhnlich durchgehende Hauptgleise und zugehörige Überholungsgleise gibt, die von diesen abzweigen und wieder auf sie einmünden, sind schon bei kurzen Zugläufen theoretisch sehr viele Fahrwegkombinationen möglich.

Liegen auf dem Laufweg eines Zuges beispielsweise fünf Bahnhöfe, die jeweils vier Fahrwege anbieten, ergeben sich ohne Betrachtung alternativer Betriebsstellenreihungen schon $4 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 4 = 1024$ Fahrwegkombinationen. Im Rahmen der Lösung eines konkreten Konfliktes müssen aber nicht alle theoretisch möglichen alternativen Laufwege explizit betrachtet werden. So ist es nicht sinnvoll, dass ein Zug ein Überholungsgleis eines vom Konflikt weit entfernten Bahnhofs durchfährt ohne dort zu halten, obwohl dies aufgrund der verlängerten Fahrzeit sogar zu einer Konfliktlösung führen kann. Bei der Ermittlung alternativer Laufwege sollen daher Laufwege, die nur aufgrund der Verlängerung der Fahrzeiten beim Befahren unnötiger Umwege einen Konflikt lösen können, nicht berücksichtigt werden. Neben den Überholungsgleisen gibt es in Bahnhöfen natürlich auch Ausfädelungen auf andere Strecken und parallele Fahrmöglichkeiten, so dass die Anzahl der möglichen Kombinationen auch bei Verwendung des geschilderten Ansatzes zur Reduzierung weiterhin sehr hoch sein kann. Durch die Verwendung alternativer Laufwege können sich ebenfalls Umwege ergeben.

Um bei der Suche nach alternativen Laufwegen alle relevanten Fahrmöglichkeiten zu erkennen, ohne alle möglichen Kombinationen betrachten zu müssen, sollte die Anzahl der explizit zu betrachtenden Fahrwege möglichst klein gehalten werden. Eine Möglichkeit hierzu ist die frühzeitige Berücksichtigung der Parameter des Zuges, für den ein alternativer Laufweg gesucht wird. So muss jeder betrachtete

Fahrweg für die Klasse des Zuges erlaubt sein. Handelt es sich um einen Zug mit Elektrotraktion, reicht es aus, nur elektrifizierte Fahrwege zu betrachten. Hat der Zug in einer Betriebsstelle einen Halt, müssen nur die Fahrwege mit einem für diesen Zug geeigneten Halteplatz berücksichtigt werden. Zudem sollten vom Besteller explizit vorgegebene Gleise schon an dieser Stelle beachtet werden, damit alle betrachteten Laufwege diese Restriktionen direkt erfüllen.

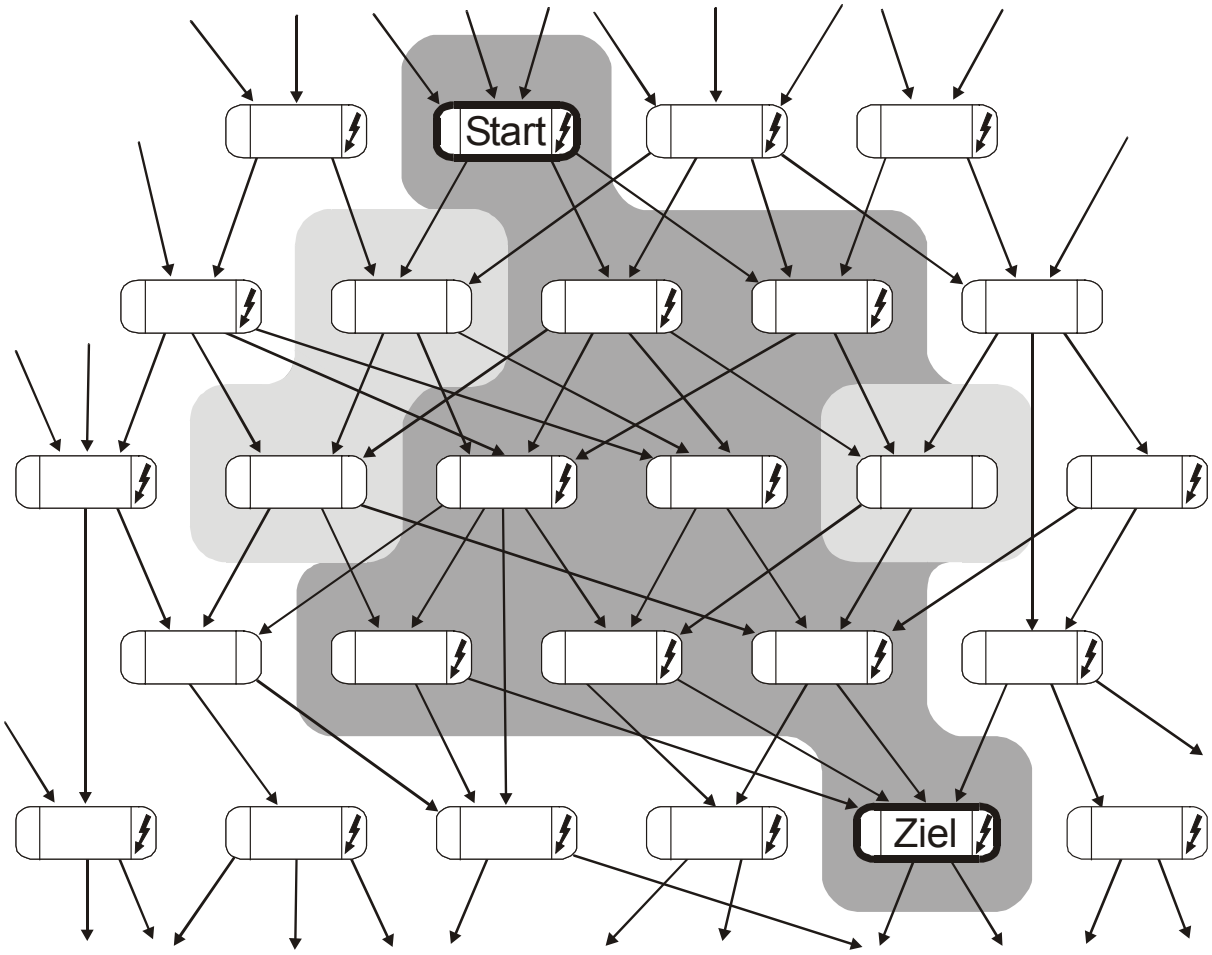


**Abb. 17: Fahrnetz zur Suche eines alternativen Wegs**

In Abb. 17 ist ein Fahrnetz mit einem Start- und Zielfahrweg dargestellt. Alle grau unterlegten Fahrwege kommen als Teile eines möglichen alternativen Laufwegs in Frage. Da der Zug elektrifiziert sein soll, reduzieren sich die zu betrachtenden Fahrwege weiterhin auf die dunkelgrau unterlegten. Die Suche kann auf diesen Bereich begrenzt werden.

Darüber hinaus kann ein weiterer Ansatz zur Reduzierung der gefundenen Wege verfolgt werden. Gibt es zu dem Fahrweg in einer Betriebsstelle, in der der zu lösende Konflikt nicht liegt, mehrere anschließende Fahrwege, die den gleichen Zielpunkt haben, wird nur derjenige weiter betrachtet, der bislang verwendet wird

oder sonst der mit der jeweils höchsten Hierarchieziffer. Hiermit wird das Auffinden von Alternativen, die zu unnötigen Fahrzeitverlängerungen innerhalb einer Betriebsstelle führen, verhindert. Neue sinnvolle Fahrmöglichkeiten über andere Gleise und Betriebsstellen werden aber weiterhin gefunden. Dieses wird realisiert, indem vor der genauen Betrachtung eines Knotens im Rahmen der Suche die für den aktuellen Zug und die Konfliktbetriebsstelle relevanten Kanten aus der Menge aller ein- und auslaufenden Kanten bestimmt werden.

### 7.1.2 Bestimmung alternativer Laufwege im Fahrnetz

Nachdem das Fahrnetz konzipiert und gezeigt wurde, wie die Anzahl der für einen bestimmten Zug und eine konkrete Konfliktbetriebsstelle zu betrachtenden Fahrnetzknoten reduziert werden kann, soll nun der Algorithmus für die eigentliche Suche nach alternativen Laufwegen vorgestellt werden. Dieser hat die Aufgabe, für einen konkreten Konfliktfall und einen bestimmten Zug alternative Laufwege im entsprechend reduzierten Fahrnetz zu ermitteln, die zur Lösung des Konfliktes beitragen können.

Aufgrund dieser speziellen Aufgabenstellung ist es nicht sinnvoll, alle theoretisch möglichen Laufwege für den Zug zu ermitteln, um dann die vielen ungeeigneten im Nachhinein auszusortieren. Die gesuchten minimalen Alternativen müssen die Anforderungen durch die Bestellung erfüllen und dürfen nicht zu unnötigen Fahrtzeitverlängerungen führen. Durch die Verwendung von Fahrwegen mit Verknüpfungspunkten zu bislang nicht genutzten Betriebsstellen werden häufig alternative Laufwege gefunden, die sich vom bisherigen nur durch einen oder auch mehrere unsinnige Umwege über andere Betriebsstellen unterscheiden, die nicht konstruktiv zu der beabsichtigten Konfliktlösung beitragen können. So finden Verfahren, die ausgehend von einem Startpunkt in eine feste Richtung arbeiten, nicht nur minimale Alternativen, da am Beginn eines Abzweigs vom bisherigen Laufweg des Zuges nicht abzusehen ist, ob sich hiermit eine sinnvolle Alternative ergibt oder ob die hier eingeschlagene Variante nach einigen Betriebsstellen noch vor dem Konflikt wieder zurück auf den bisherigen Weg führt, ohne so zur Konfliktlösung beitragen zu können. Nicht minimale Varianten, die zu unnötigen Fahrzeitverlängerungen führen, müssen nach der Suche aussortiert werden.

Ein menschlicher Bearbeiter wird dagegen intuitiv versuchen, direkt nur die minimalen Alternativen zu bestimmen, indem er ausgehend von der Konfliktbetriebsstelle alternative Fahrwege sucht und diese mit dem bisherigen Laufweg des Zuges verbindet. Durch die Suche ausgehend von der Konfliktbetriebsstelle können aller-

dings keine alternativen Laufwege für den Zug gefunden werden, die die Konfliktbetriebsstelle nicht durchlaufen. Hat der Zug hier weder einen bestellten Verkehrshalt noch startet oder endet er hier, müssen diese Umfahrungen unter Berücksichtigung aller Anforderungen der Bestellung zusätzlich ermittelt werden.

Um in dem neuen Simulationsverfahren alternative Laufwege zur Lösung von Konflikten effizient ermitteln zu können, wird eine entsprechende Suche ausgehend von der Konfliktbetriebsstelle realisiert, die in einigen Fällen um eine zusätzliche Suche nach Umfahrungen ergänzt werden muss.

Die bekannten Standardalgorithmen zur Bestimmung von Wegen in Graphen können zur Realisierung dieser speziellen Aufgabenstellung nicht verwendet werden. Allerdings können Algorithmen zur Traversierung[20] von Graphen leicht um die erforderliche Funktionalität ergänzt werden. Die Beschreibung der Graphen und insbesondere der klassischen Graph-Algorithmen soll in dieser Arbeit auf das Notwendigste beschränkt bleiben. Eine ausführliche Darstellung kann der einschlägigen Fachliteratur entnommen werden ([Sed98], [Vol96] u. a.).

Die beiden klassischen Algorithmen zur Traversierung von Graphen werden als Breiten- und Tiefensuche bezeichnet. Abstrakt gesprochen unterteilen beide Verfahren die Knoten des Graphen während des Durchlaufs in drei Mengen, die sich kontinuierlich ändern. Die erste enthält die schon abgearbeiteten, die zweite die im Laufe der Suche bereits gefundenen, aber noch nicht komplett abgearbeiteten und die dritte Menge die restlichen, noch nicht berührten Knoten des Graphen. Ausgehend von einem Startknoten werden alle über Kanten verbundenen Nachbarknoten betrachtet, die bislang noch nicht berührt wurden. Da jeweils nur ein Knoten gleichzeitig bearbeitet werden kann, werden die restlichen Nachbarknoten in der zweiten Menge zwischengespeichert. Die beiden Verfahren unterscheiden sich in der Art, wie nach dem Abschluss der Betrachtung eines Knotens der nächste Knoten aus der zweiten Menge ausgewählt wird. Bei der Tiefensuche wird der zuletzt eingefügte Knoten als nächster betrachtet, bei der Breitensuche dagegen der am längsten in der Menge wartende. Bei beiden Algorithmen können sich die Ergebnisse aufgrund von Reihenfolgewechseln unterscheiden, da es keine feste Reihenfolge für Nachbarknoten gibt. Sollte die zweite Menge leer sein, obwohl noch nicht alle Knoten besucht wurden, besteht der Graph aus mehreren unzusammenhängenden Komponenten, und die Suche muss mit einem Knoten der dritten Menge fortgesetzt werden.

[20] Als Traversierung wird das systematische Durchlaufen von Graphen bezeichnet, bei dem sukzessive alle Knoten besucht werden.

In Abb. 18 ist zu sehen, wie beide Algorithmen ausgehend vom Startknoten den einfachen Beispielgraph durchlaufen. Die Zahlen an den Kanten geben die jeweilige Reihenfolge bei der Traversierung an. Kanten, die zu bereits besuchten Knoten führen, werden bei beiden Verfahren nicht weiter betrachtet und sind daher in der Abbildung gepunktet dargestellt.

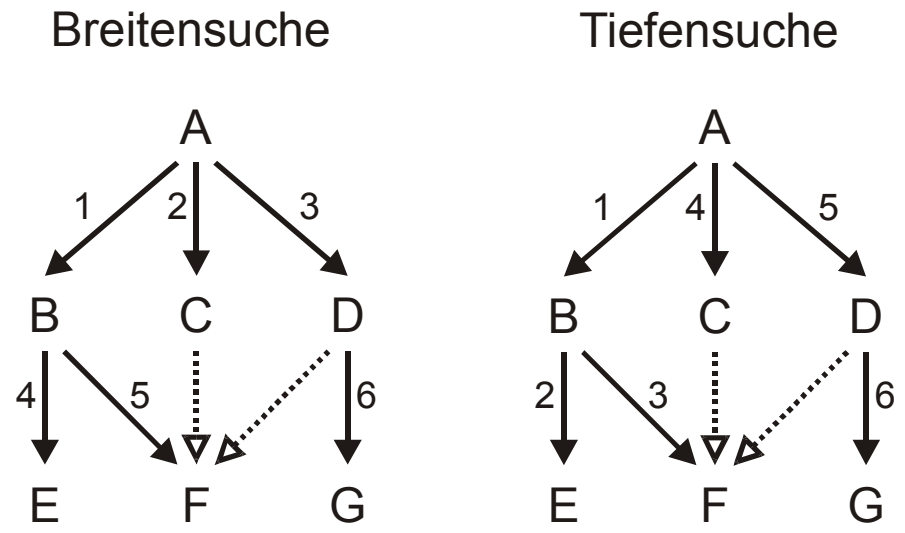


**Abb. 18: Traversierungen eines Beispielgraphen**

Die Breitensuche durchläuft sukzessive alle Nachbarn des Startknotens, bevor die Nachfolger der Nachbarn der Reihe nach betrachtet werden. Zur Ermittlung aller Wege vom Startknoten zu einem anderen Knoten ist es erforderlich, die ermittelten Wege an den besuchten Knoten zwischenzuspeichern, damit diese bei der Berechnung der Wege für einen Nachfolger dieses Knotens zur Verfügung stehen. Allerdings bedeutet dies, dass jeder Knoten seine für den Wegeaufbau relevanten Vorgängerknoten kennen muss. Nach der Traversierung des am Startknoten beginnenden Teilgraphen sind alle Wege ausgehend von dem Startknoten bekannt.

Die Tiefensuche läuft dagegen zunächst die Kanten entlang und betrachtet Nachbarn erst dann, wenn der aktuelle Knoten keine noch nicht besuchten Nachfolger hat. Eine Implementierung der Tiefensuche kann auf der Basis eines Stack für die zweite Menge erfolgen, der ausgehend vom Startknoten alle Knoten enthält, deren Nachfolger noch nicht komplett bearbeitet wurden, und an dessen Spitze der aktuelle Knoten liegt. Die Besonderheit der effizient zu realisierenden Datenstruktur Stack besteht darin, dass nur auf das oberste Element direkt zugegriffen werden kann. Sie wird hier zur Zwischenspeicherung von noch weiter zu bearbeitenden Knoten verwendet.

In Abb. 19 ist der sich während der Traversierung des Beispielgraphen sukzessive ändernde Stack spaltenweise dargestellt. Ausgehend von dem Startknoten A werden

dessen Nachfolger B, C und D auf den Stack gelegt. Im nächsten Schritt wird der oberste Knoten B bearbeitet, während die Knoten C und D im Stack gespeichert bleiben. Da der Knoten B die Knoten E und F als Nachfolger hat, werden diese ebenfalls auf den Stack gelegt. Der im nächsten Schritt betrachtete Knoten E hat keine Nachfolger, weshalb er nach der Bearbeitung vom Stack gelöscht werden kann und der darunter gespeicherte Knoten F aktuell wird. Da der Knoten F ebenfalls keine Nachfolger hat, kann er nach der Bearbeitung ebenfalls vom Stack entfernt werden. Der dann oben liegende Knoten B wurde, genau wie alle seine Nachfolger bereits bearbeitet und kann daher ebenfalls vom Stack entfernt werden. Der im ersten Schritt gespeicherte Knoten C wird hierdurch aktuell. Da sein Nachfolger F bereits bearbeitet wurde, wird dieser nicht erneut auf den Stack gelegt. Durch Iteration der beschriebenen Vorgehensweise kann der in Abb. 18 dargestellte Durchlauf der Tiefensuche durch den Beispielgraphen effizient realisiert werden.

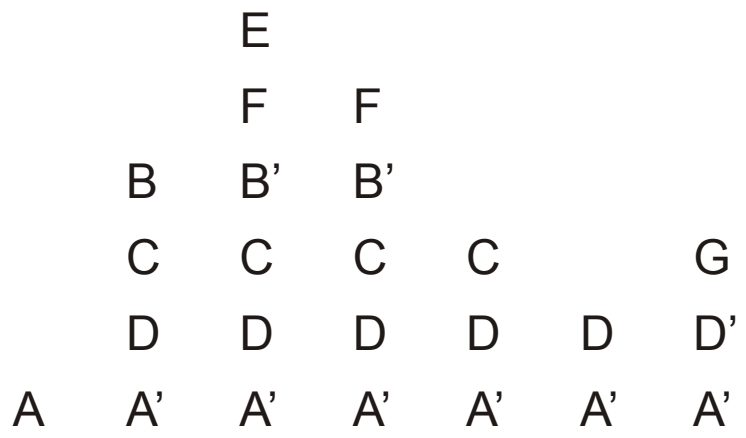


**Abb. 19: Entwicklung des Stack bei der Tiefensuche**

Markiert man – analog zu der ebenfalls möglichen rekursiven Implementierung – die Knoten des Stack, von denen Nachfolger ebenfalls auf dem Stack liegen, dann geben die markierten Elemente die verwendete Knotenfolge vom Startknoten zum aktuellen Knoten an. Die Ermittlung des aktuellen Weges ist bei dieser Implementierung der Tiefensuche also relativ einfach.

Um mit diesem Verfahren alle Wege vom Startknoten ermitteln zu können, kann die Tiefensuche leicht angepasst werden. In der klassischen Variante wird jede Kante und jeder Knoten genau einmal durchlaufen und hiermit ein so genannter Spannbaum erzeugt, der den Startknoten als Wurzel besitzt und von diesem genau einen Weg zu jedem Knoten enthält. Alle möglichen Wege können ermittelt werden, indem die Suche nach Nachfolgern erst dann beendet wird, wenn der aktuelle Knoten keine Nachfolger hat unabhängig davon, ob diese bereits besucht wurden. Da nur Verbindungen mit dem bisherigen Laufweg gesucht werden, kann die Suche nach Nachfol-

gern direkt beendet werden, wenn der aktuelle Knoten zum bisherigen Laufweg des Zuges gehört. Damit Schleifen im Graph nicht zu Endlosschleifen in dem DV-System führen, darf jeder Knoten zudem höchstens einmal auf dem Stack liegen.

Die Verwendung der Breitensuche mit dem Speichern der bekannten Wege an den schon betrachteten Knoten und dem sukzessiven Zusammenbauen der Wege über die der Vorgänger hat den Nachteil der zusätzlichen Speicheroperationen, die aufgrund der Lokalität des Verfahrens für viele Fahrwege durchgeführt wird, die nicht weiter betrachtet werden müssen. Daher wird trotz der mehrfachen Graphdurchläufe und der resultierenden algorithmischen Komplexität, die Variante der Tiefensuche verwendet, da die zu durchlaufenden Teile des Fahrnetzes aufgrund der zusätzlichen Abbruchbedingung relativ kleine Graphen sind.

### 7.1.3 Wegesuche ausgehend von der Konflikt-Betriebsstelle

Die Suche nach alternativen Laufwegen soll in dem neuen Simulationsverfahren durch eine Wegesuche ausgehend von der Konfliktbetriebsstelle realisiert werden, die in einigen Fällen um eine zusätzliche Suche nach Umfahrungen ergänzt werden muss. Gibt es in der Konfliktbetriebsstelle für den aktuellen Zug akzeptable alternative Fahrwege, so wird versucht, diese mit dem bisherigen Laufweg zu verbinden. Die Wegesuche endet in diesem Fall dann, wenn ein bislang vom Zug benutzter Fahrweg oder das Ende des Fahrnetzes erreicht wurde. Man beachte, dass der alternative Fahrweg mit dem bisherigen Laufweg des Zuges i. a. sowohl vor als auch nach dem betrachteten Konflikt verknüpft werden muss. Daher sind außer bei Konflikten am Rand des Fahrnetzes zwei Suchen in entgegengesetzter Richtung erforderlich. Die Verwendung der angepassten Tiefensuche ist hierbei vorteilhaft, da die Suchweite in beiden Fällen eher gering ist. Die Kanten des Fahrnetzes müssen hierzu in beiden Richtungen traversiert werden können.

Im Allgemeinen gibt es für die beiden Suchrichtungen jeweils mehrere Möglichkeiten, von einem alternativen Fahrweg zum bisherigen Laufweg des Zuges zu gelangen. In diesen Fällen müssen die gefundenen Teil-Ergebnisse zu vollständigen Alternativrouten kombiniert werden.

Da die Suchen ausgehend von der jeweiligen Konfliktbetriebsstelle an dem ersten bislang vom Zug befahrenen Fahrweg enden, werden immer „minimale“ Alternativfahrwege gefunden. Weitere mögliche Alternativfahrwege, die sich von diesen minimalen nur durch zusätzliche Umwege über andere Betriebsstellen am Anfang

bzw. Ende unterscheiden, werden hierdurch gar nicht erst ermittelt und müssen deshalb auch nicht im Nachhinein aussortiert werden.

Der Ansatz der Suche ausgehend von der Konfliktbetriebsstelle ermöglicht zudem das einfache Auffinden von Knotenfolgen, die keinen gemeinsamen Fahrweg mit dem bisherigen Laufweg haben, aber dennoch alle Restriktionen erfüllen. Dieser Fall kann auftreten, wenn die Suche in der Start- bzw. Ziel-Betriebsstelle des Zuges endet und so kein gemeinsamer Fahrweg existieren muss. Wird dagegen nur in eine Richtung gesucht und von vorgegebenen Start- und Zielfahrwegen ausgegangen, kann eine solche Alternative nur dann gefunden werden, wenn nacheinander mit allen möglichen Fahrwegen der jeweiligen Start- bzw. Ziel-Betriebsstelle eine eigenständige Suche gestartet wird.

### 7.1.4 Auffinden von Umleitungen

Durch die Suche ausgehend von der Konfliktbetriebsstelle können allerdings keine alternativen Laufwege für den Zug gefunden werden, die die Konfliktbetriebsstelle nicht durchlaufen. Diese müssen betrachtet werden, wenn der Zug in der Konfliktbetriebsstelle weder einen Halt hat noch startet oder endet. Die durch die Betriebsstellenreihung vorgegebenen Restriktionen müssen allerdings weiterhin erfüllt werden.

In einem solchen Fall kann die Suche nicht ausgehend von der Konfliktbetriebsstelle oder einer anderen Betriebsstelle erfolgen. Die Variante der Tiefensuche kann aber leicht so erweitert werden, dass sie nur noch Wege findet, die die bisherige Konfliktbetriebsstelle nicht durchlaufen. Bei diesem Ansatz muss ein Startfahrweg festgelegt werden, an dem die Suche entsprechend der Kantenrichtung beginnen soll. Dies ist außer für die Start-Betriebsstelle ein Fahrweg, den der Zug bislang verwendet. Allerdings ist es nicht sinnvoll, den Fahrweg der letzten bestellten Betriebsstelle als Startpunkt einer Suche zu verwenden, da es alternative Laufwege geben kann, die in dieser Betriebsstelle einen anderen Fahrweg verwenden und trotzdem alle geforderten Eigenschaften erfüllen. Daher wird der Abstand des Startfahrwegs von der Konfliktbetriebsstelle in Anzahl Betriebsstellen als Parameter verwendet, den der Anwender beim Start eines Simulationslaufes festlegen kann. Die Suche nach einem alternativen Weg wird beendet, wenn ein Fahrweg erreicht wurde, den der Zug bislang schon verwendet und der hinter der Konfliktbetriebsstelle liegt oder der zur Ziel-Betriebsstelle gehört.

Allerdings werden bei diesem Verfahren, das nur in eine Richtung arbeiten kann, nicht nur die minimalen Alternativen gefunden, sondern auch solche, die sich von

diesen durch unnötige Umwege in bislang nicht verwendeten Betriebsstellen unterscheiden. Daher muss nun ein Verfahren eingesetzt werden, das die minimalen Alternativen bestimmt.

Da die Suche nach Umleitungen sofort endet, wenn ein bislang vom Zug verwendeter Fahrweg erreicht wurde, kann ein solcher Umweg nur am Beginn einer Alternative auftreten. Ein nicht minimaler, alternativer Laufweg unterscheidet sich von einem anderen also durch eine andere Betriebsstellenreihung vor der eigentlichen Umleitung, die bei beiden Alternativen identisch ist. Da sich die unerwünschten Umwege in diesem speziellen Fall nur auf die Anfänge beziehen, können die nicht minimalen Alternativen leicht ermittelt und gelöscht werden.

Soll die Suche nach Umleitungen in der Start-Betriebsstelle des Zuges beginnen, sind auch andere Fahrwege, die der Zug bislang nicht verwendete und die dennoch die entsprechenden Restriktionen der Bestellungen erfüllen, als Alternativen denkbar. Ausgehend von den für die Start-Betriebsstelle relevanten Fahrwegen müssen in diesen Fällen sukzessive mehrere Suchen durchgeführt werden.

In dem neuen Simulationsverfahren wird das zuletzt beschriebene Verfahren zum Auffinden von Umleitungen verwendet, wenn die Konfliktbetriebsstelle nicht bestellt ist. Dieses zweite Verfahren ist erforderlich, da die ansonsten verwendete, sehr effiziente Tiefensuche ausgehend von der Konfliktbetriebsstelle keine alternativen Laufwege für den Zug finden kann, die diese nicht durchlaufen. Die Kombination beider Verfahren führt zu einer sehr effizienten Suche alternativer Laufwege in allen denkbaren Konstellationen.

## 7.2 Konfliktlösung durch Haltzeitverlängerung

Wie schon beschrieben, sollen in dem neuen Simulationsverfahren für die bisherigen und mögliche alternative Laufwege die notwendigen Veränderungen an den Haltzeiten berechnet werden, die erforderlich sind, alle Konflikte des Zuges im aktuellen Überholungsabschnitt zu lösen. Nachdem im letzten Abschnitt die Ermittlung der alternativen Laufwege erläutert wurde, werden jetzt die Auswirkungen der Wahl eines neuen Laufwegs betrachtet, um die erforderlichen Haltzeitverlängerungen exakt bestimmen zu können.

### 7.2.1 Belegungen alternativer Laufwege

Die alternativen Laufwege unterscheiden sich vom bisherigen in den verwendeten Fahrwegen, wobei sich auch die durchfahrenen Betriebsstellen unter Beachtung der zugrunde liegenden Trassenbestellung ändern können. Die anderen Fahrwege werden – insbesondere in Weichenbereichen – andere Geschwindigkeiten erlauben, andere Neigungen haben und auch andere Entfernungen für die Zugfahrt bedeuten. Die Prioritäten, die die verwendeten Fahrwege bezüglich der Zugklasse haben, werden sich zudem bei den einzelnen Laufwegen unterscheiden.

Zur Beurteilung eines alternativen Laufwegs ist es sinnvoll zu wissen, welche Auswirkungen seine Wahl haben würde. Diese beziehen sich erst einmal auf die Zugfahrt selbst. Die Fahrzeiten ändern sich aufgrund der neuen Neigungen, Geschwindigkeiten und Längen. Hieraus resultieren veränderte Belegungen, die sich wegen der geänderten Fahrwege zudem auch auf andere Belegungselemente beziehen werden. Daher gibt es natürlich auch Auswirkungen auf andere Zugfahrten. Man beachte, dass der Ausgangspunkt für die Suche nach einem alternativen Laufweg gerade ein Konflikt zwischen den Belegungen zweier Züge war. Erst nach Kenntnis der neuen Belegungen eines Zuges kann entschieden werden, ob der alternative Laufweg eine Lösung des Konflikts ermöglicht.

Es ist allerdings nicht sinnvoll, eine überschlägige Fahrzeitrechnung zu implementieren, die dazu dient, die geänderten Fahrzeiten und neuen Belegungen des Zuges zu prophezeien. Die Fehler, die ein einfaches Verfahren hätte, wären in jedem Fall so groß, dass für eine korrekte Entscheidung keine ausreichend genauen Aussagen über die resultierenden Konflikte möglich sind. Als Basis für die Berechnung der Auswirkungen eines Laufweges soll daher die Fahrzeit- und Belegungsrechnung aus FAKTUS verwendet werden. Nur durch dieses Vorgehen ist es möglich, für jeden in Frage kommenden Laufweg die Auswirkungen seiner Wahl exakt zu ermitteln.

Man kann aber nicht alle Konflikte direkt durch alternative Laufwege lösen. Oft sind weitere Maßnahmen wie die Verlängerungen der Haltzeiten von Zügen in rückliegenden Bahnhöfen oder das Verschieben der gesamten Zugfahrt erforderlich. Wie schon zuvor beschrieben, sollen entsprechend des neuen Simulationskonzeptes alle im aktuellen Überholungsabschnitt vorhandenen Konflikte des Zuges gelöst werden. Ist dies allein durch die Wahl eines anderen Laufwegs nicht möglich, muss zur Beurteilung zusätzlich die erforderliche Verschiebung am Beginn des betrachteten Überholungsabschnitts berechnet werden.

### 7.2.2 Bestimmung der erforderlichen Haltzeitverlängerung

Es gibt zwei grundsätzlich verschiedene Ansätze, um die erforderliche Haltzeitverlängerung zu bestimmen. Zum einen können analog zu einer manuellen Konfliktlösung unter Berücksichtigung der Belegungen der anderen Züge Lücken für die Sperrzeitentreppe der beteiligten Züge gesucht werden. Zum anderen kann die Mindestzugfolgezeit der beiden am Konflikt beteiligten Züge berechnet und hiervon die aktuelle Zugfolgezeit abgezogen werden. Das Resultat ergibt die notwendige Haltzeitverlängerung des betrachteten Zuges. Da bei der Berechnung der Mindestzugfolgezeiten nur zwei Züge betrachtet werden, kann der Zug allerdings auch mit der berechneten Haltzeitverlängerung weitere Konflikte im betrachteten Überholungsabschnitt haben. Dann muss dieses Verfahren solange iteriert werden, bis alle Konflikte gelöst sind.

In Abb. 20 ist ein Beispiel für einen Konflikt dargestellt. Die Züge 90031 und 50763 haben die gleiche Priorität und einen Konflikt in dem mittleren Überholungsbahnhof. Alle anderen Züge haben eine höhere Priorität. Bei der alleinigen Betrachtung der am Konflikt beteiligten Züge mit Hilfe der Mindestzugfolgezeiten ist der Konflikt entweder zu lösen, indem der durchfahrende Zug nach unten verschoben wird oder der haltende Zug in einem anderen Gleis auf die Überholung wartet und dafür seinen Halt verlängert. Beide Ansätze führen allerdings dazu, dass der jeweils verschobene Zug neue Konflikte mit Zügen höherer Priorität bekommt. Auch diese müssen dann gelöst werden. Bei dem haltenden Zug würde dies zum Beispiel zu einer wesentlichen Verlängerung des Haltes führen, die diese Warteposition langfristig blockiert und die Zugfahrt weniger attraktiv werden lässt.

Bei der Berücksichtigung aller Belegungen ist die Verlängerung des vorhandenen Halts somit weniger attraktiv als bei der alleinigen Betrachtung der beiden Konfliktzüge zuvor. Eine korrekte Beurteilung der Gesamtsituation wird also erst durch die Betrachtung aller Züge möglich.

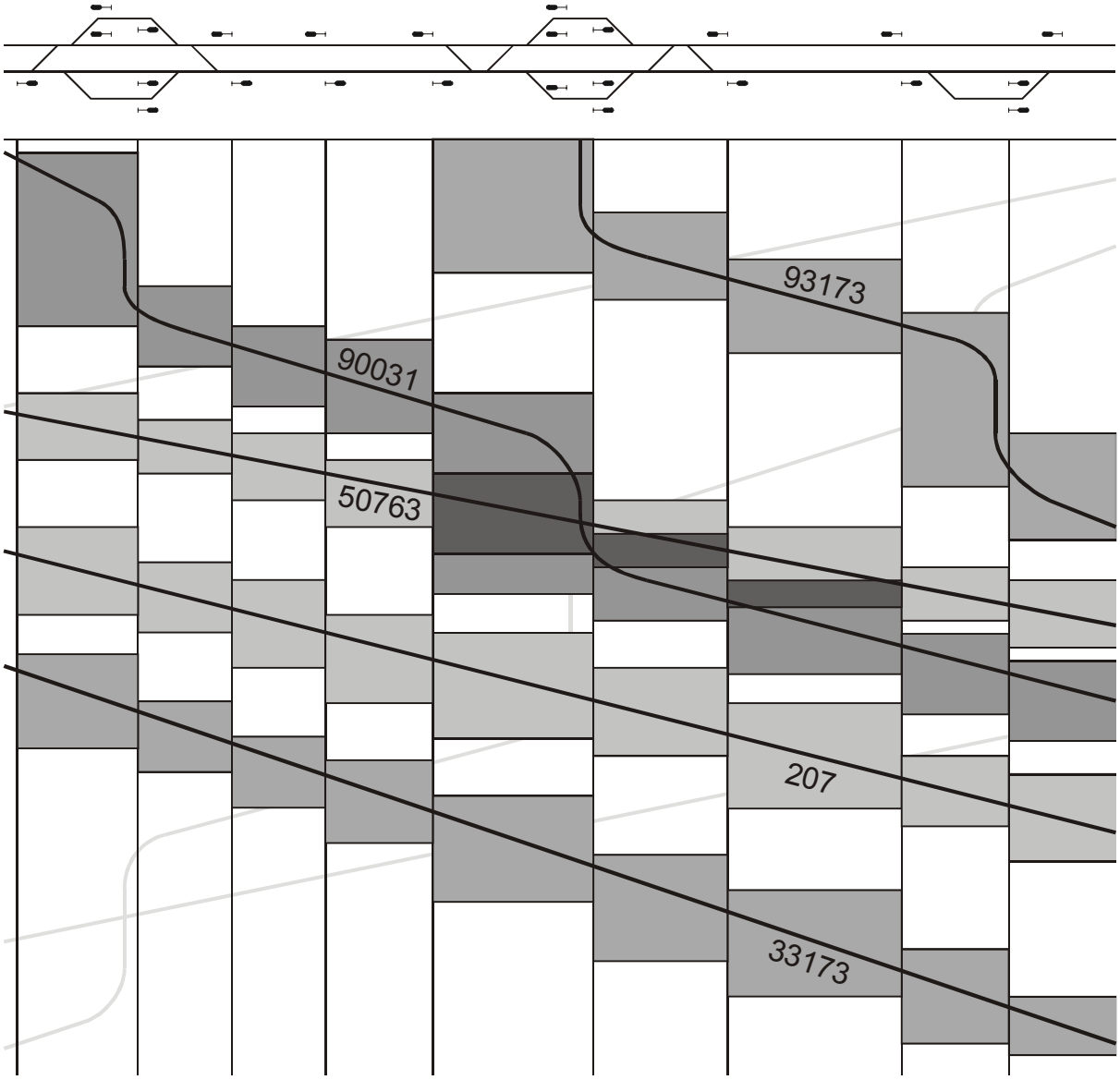


**Abb. 20: Konflikt zwischen zwei Zugfahrten**

Ein auf der Bestimmung von Mindestzugfolgezeiten beruhendes Verfahren muss diese auf der Grundlage der Belegungsrechnung von FAKTUS exakt bestimmen. In ANKE ist ein solches Verfahren für einen anderen Anwendungsfall implementiert worden, da im Rahmen der analytischen Kapazitätsermittlung die Mindestzugfolgezeiten als Bedienzeiten für das zugrunde liegende Warteschlangenmodell verwendet werden. Für jeden möglichen Zugfolgefall in einem Überholungsabschnitt werden die zugehörigen Mindestzugfolgezeiten berechnet. Allerdings werden hierbei die bisherigen Fahrwege der beteiligten Züge beibehalten. Für einen Zugfolgefall gibt es daher pro Überholungsabschnitt genau einen Wert, der für das in ANKE verwendete analytische Modell ausreichend ist. Will man das analytische Modell verfeinern und um alternative Fahrwege erweitern, wie WENDLER dies in seiner Dissertation vor-

schlägt, müssten entsprechend weitere Mindestzugfolgezeiten für jeden Zugfolgefall ermittelt werden [Wen99].

Die grundsätzlich andere Methode, unter Berücksichtigung der Belegungen weiterer Züge den Konflikt zu lösen, wird in den asynchronen Simulationsverfahren NSIM und STRESI angewendet. Hier werden für alle Züge und alle Fahrmöglichkeiten alle möglichen Sperrzeitentreppen vor der eigentlichen Simulation mit einer angenommenen Abfahrtzeit Null vorberechnet und dann zu dem tatsächlichen Zeitpunkt in die Belegungsmatrix eingetragen. Nachdem ein Konflikt erkannt wurde, werden mögliche alternative Sperrzeitentreppen eingelegt oder sonst die rückliegenden Halte verlängert. Da die Belegungsmatrix in diesen Programmen spaltenweise, d. h. anhand der Belegungselemente, und nicht anhand der Zugfahrten wie in FAKTUS aufgebaut ist, kann man entsprechend einfach die nächste ausreichend große Lücke in dem Belegungselement suchen und den Zug so sukzessive konfliktfrei einlegen. Nachträgliche Berechnungen der Fahr- und Belegungszeiten sind hier nicht erforderlich, und die spaltenweise Verkettung vereinfacht das Auffinden von Lücken.

Die Verwendung der Mindestzugfolgezeiten ist für das neue Simulationsverfahren nicht sinnvoll, da insbesondere bei hohen Belegungsgraden zusätzliche Iterationen von Fahrzeit- und Belegungsrechnungen bzw. Konflikterkennungen erforderlich wären. Ein Verfahren, das dagegen die Belegungen weiterer Züge gleichzeitig berücksichtigt, kann genauer arbeiten. Zudem können so die Auswirkungen von alternativen Fahrwegen korrekt beurteilt und keine falschen Entscheidungen aufgrund der alleinigen Betrachtung von zwei Zügen getroffen werden.

Durch die enge Verknüpfung mit FAKTUS ist es zudem sinnvoll, die Qualität der erzeugten Fahrpläne beizubehalten und weiterhin mit den exakten Belegungen zu rechnen und nicht aufgrund von Kennzahlen Entscheidungen zu treffen, die zu keinen optimalen Ergebnissen führen.

Ein Algorithmus, der die Simulation der Fahrplanerstellung nachbildet, sollte Pufferzeiten berücksichtigen können. Dieses ist bei der Betrachtung der Belegungen aller Züge einfacher möglich, da bei der Suche nach einer passenden Lücke die korrekten Belegungen einfach um die notwendigen Pufferzeiten zu den vorherigen und den nachfolgenden Zügen ergänzt werden können. Bei der Betrachtung von Mindestzugfolgezeiten kann zwar die Pufferzeit zwischen den beiden betrachteten Zügen berücksichtigt werden. Die Pufferzeiten zu den anderen Zügen können dann aber erst im Rahmen der folgenden Konflikt- und Pufferzeitenberechnung überprüft werden. Falls sie nicht ausreichen, müssten analog zu einem noch vorhandenen

Konflikt weitere Haltzeitverlängerungen realisiert oder eine vollständig andere Alternative zur Konfliktlösung verwendet werden.

Der Ansatz zur gleichzeitigen Betrachtung aller relevanten Belegungen wird daher weiter verfolgt. Allerdings ist das Vorberechnen und Abspeichern von Sperrzeiten nur dann sinnvoll, wenn die Anzahl der Züge und die der möglichen Laufwege pro Zug gering ist. Im Gegensatz zu STRESI, NSIM und auch Simu++ werden in FAKTUS keine Modellzüge verwendet, die eine ganze Reihe von Zügen repräsentieren, sondern die exakten Längen, Massen, Zugkräfte und Bremsvermögen jeder einzelnen Zugfahrt betrachtet. In dem neuen Simulationsverfahren sollen ebenfalls keine Modellzüge verwendet werden, damit die entwickelten Methoden zur Konfliktlösung problemlos im Rahmen des rechnergestützten Trassenmanagements eingesetzt werden können. So müssen vor der Simulation auch nicht die möglichen Laufwege für die einzelnen Züge festgelegt, eine möglichst sinnvolle Teilmenge bestimmt oder alle theoretisch möglichen Laufwege betrachtet werden. Aus den genannten Gründen werden daher keine vorberechneten Sperrzeitentreppen verwendet.

### 7.2.3 Konzeption der dualen Belegungsmatrix

Bei der Konfliktlösung sollen analog zu den bisherigen asynchronen Verfahren neben den Sperrzeiten der am Konflikt beteiligten Züge auch die der bereits in den Fahrplan eingelegten Züge berücksichtigt werden. Analog zu FAKTUS werden die Sperrzeiten allerdings nicht vorberechnet.

Entsprechend der neuen Simulationsstrategie muss zur Lösung eines Konflikts für den betrachteten Zug und geeignete Laufwegvarianten jeweils eine Haltzeitverlängerung am Anfang des aktuellen Überholungsabschnitts ermittelt werden, die alle Konflikte des Zuges in dem aktuellen Überholungsabschnitt löst. Beginnt der Zug im aktuellen Überholungsabschnitt, kann er sogar vollständig verschoben werden.

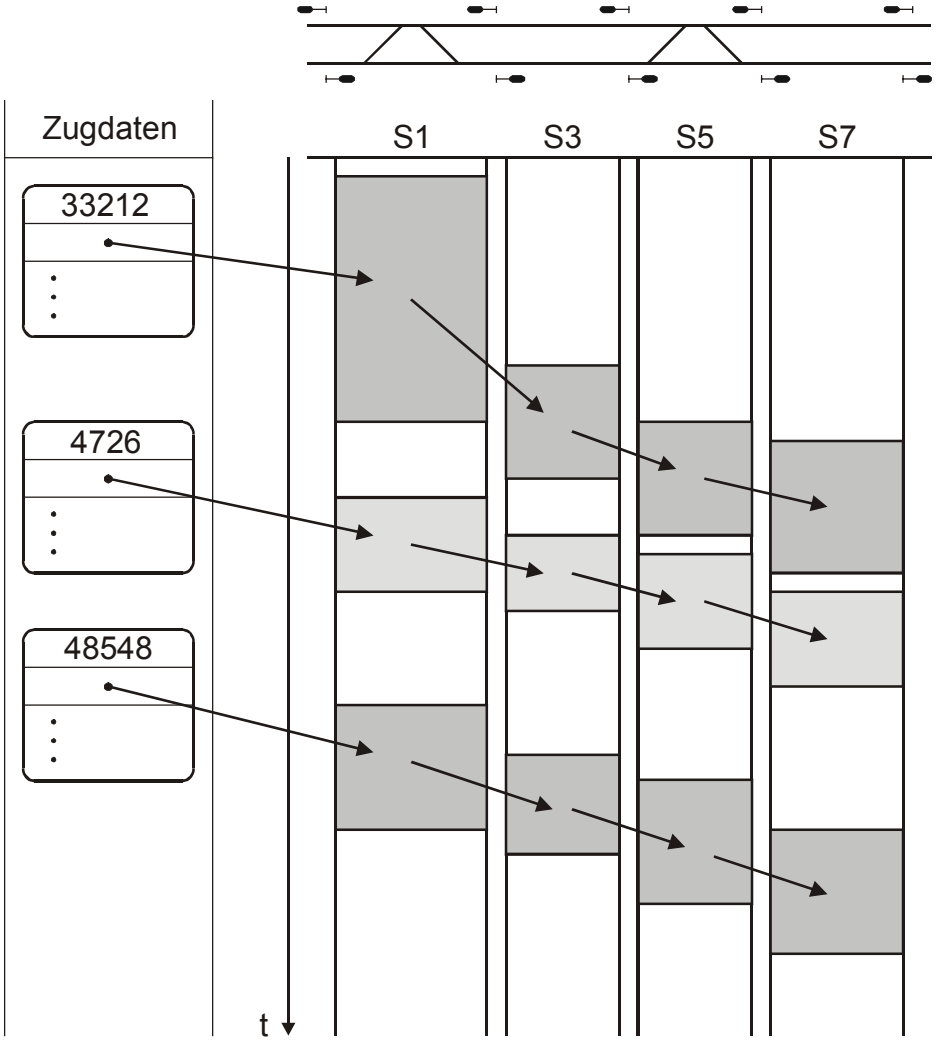


**Abb. 21: Aufbau der Belegungsmatrix in FAKTUS**

Wie in Abb. 21 dargestellt, sind die einzelnen Belegungen in FAKTUS anhand der Zugfahrten gespeichert. Es existiert keine direkte Möglichkeit, zu einem Belegungselement, wie einem Blockabschnitt oder einer Weiche, die zugehörigen Belegungen der einzelnen Züge zu ermitteln. Konflikte und Pufferzeiten werden in FAKTUS ermittelt, indem nach der Berechnung der Fahrzeit eines Zuges die Belegungen aller potentiellen Konfliktzüge sukzessive durchlaufen werden. Jede Belegung ist mit einer potentiell konfliktreichen Belegung desselben Belegungselements eines anderen Zuges auf zeitliche Überschneidung zu überprüfen. BRÜNGER betont, dass sich diese Vorgehensweise insbesondere für die manuelle Fahrplankonstruktion anbietet, da sich bei der Fahrplanbearbeitung die Belegungen aller Züge oft ändern und deshalb ein Einsortieren in eine aufwendige verkettete Datenstruktur zu vermeiden ist [Brü95]. Er führt weiter aus, dass in asynchronen Simulationsverfahren eine andere Situation vorliegt, da einmal eingelegte Züge nicht mehr verändert werden.

Die Konfliktlösung erfolgt in FAKTUS manuell durch einen Bearbeiter, dem im Konstruktionsfenster die Belegungen aller Züge grafisch angezeigt werden. Die Darstellung der Belegungsmatrix ist zweidimensional und Lücken zwischen den Zügen sind direkt erkennbar. Die Speicherung der Belegungselemente ist für den Bearbeiter uninteressant, solange sie effizient ist und ihn bei der Arbeit nicht einschränkt. Der Bearbeiter versucht vorhandene Konflikte zu lösen, indem er die Sperrzeitentreppe eines beteiligten Zuges manuell in eine ihm ausreichend groß erscheinende Lücke der Belegungsmatrix verschiebt. Nach diesem manuellen Eingriff berechnet FAKTUS die neuen Fahr- und Belegungszeiten des Zuges und ermittelt für die einzelnen Belegungselemente des betrachteten Zuges die vorhandenen Konflikte mit den Belegungen anderer Züge.

Ein automatisches Verfahren kann natürlich nicht mit der Intuition eines Anwenders arbeiten. Wie schon beschrieben, sollen die Konflikte auf der Grundlage der Belegungen der bereits eingelegten Züge gelöst werden. Würde man die Haltzeit nur um den Wert des erkannten Konflikts verlängern, würden genau wie bei der Verwendung von Mindestzugfolgezeiten nur zwei Züge betrachtet werden. Analog wären auch hier bei weiterhin vorhandenen Konflikten des Zuges im betrachteten Überholungsabschnitt Iterationen erforderlich, die jeweils eine neue Fahrzeit-, Belegungsrechnung und Konflikterkennung erforderlich machen. Daher sollten analog zu der in NSIM und STRESI nachgebildeten manuellen Vorgehensweise auch in dem neuen Verfahren geeignete Lücken für den konfliktbehafteten Zug in den vorhandenen Belegungen gesucht werden. Dieses wäre natürlich wesentlich einfacher, wenn die Belegungen entsprechend der Belegungselemente gespeichert wären.

Eine effiziente Ermittlung der Lücken ist bei der zugweisen Speicherung der Belegungen mit Hilfe einer zusätzlichen Datenstruktur möglich, deren Aufgabe es ist, die potentiell konfliktbehafteten Belegungen der anderen Züge bei den Belegungselementen, die der Konfliktzug verwendet, einzutragen. Dies ist notwendig, da beim Durchlaufen der einzelnen Belegungen eines Zuges noch nicht abzusehen ist, welche Belegungen eine ausreichend große Lücke begrenzen. Nach der Erzeugung dieser Datenstruktur können ohne Iterationen ausreichend große Lücken in den einzelnen Belegungselementen gefunden und so die notwendige Haltzeitverlängerung ermittelt werden. Dieses Vorgehen hat zudem den Vorteil, dass die Haltzeitverlängerung auf der Grundlage der vorhandenen Belegungen ermittelt werden kann, ohne weitere Fahrzeit- und Belegungsrechnungen durchführen zu müssen.

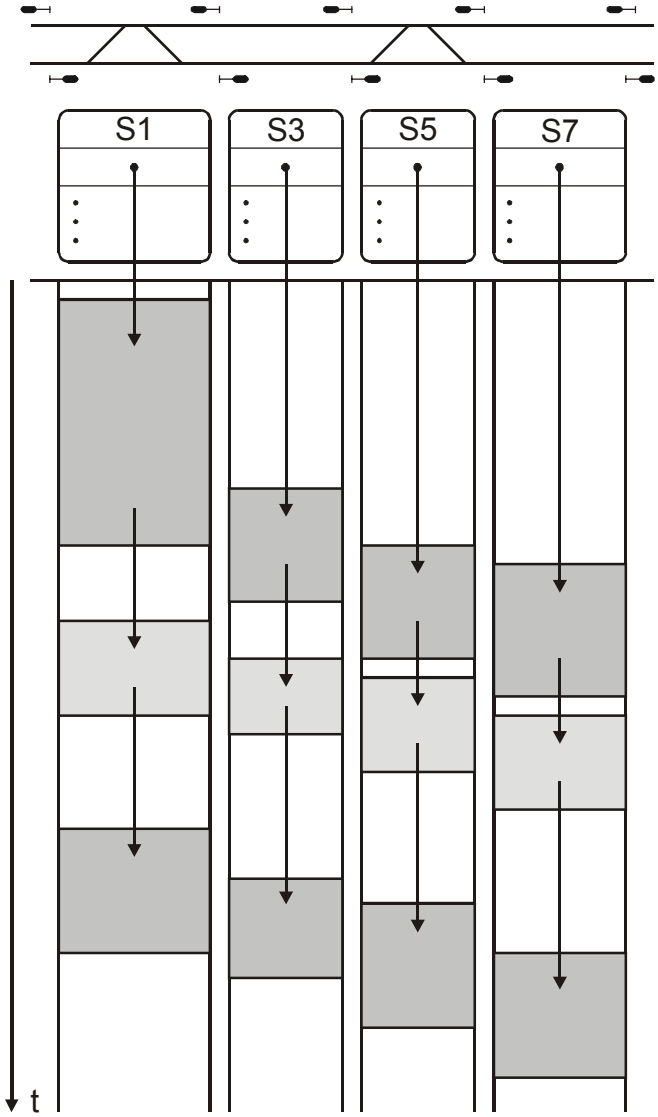


**Abb. 22: Duale Belegungsmatrix**

Die für diese Aufgabe neu zu erstellende und in Abb. 22 dargestellte Datenstruktur wird „duale Belegungsmatrix“ genannt, da sie nur eine andere Sicht auf die bereits berechneten Belegungen realisiert. Sie hat die Rolle einer „Spielwiese“, auf der sehr effizient Konfliktlösungen für den gesamten Überholungsabschnitt sukzessive erarbeitet werden können. Das zufriedenstellende und konfliktfreie Resultat kann zur Beurteilung der betrachteten Laufwegalternative benutzt und dann bei Bedarf in die eigentliche Belegungsrechnung von FAKTUS eingespielt werden. Im Gegensatz zu NSIM und STRESI ist es allerdings möglich, sich hier auf die Belegungselemente des aktuellen Zuges zu beschränken und anhand dieser die spaltenweise aufgebaute Belegungsmatrix zu entwickeln. Zudem brauchen auch nur die Züge betrachtet werden, die einen potentiellen Konflikt mit dem aktuellen Zug haben. Dies ist der Fall, wenn sie die gleichen Belegungselemente verwenden.

### 7.2.4 Elemente der dualen Belegungsmatrix

Bei einer Konfliktlösung müssen die Belegungen der anderen Züge berücksichtigt werden. Entsprechend der Simulationsstrategie werden die Züge analog zu den bisherigen asynchronen Verfahren gemäß ihrer Priorität eingelegt. Die Belegungen der Züge mit höherer Priorität müssen bei der Konfliktlösung grundsätzlich beachtet werden.

Wie schon in Kapitel 6.3.3 beschrieben, werden alle Züge einer Prioritätsstufe gebündelt eingelegt, um eine realistische Betrachtung eingleisiger Strecken zu ermöglichen und zudem das Problem der korrekten zeitlichen Sortierung der Zugfahrten in einem Netz zu umgehen. Daher sind bei der anschließenden Konfliktlösung neben den Belegungen der Züge mit einer höheren Priorität auch die der Züge mit der gleichen Priorität in den Belegungsdaten vorhanden und könnten bei der Lösung der einzelnen Konflikte komplett berücksichtigt werden. Dies würde aber bedeuten, dass ein am zeitlich ersten Konflikt beteiligter Zug in ungünstigen Fällen sehr weit verschoben wird, da später folgende Konflikte mit Zügen gleicher Priorität direkt mit gelöst werden. Dieser Ansatz kann insbesondere bei vielen Zugfahrten mit gleicher Priorität zu keinem zufriedenstellenden Ergebnis führen und ist daher nicht geeignet.

Auch die alleinige Betrachtung der Züge mit höherer Priorität bietet keine Lösung des Problems an, da bei einem Konflikt zwischen zwei Zügen der gleichen Prioritätsstufe zumindest der andere am Konflikt beteiligte Zug bei der Konfliktlösung berücksichtigt werden muss.

Aufgrund der Verwendung alternativer Laufwege und Umfahrungen bei der Konfliktlösung ist es allerdings möglich, dass die resultierenden Belegungen zu Konflikten mit denen anderer Zugfahrten der gleichen Priorität führen, die vor oder zeitgleich zu dem ursprünglichen Konflikt liegen. Werden diese neuen Konflikte bei der Beurteilung der Laufwegalternative nicht beachtet, befindet sich der nächste zu lösende Konflikt zeitlich vor dem zuletzt gelösten. Wenn ein Zug nur an dem ersten Konflikt beteiligt ist und deshalb bei der Lösung des zweiten nicht betrachtet wird, kann bei der Konfliktlösung dieses neuen Konfliktes wieder der ursprüngliche auftreten. Diese Schleife in der Konfliktlösung führt zwangsweise zu einer Endlosschleife im DV-System, die unbedingt zu verhindern ist.

Zur Erläuterung sind in Abb. 23 die Belegungen dreier Züge mit gleicher Priorität im Bereich des Kreuzungsbahnhofs einer eingleisigen Strecke dargestellt. Zwischen den Zügen k und j liegt ein Konflikt vor. Wenn bei der Konfliktlösung die Belegungen des

Zuges i nicht berücksichtigt werden, kann der Konflikt zwischen k und j durch einen alternativen Laufweg für den Zug j gelöst werden, in dem dieser das andere Kreuzungsgleis verwendet.

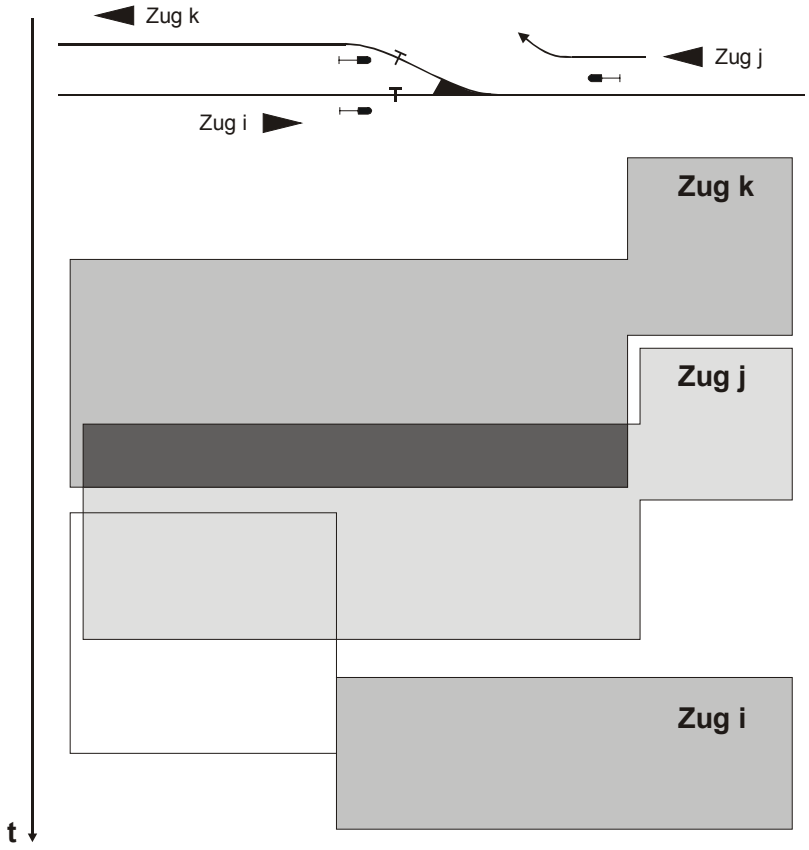


**Abb. 23: Konflikt zwischen den beiden Zügen k und j**

Die aufgrund des geänderten Laufwegs resultierenden Belegungen sind in Abb. 24 dargestellt. Der Konflikt zwischen den Zügen k und j ist aufgrund der Teilauflösung der Fahrstraße behoben. Allerdings liegt nun ein neuer Konflikt zwischen den Zügen j und i vor. Ohne Beachtung der Belegungen des nicht an diesem neuen Konflikt beteiligten Zuges k kann dieser Konflikt durch die Verwendung des ursprünglichen Kreuzungsgleises für Zug j gelöst werden. Hiermit liegt die ursprüngliche Ausgangssituation mit dem Konflikt zwischen den Zügen k und j wieder vor.

Dieses einfache aber dennoch realistische Beispiel dient zur Demonstration der möglichen Schleifen in der Konfliktlösung. In realen Projekten können auch wesentlich mehr Züge und größere Netzteile betroffen sein.

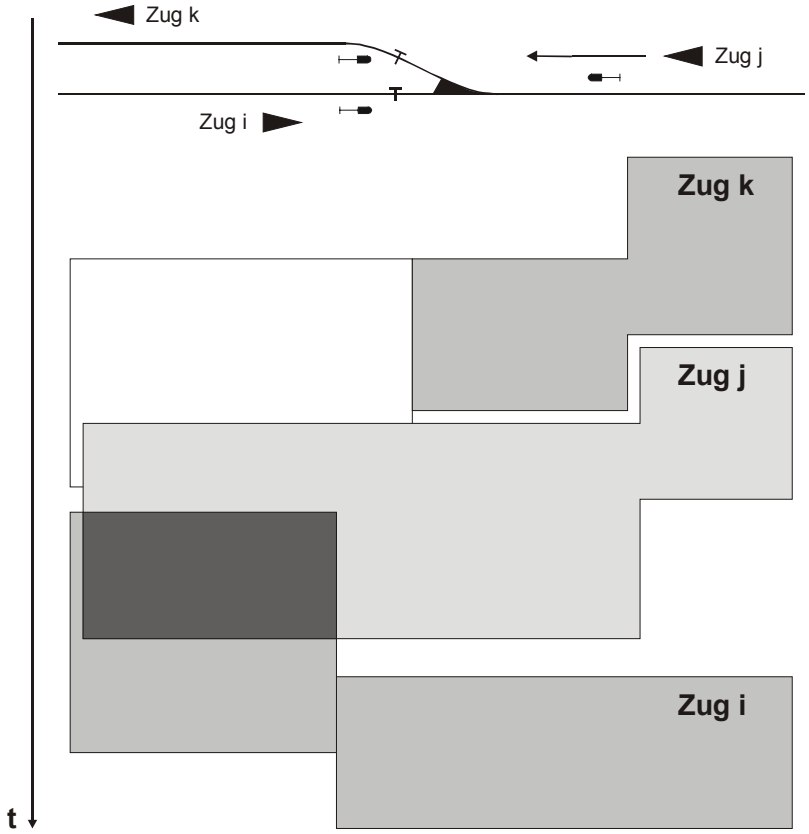


**Abb. 24: Konflikt zwischen den beiden Zügen j und i**

Zur Vermeidung dieser auf jeden Fall unerwünschten Schleifen muss für das neue Simulationsverfahren ein entsprechender Ansatz gefunden werden, der aus den zuvor genannten Gründen aber auch nicht alle Belegungen der Züge mit gleicher Priorität berücksichtigen darf. Dies kann erreicht werden, indem nur die Belegungen gleich priorisierter Züge betrachtet werden, die zeitlich nicht hinter dem betrachteten Konflikt liegen. Hierdurch ist die Schleife unterbrochen, da durch die Berücksichtigung dieser zusätzlichen Belegungen bei der Lösung eines Konflikts kein früherer oder gleichzeitiger entstehen kann, der schließlich Vorraussetzung für die geschlossene Kette ist.

Man beachte, dass die geschilderte Problematik keine Besonderheit der Konfliktlösung mit der dualen Belegungsmatrix ist, sondern bei dem anderen Ansatz mit den Mindestzugfolgezeiten ebenfalls von Bedeutung ist. Klassische Mindestzugfolgezeiten berücksichtigen nur zwei Züge auf der Grundlage ihrer gewöhnlichen Laufwege. Die alleinige Betrachtung von zwei Zügen führt in den entsprechenden Fällen zu analogen Endlosschleifen. Um ähnlich gelagerte Probleme zwischen mehr als zwei Zügen in der analytischen Welt zu beherrschen, erweiterte WENDLER das übliche Zwei-Zug-Modell zu einem Drei-Zug-Modell und zeigte die erweiterte Aussagekraft dieses mathematisch wesentlich anspruchsvolleren Modells [Wen99]. Durch

die explizite Betrachtung von Konstellationen mit drei Zügen kann ein Großteil der Ungenauigkeiten der analytischen Modelle akzeptabel behoben werden. Die Berücksichtigung weiterer Züge in einem geschlossenen Modell ist mathematisch noch anspruchsvoller und verspricht eine nur geringe Steigerung der Aussagekraft. Dagegen können bei einer Simulation die Belegungen aller potentiell zu einem Zug in Konflikt stehenden Züge – so genannte Störzüge – ohne größeren Aufwand direkt berücksichtigt werden.

### 7.2.5 Bestimmung des relevanten Überholungsabschnitts

Wie schon beschrieben, soll die in der dualen Belegungsmatrix zu ermittelnde Konfliktlösung innerhalb von Überholungsabschnitten erfolgen. Daher muss vor der eigentlichen Lösung ermittelt werden, in welchem Überholungsabschnitt des Zuges der ursprüngliche Konflikt aufgetreten ist. Hierzu wird in dem aktuellen Laufweg des Zuges die benachbarte Grenze eines Überholungsabschnittes gesucht, die eine Verschiebung der konfliktbehafteten Belegung ermöglicht. Hierbei kann es sich prinzipiell um einen Rand des betrachten Netzes oder eine Halteposition handeln, in der der haltende Zug überholt werden kann.

Zur Konfliktlösung kann der Halt eines Zuges verlängert werden, um so die konflikt--behaftete Belegung nach hinten zu verschieben. Es gibt allerdings Fälle, in denen eine Verlängerung des direkt vor dem Konflikt liegenden Halts zu keiner Verschiebung der Belegung oder nur zu einer Verschiebung ihres Endes führt. Ein Beispiel hierfür ist eine Weichenbelegung im Durchrutschweg eines Haltes, da diese nach einer vorgegebenen Zeit automatisch endet. Eine Verlängerung des zugehörigen Haltes hat daher keine Auswirkungen auf diese Belegung. Ist eine Haltbelegung selbst konfliktbehaftet, dann ist eine Verlängerung dieses Halts natürlich nicht sinnvoll. Aufgrund entsprechender Überprüfungen kann sichergestellt werden, dass eine Verlängerung des Halts am Anfang des gefundenen Überholungsabschnitts eine Konfliktlösung ermöglicht. Falls kein für die Konfliktlösung durch Haltzeitverlängerung relevanter Halt ermittelt werden konnte, beginnt der Überholungsabschnitt an der Netzgrenze oder am Beginn des Zuglaufes.

Nachdem ein geeigneter Halt des Zuges gefunden wurde, muss nun ermittelt werden, ob dieser zu einem Überholungsbahnhof gehört. Da diese im Gegensatz zu anderen Simulationsverfahren nicht vom Bearbeiter explizit festgelegt werden sollen, müssen sie von einem Algorithmus bestimmt werden. Hierbei wird jedoch nicht nur die jeweilige Betriebsstelle betrachtet, sondern auch die vor- und nachgelagerte, damit das Auffinden von Überholungsmöglichkeiten nicht an ungünstig gewählten

Betriebsstellengrenzen scheitert. Kann ein anderer Zug ausgehend von der gleichen Start-Betriebsstellengrenze zu der gleichen Ziel-Betriebsstellengrenze gelangen, ohne die zum Halt verwendete Infrastruktur zu benutzen, liegt ein Überholungsbahnhof vor.

Zusätzlich wird auch geprüft, ob eine Kreuzungsmöglichkeit vorliegt. Streng genommen ist diese Bedingung für Überholungsabschnitte natürlich nicht erforderlich. Andererseits macht es auf eingleisigen Strecken durchaus Sinn, Wartepositionen für Haltzeitverlängerungen zu verwenden, die Kreuzungen zulassen, aber keine Überholungen, da so eine dichterer Fahrplan auf eingleisigen Strecken möglich ist.

Analog zur Ermittlung des Überholungsanfangs wird auch das Ende des betrachteten Überholungsabschnittes, also die nächste Halteposition, in der der Zug überholt werden kann, oder die Netzgrenze ermittelt.

Durch die Bestimmung des Überholungsabschnittes, in dem der Konflikt aufgetreten ist, liegt der im Rahmen der Konfliktlösung zu verlängernde Halt fest. Aufgrund der Kenntnis des Überholungsabschnittes ist es zudem möglich, einzelne Lösungsalternativen direkt zu verwerfen. Durch die Wahl eines alternativen Laufwegs können zusätzliche Konflikte auftreten, die sich sogar in einem früheren Überholungsabschnitt befinden können. Solche Alternativen sollen nicht weiter betrachtet werden. Ansonsten gäbe es unnötige Schleifen in der globalen Simulationsstrategie, da ein schon konfliktfreier Abschnitt erneut betrachtet werden müsste.

### 7.2.6 Realisierung der dualen Belegungsmatrix

Nachdem die duale Belegungsmatrix konzipiert, die darin zu berücksichtigenden Belegungen und die Grenzen des aktuellen Überholungsabschnittes bestimmt wurden, soll nun die Realisierung der dualen Belegungsmatrix vorgestellt werden.

Die existierenden Module von FAKTUS zur Belegungsrechnung und Konflikterkennung können leicht um die Funktionalität zur Erzeugung der dualen Belegungsmatrix erweitert werden. Die Konflikte eines Zuges werden in FAKTUS berechnet, indem alle Belegungen der gleichzeitig fahrenden Züge sukzessive durchlaufen werden. Dabei wird jeweils überprüft, ob ein Konflikt zwischen beiden Zügen in diesem Belegungselement möglich ist. Erst wenn dies der Fall ist, werden die Belegungen der Züge miteinander verglichen und falls eine Überschneidung festgestellt wurde, ein Eintrag für den erkannten Konflikt erzeugt. Für das neue Simulationsverfahren können genau diese Methoden der Konflikterkennung von FAKTUS dahingehend

erweitert werden, dass bei Bedarf die sowieso bestimmten potentiell konfliktbehafteten Belegungen anderer Züge in der dualen Belegungsmatrix gespeichert werden. Bei der grundsätzlich durchzuführenden Berechnung der resultierenden Konflikte nach der Wahl eines alternativen Laufwegs kann mit Hilfe dieses Verfahrens sehr effizient die duale Belegungsmatrix erzeugt werden, ohne dass ein aufwändiger zusätzlicher Lauf durch die Belegungsdaten von FAKTUS erforderlich ist. Da der Halt des aktuellen Zuges zur Konfliktlösung verlängert werden soll, ist es allerdings erforderlich, nicht nur die exakt gleichzeitig fahrenden Züge zu betrachten, sondern die mögliche Verschiebung mit einzukalkulieren. In FAKTUS müssen dagegen nur Züge betrachtet werden, die sich gleichzeitig mit dem aktuellen Zug im betrachteten Netz befinden. Durch die Angabe einer maximalen Haltzeitverlängerung kann bestimmt werden, in welchem Zeitraum weitere Züge betrachtet werden sollen. Hierdurch wird es möglich, den zusätzlichen Aufwand des Verfahrens zu steuern.

### 7.2.7 Konfliktlösung in der dualen Belegungsmatrix

Das Ziel der Konfliktlösung ist es, alle Konflikte des Zuges unter Berücksichtigung des zuvor bestimmten Überholungsabschnittes durch eine Verlängerung des Haltes am Anfang zu lösen. Allerdings wird die Haltzeit nicht nur für die Dauer des aktuellen Konfliktes verlängert, da hierdurch direkt ein neuer Konflikt mit einem anderen Zug auftreten kann. Es wird stattdessen in der Belegungsspalte die nächste Lücke für den aktuellen Zug gesucht, die ausreichend groß für seine Belegungszeit und je nach Simulationsanwendung auch für die erforderlichen Pufferzeiten ist. Die Suche kann aufgrund der spaltenweisen Anordnung der Belegungselemente sehr einfach durchgeführt werden.

Der Halt wird um den errechneten Wert verlängert und alle betroffenen Belegungen des Zuges in der dualen Belegungsmatrix angepasst. Danach wird überprüft, ob es trotz der Verlängerung des Haltes weiterhin einen Konflikt im aktuellen Überholungsabschnitt gibt. Ist dies der Fall, wird das oben beschriebene Verfahren solange iteriert, bis es keine Konflikte mehr gibt.

Beginnt der Zug am Anfang des konfliktbehafteten Überholungsabschnittes mit einem Halt, wird das oben beschriebene Verfahren verwendet, allerdings wird der Halt nicht verlängert, sondern der Zug um den gleichen Betrag später eingelegt. Beginnt der konfliktbehaftete Überholungsabschnitt mit dem Einbruch des Zuges, ist dagegen keine Konfliktlösung durch Verlängerung einer Haltzeit innerhalb des betrachteten Netzes möglich. Es kann allerdings sein, dass Wartepositionen außer-

halb des Netzes durch entsprechende Haltzeitverlängerungen die Konflikte lösen können.

Bei dem beschriebenen Verfahren können zwei problematische Situationen auftreten. So kann eine Verlängerung des Haltes nicht möglich sein, da sich eine Überschneidung mit dem Halt eines anderen Zuges ergeben würde. Außerdem ist es möglich, dass eine Haltzeitverlängerung errechnet wird, die länger ist als die maximale Haltzeitverlängerung und nur zur Konfliktlösung führt, weil keine weiteren Belegungen in der dualen Belegungsmatrix mehr enthalten sind. In beiden Fällen würden die ermittelten „Konfliktlösungen“ in der, jeder Änderung eines Zuges folgenden Konflikterkennung von FAKTUS keinen Bestand haben und werden daher auch in der Simulation nicht weiter betrachtet werden. Man beachte, dass die Festlegung einer maximalen Haltzeitverlängerung sinnvoll ist (vgl. Abschnitt 7.2.6), da eine Verlängerung der Haltzeit eines ICEs um mehrere Stunden mit Sicherheit nicht erwünscht sein kann. Aber auch bei anderen Zugarten führen große Werte zu nicht mehr marktfähigen Angeboten. Es sollte daher für jede Zugart eine großzügig bemessene obere Grenze vom Anwender als Parameter definiert werden, die zudem die Effizienz der Konfliktlösung mit der dualen Belegungsmatrix deutlich beeinflusst.

## 7.3 Konfliktlösung durch Betriebshalte

In diesem Abschnitt wird eine Lösung von Konflikten mit Hilfe von Betriebshalten vorgestellt. Im Gegensatz zu den schon zuvor betrachteten Verkehrshalten, die der Besteller eines Zuges vorgibt, handelt es sich bei Betriebshalten[21] um zusätzliche Halte, die zur Erstellung eines konfliktfreien Fahrplans eingeführt werden. Nach einer Diskussion der Verwendung von Betriebshalten bei der Fahrplankonstruktion wird erläutert, wie diese im neuen Simulationsverfahren realisiert werden können.

### 7.3.1 Verwendung von Betriebshalten

Eine mögliche Konfliktlösung insbesondere bei Güterzügen ist die Einführung zusätzlicher Betriebshalte. Da Güterzüge im Allgemeinen wenige Verkehrshalte haben, ist es oft schwierig, Konflikte mit Hilfe von Haltzeitverlängerungen zu lösen. Da aber nicht alle Konflikte allein durch alternative Laufwege gelöst werden können,

[21] Die DB Netz AG bezeichnet diese im Rahmen der Konstruktion eingeführten Halte als Konstruktionshalte [DB01c].

bleibt ohne die Einführung zusätzlicher Betriebshalte oft nur die Möglichkeit, die Zugfahrt später einzulegen oder vorhandene Halte stark zu verlängern. Aufgrund der zum Teil sehr langen Laufwege der Güterzüge ist es oft problematisch, eine ausreichende Lücke zwischen den vorhandenen Belegungen zu finden. Auch wenn die Suche erfolgreich ist, liegt die gefundene Zugtrasse oft weit von der Wunschlage entfernt.

Viele Güterzüge haben zudem eine eher niedrige Priorität und werden daher bei der Einlegung in das Belegungsblatt erst spät berücksichtigt. Daher ist das Auffinden von konfliktfreien Trassen für Güterzüge insbesondere auf Mischbetriebsstrecken ohne Einführung zusätzlicher Betriebshalte sehr schwierig.

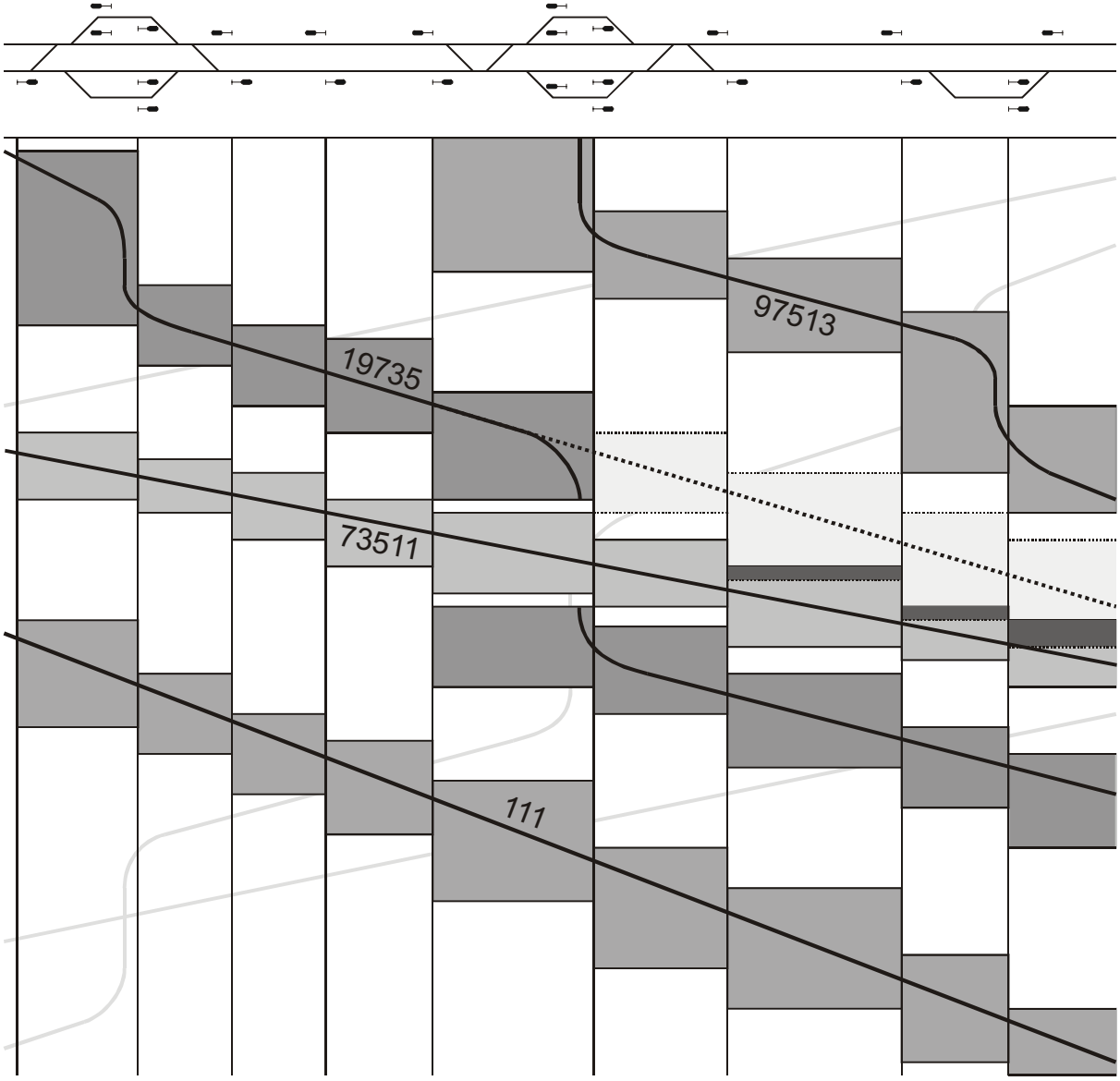


**Abb. 25: Konfliktlösung durch zusätzlichen Betriebshalt**

In Abb. 25 ist ein Konflikt zwischen den Zügen 19735 und 73511 und seine mögliche Lösung durch einen neu eingefügten Betriebshalt des 19735 im rückliegenden Überholungsbahnhof dargestellt. Aufgrund der zusätzlichen Bremsung bis zum Stillstand und dem erneuten Anfahren entsteht hierbei unabhängig von der notwendigen Haltzeit ein Fahrtzeitverlust.

Betriebshalte können grundsätzlich auch bei Personenzügen eingeführt werden. Diese sind von den Fahrgästen allerdings nicht erwünscht, da sie die Beförderungszeiten scheinbar unnötig verlängern. Im Personenverkehr werden daher bei der Fahrplankonstruktion entsprechend der langjährigen Praxis der Deutschen Bundesbahn Betriebshalte möglichst vermieden. Wenn dieses insbesondere auf eingleisigen Strecken aus Gründen des Durchsatzes aber nicht möglich ist, sollten sie zumindest an Bahnsteigen durchgeführt werden, damit ein zusätzlicher Reisendenwechsel möglich ist.

Natürlich sinkt durch die Einführung eines Betriebshaltes auch die Attraktivität eines Güterzuges für die potentiellen Verlader. Daher gibt es seit der Bahnreform in Deutschland zunehmend Güterverkehrsunternehmen, die die aus der Zeit der Bundesbahn stammende Praxis der Überholung von Güterzügen während zusätzlicher Betriebshalte nicht mehr hinnehmen wollen. Allerdings gibt es ohne Verwendung der Betriebshalte oft keine andere Möglichkeit, eine freie Trasse zwischen den bestehenden Belegungen zu finden, wenn der Zug nicht mit einer hohen Priorität eingelegt werden kann. Dies ist aufgrund der Bedeutung und der zu realisierenden Einnahmen im Allgemeinen dem schnellen und vertakteten Personenverkehr vorbehalten.

### 7.3.2 Ermittlung möglicher Betriebshalte

In dem neuen Simulationsverfahren sollen Betriebshalte insbesondere für Güterzüge bei der Konfliktlösung berücksichtigt werden, damit auch für diese marktfähige Trassen entstehen können, die nicht zu stark von den Wunschlagen entfernt sind. Allerdings kann der Benutzer für jeden Zug explizit festlegen, ob Betriebshalte ermittelt werden sollen. Für Güterzüge ist dies auch der Vorgabewert, für Personenzüge aus den genannten Gründen nicht. Entsprechend der Simulationsstrategie wird über die Realisierung eines ermittelten Betriebshaltes erst nach einem Vergleich mit den anderen Alternativen zur Konfliktlösung entschieden.

Betriebshalte sollen nur dann zur Konfliktlösung verwendet werden, wenn ein Halteplatz mit entsprechender Länge zur Verfügung steht. Daher brauchen bei der

Ermittlung geeigneter Laufwege für Betriebshalte nur die Fahrwege berücksichtigt werden, die eine entsprechende Halteposition haben und zudem vor dem Konflikt liegen. Schon in der Konfliktbetriebsstelle können sich geeignete Haltepositionen vor dem Konflikt befinden. Bei der grundsätzlich vor der Konfliktlösung durch Betriebshalte durchzuführenden Beurteilung der ermittelten alternativen Laufwege kann zusätzlich überprüft werden, ob dieser Laufweg in der Konfliktbetriebsstelle eine geeignete Warteposition vor dem Konflikt enthält. Ist dies der Fall, kann der Laufweg für eine weitere Verwendung bei der Konfliktlösung durch Betriebshalte vorgemerkt werden, wenn diese erforderlich werden sollte.

Ansonsten kann der in Kapitel 7.1 beschriebene Algorithmus zur Bestimmung alternativer Laufwege leicht um die Ermittlung geeigneter Wartepositionen für Betriebshalte erweitert werden. Im aktuellen Überholungsabschnitt müssen ausgehend von dem ursprünglichen Laufweg des betrachteten Zuges alternative Laufwege gesucht werden, die direkt vor der Konfliktbetriebsstelle liegende, geeignete Wartepositionen enthalten.

Sind die alternativen Laufwege mit möglichen Wartepositionen für Betriebshalte ermittelt worden, sollen die hieraus resultierenden Konfliktlösungen beurteilt werden. Hierzu müssen zuvor die exakten Auswirkungen des neuen Haltes auf den Zug ermittelt werden. Dieses ist nur nach einer neuen Berechnung der Fahr- und Belegungszeiten des Zuges möglich. Hierbei wird zunächst eine Mindesthaltzeit verwendet, die dann im Rahmen der Beurteilung dieser Laufwegvariante entsprechend verlängert werden kann. Man beachte, dass Konflikte schon aufgrund der Fahrzeitverlängerung, die sich durch das notwendige Abbremsen und erneute Anfahren ergibt, gelöst sein können. Allerdings muss in der Mindesthaltzeit zumindest das Lösen der Bremse beim stehenden Zug berücksichtigt werden.

Nach der Berechnung der exakten Belegungszeiten kann wie bei anderen Laufwegalternativen mit Hilfe der dualen Belegungsmatrix die erforderliche Verlängerung der Haltzeit berechnet werden, um alle Konflikte im aktuellen Überholungsabschnitt zu lösen. Der Überholungsabschnitt beginnt in diesem Fall mit der Betriebsstelle, in der sich der neue Betriebshalt befindet.

### 7.3.3 Anpassung vorhandener Konzepte

Betriebshalte sollen zur Lösung von Konflikten möglichst sparsam verwendet werden. Dennoch müssen die bisherigen Verfahren zur Ermittlung der erforderlichen

Haltzeitverlängerung und der alternativen Laufwege an die Betrachtung von Betriebshalten angepasst werden.

Schon bei der Ermittlung alternativer Laufwege müssen bereits verwendete Betriebshalte berücksichtigt werden. Dies darf aber nicht dazu führen, dass Betriebshalte als Zwangspunkte angesehen werden, die mögliche Umfahrungen verhindern.

Bei der Ermittlung der einem Zug in einer Betriebsstelle zur Verfügung stehenden Fahrmöglichkeiten müssen neben den planmäßigen Halten auch die Betriebshalte berücksichtigt werden, damit der Zug einen erforderlichen Betriebshalt auch auf dem alternativen Fahrweg realisieren kann.

Bei der Überprüfung, ob ein ermittelter alternativer Fahrweg alle Restriktionen der Bestellung erfüllt, müssen weiterhin nur die planmäßigen Halte berücksichtigt werden. So können Umfahrungen unabhängig von Betriebshalten gefunden werden. Wird allerdings eine Betriebsstelle mit einem Betriebshalt verwendet, stehen nur Fahrwege zur Verfügung, die diesen realisieren können. Mit diesem Ansatz werden alte Konfliktlösungen nicht unnötig verworfen.

Im Rahmen der Beurteilung alternativer Wege durch die duale Belegungsmatrix müssen vorhandene Betriebshalte bei der Ermittlung der Überholungsabschnitte berücksichtigt werden, damit diese weiter genutzt werden und ein Zug so möglichst wenig Betriebshalte auf seinem Laufweg erhält. Aufgrund der sukzessiven Lösung von Konflikten könnten ansonsten mehrere Betriebshalte in kurzem Abstand aufeinander folgen, zu deren Realisierung aufgrund der notwendigen Abbremsung und des erneuten Anfahrens jeweils viel Zeit erforderlich ist.

## 7.4 Konfliktlösung durch Verlängerung der Fahrzeiten

Prinzipiell können Konflikte auch durch die Verlängerung von Fahrzeiten, dem so genannten Biegen, gelöst werden. Wie in Kapitel 6.4.3 erläutert, wird diese Art der Konfliktlösung in den existierenden asynchronen Simulationsverfahren aus konzeptionellen Gründen nicht verwendet, im Rahmen des rechnergestützten Trassenmanagements aber durchaus eingesetzt.

In Abb. 26 ist ein Konflikt zwischen zwei Zügen dargestellt. Aufgrund der unterschiedlichen Geschwindigkeiten verringert sich der Abstand zwischen den Belegungen beider Züge, bis sie sich schließlich überschneiden. Durch eine künstliche Verlangsamung des zweiten Zuges kann dieser Konflikt gelöst werden. Mit der Fahrzeit des Zuges vergrößern sich dann auch die Belegungszeiten in den entsprechenden

Elementen, wodurch sich die jeweils verbleibende Kapazität bezogen auf das bestellte Zugmix verringert und zudem zusätzliche Konflikte entstehen können.

Aufgrund der Aufgabenstellung und der Bedeutung der Kompatibilität mit den existierenden Verfahren ist die Verwendung dieser Art der Konfliktlösung im neuen Simulationsverfahren zur Ermittlung von Kennwerten für eisenbahnbetriebswissenschaftliche Untersuchungen, die insbesondere der Ermittlung von Kapazitätsengpässen dienen, nicht sinnvoll. Zur Realisierung von DV-Systemen, die das Trassenmanagement automatisieren, sollte sie zumindest als Option zur Verfügung stehen. Im Folgenden wird daher dargestellt, wie die Verlängerung von Fahrzeiten in die Konfliktlösung des neuen Simulationsverfahrens integriert werden kann.

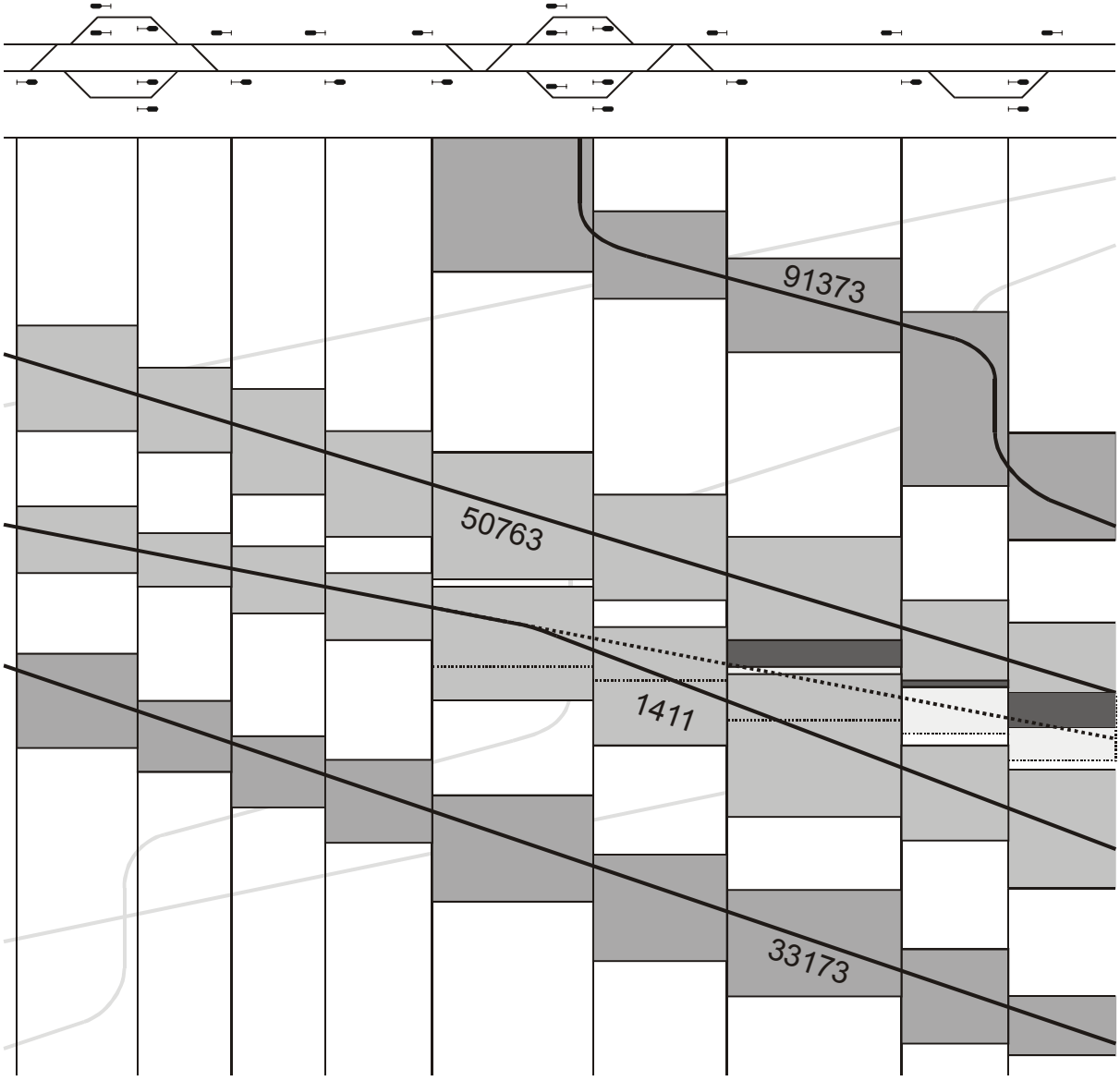


**Abb. 26: Konfliktlösung durch Verlängerung der Fahrzeiten**

In FAKTUS kann der Bearbeiter für einen Zug eine zusätzliche Fahrzeit zwischen zwei Betriebsstellen wahlweise über eine konkrete Zeitangabe oder über eine auf die bisherige Fahrzeit bezogene Prozentangabe eingeben. Beginn und Ende der Fahrzeitverlängerung sind bei durchfahrenden Zügen die jeweiligen Betriebsstellenmitten und sonst die verwendeten Haltepositionen. Da sich durch eine Verlängerung der Fahrzeit weder die Reihenfolge der Züge ändern kann noch andere Belegungselemente verwendet werden, ist nicht jeder Konflikt auf diese Weise lösbar. Mit den Fahrzeiten ändern sich allerdings alle zugehörigen Belegungszeiten, wodurch zusätzliche Konflikte entstehen können.

Im Rahmen einer automatischen Konfliktlösung müssen also Beginn, Ende und die Höhe der Fahrzeitverlängerung ermittelt werden. Damit keine zusätzlichen Konflikte in rückliegenden Überholungsabschnitten auftreten können, darf die Fahrzeitverlängerung frühestens am Anfang des aktuellen Überholungsabschnittes beginnen. Die Fahrzeitverlängerung muss so durchgeführt werden, dass die notwendigen Verschiebungen in den konfliktbehafteten Belegungen realisiert werden. Ansonsten existieren insbesondere bei langen Überholungsabschnitten viele Freiheitsgrade bei der Wahl von Beginn und Ende der Fahrzeitverlängerung. Die Höhe kann dann direkt aus den zur Lösung der einzelnen Konflikte erforderlichen Verschiebungen ermittelt werden.

Grundsätzlich gilt, dass sich bei einem kürzeren Abschnitt weniger Belegungen des Zuges durch die Fahrzeitverlängerung verändern, wodurch die Gefahr zusätzlicher Konflikte sinkt und der Bereich der Kapazitätsreduzierung verkleinert wird. Allerdings muss die zur Konfliktlösung notwendige Fahrzeitverlängerung so auf weniger Fahrzeit verteilt werden, woraus eine stärkere Geschwindigkeitsreduzierung resultiert.

Analog zu den alternativen Fahrwegen ist es nicht möglich, die Auswirkungen einer Biegealternative ohne Betrachtung der Belegungen der anderen Zugfahrten umfassend zu beurteilen. Dies kann sowohl mit Hilfe der Belegungsrechnung von FAKTUS als auch mit der dualen Belegungsmatrix geschehen. Letztere muss hierzu allerdings um Routinen erweitert werden, die die Auswirkungen einer Fahrzeitverlängerung auf die Belegungselemente ermittelt. Zusätzlich sollte der Anwender einen Grenzwert für die maximale Fahrzeitverlängerung als Prozentwert vorgeben, damit keine zu starken Geschwindigkeitseinbrüche und zugehörige Kapazitätsreduzierungen auftreten können. Darüber hinaus ist ein weiterer Grenzwert sinnvoll, der die gesamte Beförderungszeitverlängerung durch alle Konfliktlösungen begrenzt.

Innerhalb des Simulationsverfahrens können problemlos unterschiedliche Biegealternativen erzeugt werden, die sich auf den aktuellen Überholungsabschnitt beziehen und die vorhandenen Konflikte lösen. Da die Verlängerung von Fahrzeiten weder die verwendeten Fahrwege noch die Überholungsabschnitte tangiert, kann diese Art der Konfliktlösung einfach in die bisherige Simulationskonzeption integriert werden.

Das Ziel eines automatisierten Trassenmanagements besteht in der schnellen Erzeugung möglichst hochwertiger Fahrpläne auf der Grundlage der jeweiligen Trassenbestellungen. Mit vorhandenen Kapazitätsengpässen muss auf dieser Planungsebene möglichst pragmatisch umgegangen werden, weshalb das Biegen zur Durchsatzsteigerung in der Praxis eingesetzt wird. Da die geringere Fahrgeschwindigkeit die Beförderungs- und Belegungszeiten erhöht und die verbleibende Trassenkapazität insbesondere für schnellere Züge senkt, sollte das Biegen im Rahmen des Trassenmanagements jedoch nicht als Standardverfahren zur Konfliktlösung eingesetzt werden. Es kann aber durchaus sinnvoll sein, es zur Konfliktlösung innerhalb ausgewiesener Kapazitätsengpässe einzusetzen oder als letzte Möglichkeit, wenn keine andere Art der Konfliktlösung erfolgreich ist und die Trasse sonst nicht realisiert werden könnte. Allerdings berücksichtigt ein Fahrplan, der auf dem starken Biegen vieler Züge beruht, das durch die Trassenbestellungen vorgegebene Zugmix nicht in adäquater Weise und nutzt so die vorhandene Trassenkapazität nicht geeignet. Daher sollten, auch im Sinne der Diskriminierungsfreiheit der Trassenvergabe, vom Eisenbahninfrastrukturunternehmen feste Regeln für die Verlängerung von Fahrzeiten beispielsweise in explizit ausgewiesenen Engpassabschnitten veröffentlicht werden, entsprechend derer bei einer Konfliktlösung verfahren wird.

# 8 Simulationsverfahren BABSI

Gemäß der in den letzten Kapiteln vorgestellten Konzepte und Algorithmen wurde das Simulationsverfahren BABSI[22] entwickelt. In diesem Kapitel sollen nun dieses neue DV-Werkzeug und seine ersten Anwendungen beschrieben werden. Dabei werden auch Implementierung und Bedienung des Systems kurz erläutert. Entsprechend der Zielrichtung dieser Arbeit stehen allerdings die eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Aspekte im Vordergrund.

Zunächst wird die Systemarchitektur skizziert, die konkrete Realisierung der automatischen Konfliktlösung und die einzelnen Simulationsmodi beschrieben, danach werden die Benutzeroberfläche vorgestellt, erste Anwendungserfahrungen dargestellt und abschließend zukünftige Einsatzgebiete von BABSI aufgezeigt.

## 8.1 Systemarchitektur

Das neue Simulationsverfahren BABSI verwendet, wie in Kapitel 6.1 festgelegt wurde, die konzeptionelle Basis des Verfahrens FAKTUS zur rechnergestützten Trassenvergabe und erweitert diese entsprechend der zusätzlichen Anforderungen. Bei der Implementierung von BABSI wurden nicht nur die Konzepte von FAKTUS berücksichtigt, sondern darüber hinaus auch die bewährten Softwaremodule zur Infrastrukturmodellierung, Fahrzeit- und Belegungsrechnung wieder verwendet. Hierdurch kann eine über die Grundkonzepte hinausgehende Kompatibilität beider Verfahren erreicht werden, die einen direkten wechselseitigen Austausch von Daten und Algorithmen ermöglicht und so die zu erwartenden Synergieeffekte weiter steigert. Durch die Wiederverwendung bewährter Komponenten ist zudem eine wesentlich einfachere Validierung des neuen Simulationsverfahrens möglich.

Aus softwaretechnischer Sicht ist allerdings eine exakte Trennung der wiederverwendeten Basiskomponenten von den neuen Simulationsalgorithmen zweckmäßig, um sowohl Änderungen der Basiskomponenten als auch spätere Erweiterungen zu erleichtern. Wie in Abb. 27 dargestellt, besteht BABSI neben dem Teilsystem zur Realisierung der Benutzeroberfläche aus zwei weiteren, weitgehend unabhängigen Teilsystemen. Das eine enthält die wiederverwendeten Module von FAKTUS in der so genannten FAKTUS-Basismaschine und das andere die neu entwickelten Algorithmen zur automatischen Konfliktlösung. Die FAKTUS-Basismaschine hat keine

[22] Das Akronym BABSI steht für Bahnbetriebssimulation.

Kenntnis von einer automatischen Konfliktlösung und die automatische Konfliktlösung verwendet die Standard-Routinen der Fahrplanbearbeitung von FAKTUS. Die schmale Kopplung der Teilsysteme ermöglicht eine relativ einfache Anpassung an neue Versionen von FAKTUS und eine einfache Portierung der Simulationsroutinen auf andere Basismaschinen zur Fahrplankonstruktion, wenn diese analog zu FAKTUS auf der Grundlage von Sperrzeiten arbeiten.

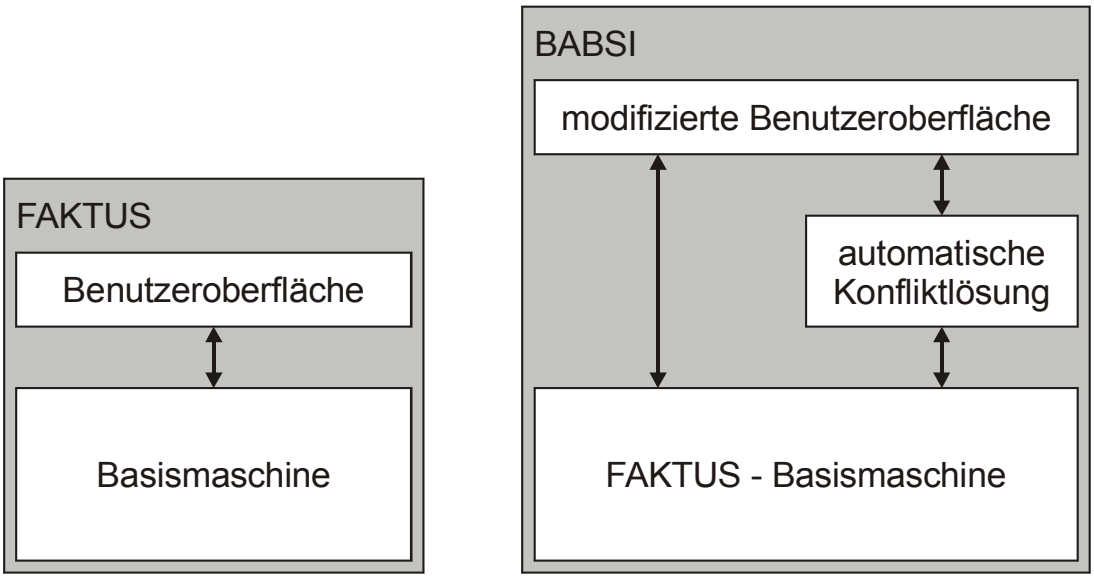


**Abb. 27: Systemarchitekturen von FAKTUS und BABSI**

## 8.2 Realisierung der automatischen Konfliktlösung

Im folgenden Abschnitt wird die Realisierung der automatischen Konfliktlösung in BABSI beschrieben. Diese beruht auf dem in Kapitel 6 vorgestellten Konzept für ein neues Simulationsverfahren und verwendet dabei die in Kapitel 7 entwickelten Algorithmen als Basisbausteine für die entsprechenden Teilaufgaben.

In Abb. 28 sind die einzelnen Phasen einer Konfliktlösung in BABSI mit Hilfe eines groben Programmablaufplanes dargestellt. Wie schon beschrieben, werden zu einem Konflikt zunächst mögliche Lösungen für beide Züge ermittelt, dann die beste ausgewählt und schließlich realisiert.

Bei zwei Zügen mit gleicher Priorität kann nicht einer von beiden vorab bestimmt werden, für den allein unterschiedliche Alternativen zur Konfliktlösung ermittelt werden. Eine fundierte Vorauswahl eines Zuges wäre eigentlich nur unter Berücksichtigung aller Alternativen zur Konfliktlösung und den resultierenden Auswirkungen möglich. Für eine exakte Beurteilung einer Alternative müssten die sich ergebenden

Belegungszeiten und auch die Konflikte mit anderen Zügen bekannt sein. Hierzu wäre allerdings eine genaue Betrachtung der Alternative unter Berücksichtigung der anderen Zugfahrten erforderlich, die den akzeptablen Aufwand für eine Vorauswahl weit übersteigt. Andererseits würde eine vereinfachte Betrachtung leicht zu falschen Ergebnissen der Vorauswahl führen. Da dies aus Qualitätsgründen nicht akzeptabel sein kann und sich der Aufwand für eine fundierte Vorauswahl kaum von dem einer vollständigen Betrachtung beider Züge unterscheidet, wurde letztere Variante in BABSI gewählt.

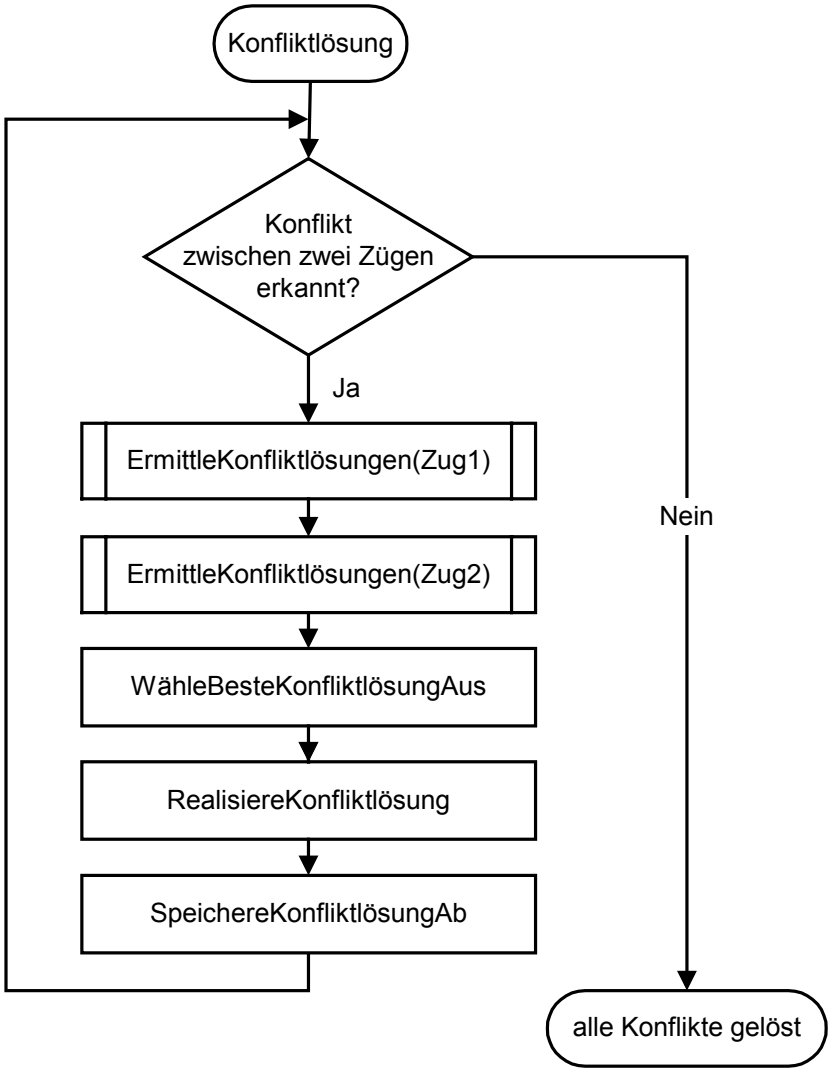


**Abb. 28: Phasen einer Konfliktlösung**

Die einzelnen Phasen einer Konfliktlösung werden in den folgenden Abschnitten genauer erläutert, wobei jeder Phase ein eigenes Unterkapitel mit entsprechendem Namen gewidmet ist.

### 8.2.1 Ermittle Konfliktlösungen

Nachdem ein Konflikt zwischen zwei Zugfahrten erkannt wurde, werden für die beiden Zugfahrten jeweils mögliche Konfliktlösungen ermittelt.

In Abb. 29 ist der genaue Ablauf der Berechnung möglicher Alternativen zur Konfliktlösung dargestellt. Da die einzelnen Bausteine der Konfliktlösung in den einzelnen Abschnitten des Kapitels 7 schon genau beschrieben wurden, braucht an dieser Stelle nur noch das Zusammenspiel erläutert zu werden.

Die im Ablaufdiagramm zur Gruppierung eingesetzten Kästchen beschreiben zusammenhängende Einheiten zur Ermittlung möglicher Konfliktlösungen, die jeweils aus einer Ermittlungs- und einer Bewertungskomponente bestehen. Um die Anzahl der weiter zu betrachtenden Konfliktlösungen nicht unnötig zu erhöhen, arbeiten diese beiden Komponenten verschränkt miteinander. Zunächst werden die naheliegenden Alternativen ermittelt und bewertet. Stellt sich hierbei heraus, dass diese bereits die vom Benutzer gestellten Mindestanforderungen erreichen, ist es nicht mehr erforderlich, weitere in der Realisierung aufwändigere Alternativen zu ermitteln und bei der weiteren Konfliktlösung zu berücksichtigen. Durch diesen Ansatz stehen diese zusätzlichen Alternativen allerdings zur Verfügung, wenn auf einem anderen Weg keine akzeptable Konfliktlösung erreicht werden kann. Auch an dieser Stelle kann zur Beurteilung einer Alternative nicht auf die Bewertung anhand der notwendigen Haltzeitverlängerung verzichtet werden.

Im Gegensatz zu den bestehenden asynchronen Simulationssystemen kann BABSI so genannten partiellen Vorrang[23] berücksichtigen. Hierdurch kann die sehr unschöne Situation vermieden werden, dass bei einem Konflikt der Zug mit der niedrigeren Priorität um viele Minuten verschoben wird, obwohl bei dem Zug mit der höheren Priorität nur eine minimale Haltzeitverlängerung erforderlich wäre, wie dies bei einem Reihenfolgewechsel der beteiligten Zugfahrten der Fall sein kann. Daher berechnet BABSI auch für die Züge mit der höheren Priorität mögliche Konfliktlösungen. Allerdings werden in diesem Fall die grau markierten Teile des Algorithmus nicht durchlaufen und so weder Laufwegvarianten noch alternative Haltpositionen oder zusätzliche Betriebshalte ermittelt. Zudem dürfen die Konfliktlösungen zu keinen neuen Konflikten mit bereits eingelegten Zügen führen, damit kein Rücksprung in der globalen Konfliktlösung erforderlich wird. Mit Hilfe von Parametern kann der Anwender vor der eigentlichen Simulation die maximale Verlängerung des Zuges mit

[23] Der eingeführte Begriff „partieller Vorrang“ wird in dieser Arbeit verwendet, obwohl Zugränge nur eine Möglichkeit zur Definition von Prioritäten darstellen (vgl. Kapitel 6.2.1).

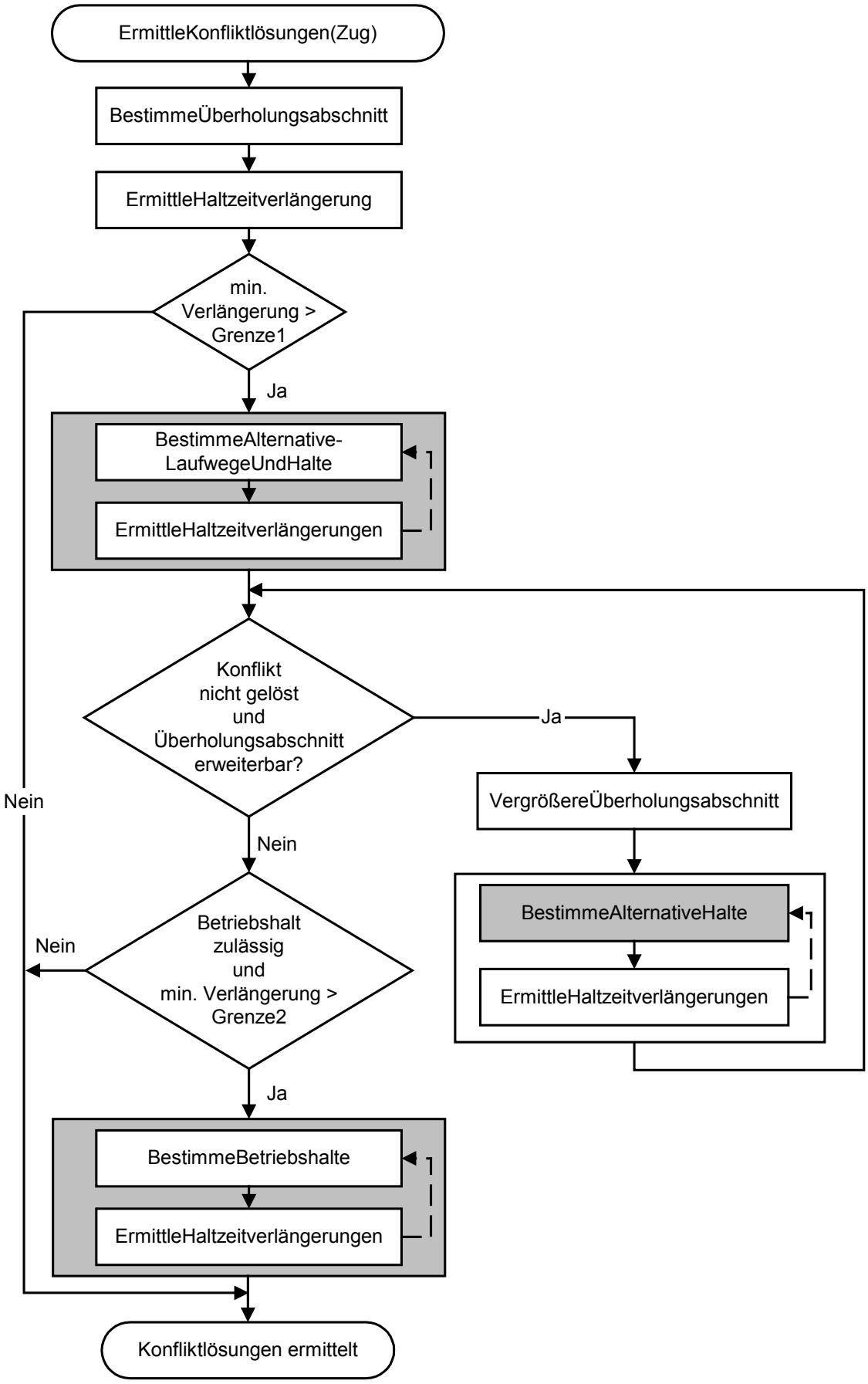


**Abb. 29: Ermittlung der Konfliktlösungen für einen Zug**

der höheren Priorität und einen gewünschten Malus-Faktor für die Bewertung entsprechender Konfliktlösungen eingeben.

Wie in Abb. 29 dargestellt, bestimmt der Algorithmus zur Ermittlung der Konfliktlösungsalternativen zunächst den aktuellen Überholungsabschnitt (vgl. Kapitel 6.3.3), damit Laufwegvarianten, die zu neuen Konflikten in rückliegenden Überholungsabschnitten führen, direkt verworfen werden können. Danach wird mit Hilfe der dualen Belegungsmatrix die ohne Änderung des Laufwegs erforderliche Haltzeitverlängerung am Anfang des aktuellen Überholungsabschnitts berechnet.

Liegt die im ersten Schritt errechnete Haltzeitverlängerung unter einem vom Anwender festzulegenden Grenzwert *Grenze1*, ist keine weitere Suche nach Alternativen erforderlich. Ansonsten werden für Züge, die nicht die höhere Priorität haben, mit Hilfe des in Kapitel 7.1 beschriebenen Verfahrens sowohl Laufwegvarianten als auch alternative Haltepositionen ermittelt und anschließend zur Bewertung die erforderlichen Haltzeitverlängerungen mit Hilfe der dualen Belegungsmatrix berechnet.

Konnte der Konflikt noch nicht gelöst werden und eine Erweiterung des Überholungsabschnitts ist möglich, wird diese entsprechend der in Kapitel 6.3.3 beschriebenen globalen Simulationsstrategie durchgeführt und erneut versucht, diesen Konflikt zu lösen. Für Züge mit einer kleineren oder der gleichen Priorität werden hierbei auch alternative Haltepositionen betrachtet.

In einem vorbereitenden Schritt müssen allerdings alte Konfliktlösungen des Zuges, die sich auf den nun erweiterten Überholungsabschnitt beziehen, rückgängig gemacht werden. Da der aktuelle Konflikt im ursprünglichen Überholungsabschnitt nicht gelöst werden kann, stellen sich die Lösungen der früheren Konflikte im Nachhinein als falsch heraus. Allerdings ist das auf den ersten Blick naheliegende komplette Zurücksetzen aller Konfliktlösungen bis zu der fehlerhaften Auswahl und die Auswahl einer anderen Alternative nicht sinnvoll. Hierdurch würden die Konflikte der Züge analog zu synchronen Verfahren nur lokal betrachtet werden, womit die inhärente Gefahr von Blockierungen verbunden ist. Dagegen konnte für BABSI durch die Vergrößerung des Überholungsabschnittes und die gleichzeitige Behandlung aller Konflikte des Zuges in diesem Bereich eine sehr effiziente Möglichkeit zur Lösung dieses komplexen Problems gefunden werden. Die lokale Sicht bei der Konfliktlösung, die eine korrekte Behandlung eingleisiger Strecken grundsätzlich erst ermöglicht, wird also zur Vermeidung von Blockierungen sukzessive verlassen. Damit eine alte Konfliktlösung rückgängig gemacht werden kann, müssen alle durchgeführten Konfliktlösungen von BABSI protokolliert werden.

Ist ein Betriebshalt für den betrachteten Zug zulässig, wie bei Güterzügen üblicherweise der Fall, und wurde bislang keine Konfliktlösung mit einer Beförderungszeitverlängerung unter einem weiteren Grenzwert *Grenze2* gefunden, werden schließlich noch Betriebshalte ermittelt (vgl. Kapitel 7.3) und mit Hilfe der dualen Belegungsmatrix die erforderlichen Haltzeitverlängerungen berechnet.

Konnte der Konflikt mit den genannten Ansätzen nicht zufriedenstellend gelöst werden, besteht die Möglichkeit weitere Konfliktlösungen auf der Basis von Fahrzeitverlängerungen zu berechnen. Wie in Kapitel 7.4 dargestellt, sollte dies für eisenbahnbetriebswissenschaftliche Fragestellungen aus Kompatibilitätsgründen mit den bisherigen asynchronen Verfahren nicht geschehen. Für einen sinnvollen und nachvollziehbaren Einsatz von Fahrzeitverlängerungen zur Konfliktlösung im Rahmen des Trassenmanagements fehlen wiederum die in Kapitel 7.4 geforderten Bedingungen für eine zweckmäßige Anwendung. Unter diesen Rahmenbedingungen kann die aus algorithmischen Gründen problemlose Art der Konfliktlösung in BABSI nicht sinnvoll eingesetzt werden.

Die errechneten Alternativen für diesen Zug stehen nun den weiteren Phasen der Konfliktlösung in BABSI zur Verfügung.

### 8.2.2 Wähle beste Konfliktlösung aus

Aus den für beide Zugfahrten ermittelten Lösungen eines Konfliktes muss nun diejenige ausgewählt werden, mit der der Konflikt gelöst werden soll. Wie in Kapitel 6.3.5 beschrieben, existiert keine grundsätzlich gültige Zielfunktion und kann daher auch nicht in BABSI verwendet werden. Dafür gibt es eine Reihe sinnvoller Kriterien zur Beurteilung der Alternativen, auf deren Basis der Anwender die gewünschte Zielfunktion zusammenstellen kann.

Für eisenbahnbetriebswissenschaftliche Untersuchungen sind hierbei die Beförderungszeitverlängerung und die Hierarchieziffern der verwendeten Fahrwege von zentraler Bedeutung. Daher werden diese beiden Kriterien bei BABSI standardmäßig verwendet. Zudem werden die vom Bearbeiter vorgegebenen Kriterien zur Beurteilung der Beförderungszeitverlängerung von Zügen mit der höheren Priorität berücksichtigt.

Kann mit den bisherigen Methoden keine Möglichkeit ermittelt werden, den Konflikt zu lösen, muss als letzte Möglichkeit eine der beiden Zugfahrten gelöscht werden. Bei Fahrten mit unterschiedlichen Prioritäten wird die mit der kleineren gelöscht,

ansonsten muss ein entsprechendes Kriterium vorgegeben werden. Dies kann zum Beispiel die Laufweite, die Untergattung oder auch die Zugnummer sein.

### 8.2.3 Realisiere Konfliktlösung

Mit Hilfe der Basisschichten von FAKTUS kann BABSI nun die ausgewählte Konfliktlösung realisieren. Hierzu müssen beispielweise Haltzeiten verlängert, Laufwege geändert und Betriebshalte eingefügt werden. Zudem kann es erforderlich sein, eine Zugfahrt ganz zu löschen. In diesem Fall können andere Züge noch Veränderungen an ihren Wunschlagen enthalten, die auf Konfliktlösungen mit dem jetzt gelöschten Zug beruhen und daher zurückgenommen werden müssen.

Bei der Realisierung von BABSI wurde darauf geachtet, dass nur Mechanismen verwendet werden, die auch der Bearbeiter zur manuellen Konfliktlösung verwendet. Aus diesem Grunde berechnet FAKTUS nach einer durchgeführten Konfliktlösung auch die Fahrzeiten, Belegungen und Konflikte neu und überprüft so die von BABSI berechnete Konfliktlösung. Durch dieses zweistufige Verfahren wird eine automatische Kontrolle eingebaut und wirkungsvoll verhindert, dass das Simulationssystem dem Anwender Konfliktlösungen demonstriert, die dieser selber gar nicht herstellen könnte.

### 8.2.4 Speichere Konfliktlösung ab

Wie schon mehrfach beschrieben, kann es erforderlich werden, Konfliktlösungen im Nachhinein rückgängig machen zu müssen. Daher werden alle realisierten Konfliktlösungen von BABSI in einer zusätzlichen Datenstruktur abgespeichert. Auf dieser Basis können zudem die einzelnen Konfliktlösungen eines Simulationslaufes ausgewertet werden, um die für eisenbahnbetriebswissenschaftliche Untersuchungen erforderlichen Kennzahlen zu ermitteln.

## 8.3 Simulationsmodi

Auf der Basis der im letzten Abschnitt erläuterten automatischen Konfliktlösung können, die in Kapitel 6.4 beschriebenen DV-Systeme mit ihren unterschiedlichen Aufgabenstellungen realisiert werden. Das Simulationssystem BABSI enthält vier eigenständige Simulationsmodi für die zentralen Anwendungsfälle. Hierbei handelt es sich um die Ermittlung von Konfliktlösungsvorschlägen und um die Suche nach freien Trassen für einzelne Züge im Rahmen des rechnergestützten Trassenmanagements. Darüber hinaus existieren weitere Modi zur Simulation der Fahrplanerstellung und zur Simulation der Betriebsabwicklung, die insbesondere der Ermittlung von Kennwerten im Rahmen eisenbahnbetriebswissenschaftlicher Untersuchungen dienen.

### 8.3.1 Lösungsvorschläge für einen Konflikt

Ausgehend von einem konkreten, von FAKTUS erkannten Konflikt berechnet BABSI mit den vorgestellten Methoden unter Beachtung der Prioritäten der Züge mögliche Konfliktlösungen und stellt diese dem Bearbeiter im Detail vor. Dieser kann dann einen Vorschlag akzeptieren und der Konflikt wird entsprechend gelöst.

Mit diesem Modus kann der Anwender, die in BABSI implementierte Strategie zur Konfliktlösung schrittweise nachvollziehen. Im Rahmen des rechnergestützten Trassenmanagements kann dieser Modus zur Erzeugung von Lösungsvorschlägen für konkrete Konflikte verwendet werden. Durch die automatische Bestimmung alternativer Lösungen sinkt der manuelle Eingabeaufwand für den Bearbeiter erheblich und die Effizienz der manuellen Fahrplankonstruktion kann so gesteigert werden.

### 8.3.2 Trassensuche für einen Zug

Für einen bestimmten Zug wird in diesem Modus ausgehend von seiner Wunschlage die nächste freie Trasse gesucht. Die vorhandenen Belegungen anderer Züge werden dabei ebenso wie die geforderte Pufferzeit berücksichtigt.

Da eine bislang nicht verwendete Trasse für den Zug gesucht werden soll, wird er von BABSI mit der geringsten Priorität eingelegt. Die dabei entstehenden Konflikte müssen sukzessive, allein durch Veränderungen an der neuen Trasse gelöst werden. Für die einzelnen Konflikte werden automatisch Lösungen berechnet, mit Hilfe der vorgegebenen Kriterien bewertet und schließlich die am besten bewertete realisiert.

Dieser Modus ist insbesondere zur Vergabe von im Fahrplan ungenutzter Trassenkapazität an einen Sonderzug oder eine andere kurzfristig einzulegende Fahrt geeignet und stellt einen weiteren Schritt zur Automatisierung des rechnergestützten Trassenmanagements dar.

### 8.3.3 Simulation der Fahrplanerstellung

Die Simulation der Fahrplanerstellung realisiert die in Kapitel 6.4.1 vorgestellte Simulation der Trassenvergabe unter Berücksichtigung der Prioritäten der Züge und der vorgegebenen Pufferzeiten.

Ausgehend von den Trassenbestellungen werden die einzelnen Zugfahrten entsprechend ihrer Priorität eingelegt. Sind alle Züge mit gleicher Priorität eingelegt, werden die entstandenen Konflikte in ihrer zeitlichen Reihenfolge gelöst. So entsteht ein konfliktfreier Fahrplan von hoher Qualität, auf dessen Grundlage ein störungsfreier Betrieb der Züge abgewickelt werden kann. Die bei der Konfliktlösung entstandenen planmäßigen Wartezeiten werden protokolliert und können im Rahmen eisenbahnbetriebswissenschaftlicher Untersuchungen weiter verwendet werden.

Dieser Modus kann auch im Rahmen des Trassenmanagements beispielsweise zur Ermittlung von Fahrplanvarianten verwendet werden. Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, dass die in Kapitel 6.4.3 beschriebenen Erweiterungen des Konzeptes um rückwärts konstruierte Trassen und um die Berücksichtigung von Verknüpfungen zwischen Zugfahrten aus Kompatibilitätsgründen mit den existierenden eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Verfahren bislang nicht in BABSI realisiert wurden. Da eine vollständig automatisierte Fahrplanerstellung am Ende einer schrittweisen Automatisierung des rechnergestützten Trassenmanagements steht, sollten diese Erweiterungen unter Berücksichtigung der Ergebnisse der ersten Schritte und der genau zu definierenden Anforderungen des Trassenmanagements realisiert werden.

### 8.3.4 Simulation der Betriebsabwicklung

Mit einer Simulation der Betriebsabwicklung kann die Stabilität eines bestehenden Fahrplans im Betriebsablauf überprüft werden. Hierzu wird, wie in Kapitel 6.4.2 beschrieben, die automatische Konfliktlösung von BABSI zur Erzeugung von Dispositionsfahrplänen verwendet.

Zur Nachbildung realer betrieblicher Rahmenbedingungen werden zufällige Verspätungen in einen existierenden Fahrplan eingespielt und die resultierenden Konflikte unter Beachtung der Prioritäten der einzelnen Zugfahrten gelöst.

Analog zur entsprechenden Richtlinie R 405 der DB Netz AG [DB99b] werden die unterschiedlichen Arten von Urverspätungen in BABSI zusammenfassend als Haltzeitverlängerungen modelliert. Prinzipiell wäre auch eine explizite Nachbildung unterschiedlicher Arten von Urverspätungen, wie beispielsweise Signalstörung und Reisendenandrang, problemlos in BABSI möglich. Allerdings würden sich die resultierenden Wartezeiten im Wesentlichen nur in der örtlichen Verteilung ändern. Zudem wären weitere Simulationsparameter erforderlich, die ermittelt und mit statistischen Methoden beschrieben werden müssten. Die Verwendung der für diese Zwecke beliebten Exponentialfunktion ist im Allgemeinen erst bei der Überlagerung verschiedener Verspätungsarten zulässig. Analog zur R 405 erscheint dies aufgrund des im Verhältnis zum zusätzlichen Nutzen hohen zusätzlichen Aufwandes als wenig zielführend.

Pufferzeiten müssen bei der Betrachtung der Betriebsabwicklung nicht berücksichtigt werden. Diese bei der Fahrplanerstellung eingebauten Reservezeiten können jetzt zum Verspätungsabbau genutzt werden.

Die Beurteilung der Stabilität des ursprünglichen Fahrplans kann anhand der aus den Konfliktlösungen resultierenden außerplanmäßigen Wartezeiten erfolgen. Allerdings sind zur statistischen Absicherung der Ergebnisse mehrere Simulationsläufe mit jeweils zufällig erzeugten Verspätungen erforderlich.

Natürlich kann die Simulation der Betriebsabwicklung auch im Rahmen des Trassenmanagements zum Nachweis der Stabilität eines von einem Bearbeiter mit FAKTUS erzeugten Fahrplans verwendet werden. Da die Konstruktionsrichtung bei der Erstellung von Dispositionsfahrplänen durch den Zeitablauf vorgegeben ist, spielen rückwärts konstruierte Trassen hierbei keine Rolle. Ebenso müssen Anschlüsse nur in Konstruktionsrichtung betrachtet werden. Allein die Entscheidung, welcher Zug wie

lange warten soll, ist als zusätzlicher Datensatz analog zu den Wartezeitregelungen der Betriebsdisposition vorzugeben [DB01d].

## 8.4 Benutzeroberfläche

Wie in Abb. 30 zu sehen ist, wurde in BABSI das zentrale Konstruktionsfenster von FAKTUS um zusätzliche Schaltflächen erweitert, mit denen die neuen Simulationsalgorithmen gestartet und die Simulationsergebnisse abgerufen werden können. Hierdurch kann der Bearbeiter in seiner gewohnten Arbeitsumgebung auf die neuen Funktionalitäten zur Unterstützung der manuellen Konfliktlösung, wie die Generierung von Lösungsvorschlägen und die Suche nach freien Sonderzugtrassen, zurückgreifen. Darüber hinaus konnten im Rahmen der notwendigen Validierung des neuen Simulationskonzeptes von BABSI berechnete Konfliktlösungen und die sich ergebenden Zugtrassen direkt auf ihre Plausibilität überprüft werden.

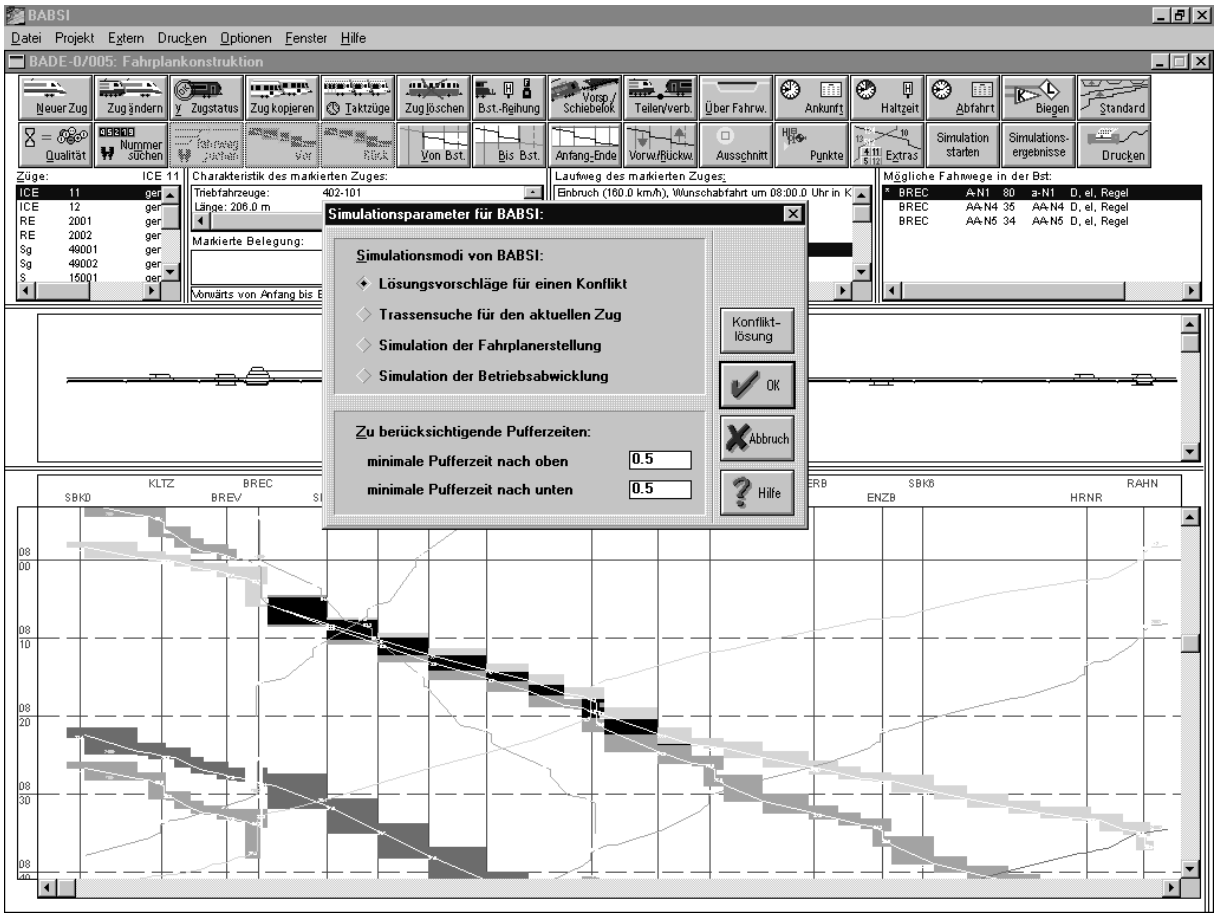


**Abb. 30: Simulationsverfahren BABSI**

Nach dem Starten der Simulation öffnet sich ein neues Dialogfenster zur Eingabe der Simulationsparameter. Hier können zunächst der gewünschte Simulationsmodus und

die zu berücksichtigenden Mindestpufferzeiten vom Bearbeiter festgelegt werden. Darüber hinaus kann über eine Schaltfläche das in Abb. 31 dargestellte Dialogfenster aufgerufen werden, in dem weitere Parameter zur Steuerung der Konfliktlösung eingegeben werden können.

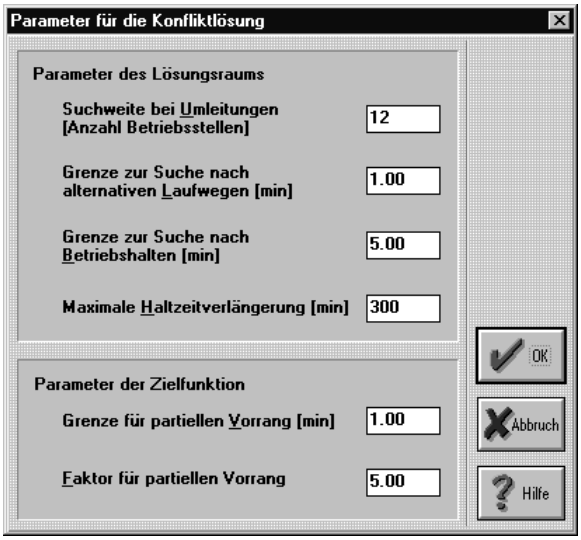


**Abb. 31: Konfliktlösungsparameter**

Zum einen handelt es sich um Parameter, die Einfluss auf die Ermittlung der alternativen Konfliktlösungen und somit den betrachteten Lösungsraum haben. Zum anderen enthält die Zielfunktion, mit der aus der Menge aller Lösungsalternativen die zu verwendende bestimmt wird, selbst ebenfalls Parameter. Die einzelnen Parameterarten wurden im Verlauf dieser Arbeit an den entsprechenden Stellen schon umfassend erläutert, sollen hier aber noch einmal zusammengetragen werden.

Mit Hilfe der folgenden Parameter kann die Anzahl der betrachteten Alternativen einer Konfliktlösung beeinflusst werden:

- Maximale Suchweite, die bei der Berechnung von Umleitungen in „Anzahl von Betriebsstellen“ verwendet werden soll (vgl. Kapitel 7.1.4).
- Die „Grenze zur Suche nach alternativen Laufwegen“ bezieht sich auf die Beförderungszeitverlängerungen der zuvor betrachteten Konfliktlösungsalternativen. Nur wenn alle Verlängerungen über dem Grenzwert liegen, werden alternative Laufwege ermittelt (*Grenze1* in Kapitel 8.2.1).
- Die „Grenze zur Suche nach Betriebshalten“ bezieht sich ebenfalls auf die Beförderungszeitverlängerungen der zuvor betrachteten Konfliktlösungsalternativen. Sind für den betrachten Zug Betriebshalte als Konfliktlösung zulässig, werden diese nur ermittelt, wenn alle bisherigen Verlängerungen über diesem Grenzwert liegen (*Grenze2* in Kapitel 8.2.1).

- Maximale Haltzeitverlängerung, die in der dualen Belegungsmatrix betrachtet werden soll (vgl. Kapitel 7.2.6).

Außerdem kann, wie in Kapitel 8.2.1 beschrieben, die Zielfunktion zur Bewertung der betrachteten Lösungsalternativen mit Hilfe von Parametern angepasst werden:

- Maximale Verlängerung eines Haltes im Rahmen des partiellen Vorrangs
- Faktor zum Vergleich der Verlängerungen bei partiellem Vorrang

Sollen weitere variable Kriterien in die Zielfunktion einfließen, erhöht sich die Anzahl der notwendigen Parameter entsprechend.

Neben diesen Parametern, die sich direkt auf den Konfliktlösungsalgorithmus beziehen, haben natürlich auch die der beteiligten Züge einen starken Einfluss auf die möglichen Konfliktlösungen. Hierbei handelt es sich sowohl um Zugparameter, die auch für das rechnergestützte Trassenmanagement benötigt werden, als auch um reine Simulationsparameter. Wie in Abb. 32 zu sehen ist, wurde das Fenster von FAKTUS zur Festlegung der Zugcharakteristik um die zusätzliche Schaltfläche „Simulationsparameter“ erweitert, mit der man zu dem neuen, oben liegenden Dialogfenster für die noch fehlenden Angaben gelangt.

**Abb. 32: Dialogfenster zur Eingabe von Zugparametern**

Bei den zusätzlichen Zugparametern handelt es sich zum einen um die statistischen Kenngrößen zur Bestimmung realistischer Einbruchs- und Urverspätungen für die Simulation des Betriebsablaufes. Als Vorschlag verwendet BABSI hierbei die zuggat-

tungsabhängigen Näherungswerte der entsprechenden Richtlinie der DB AG bei hoher Belastung [DB01c]. Zum anderen müssen die zu berücksichtigenden Prioritäten der Zugfahrten festgelegt werden. Aus Gründen der Kompatibilität mit den bisherigen asynchronen Simulationsverfahren werden hierbei die aus den Zuggattungen abgeleiteten Ränge als Vorschlagswerte verwendet. Schließlich kann an dieser Stelle festgelegt werden, ob Betriebshalte bei der Ermittlung der Konfliktlösungen für den jeweiligen Zug berücksichtigt werden sollen. Im Gegensatz zu Personenzügen schlägt BABSI dies für Güterzüge vor.

Zur Erzeugung geänderter Rahmenbedingungen für neue Simulationsvarianten müssen häufig die Parameter vieler Zugfahrten den geänderten Vorgaben angepasst werden. Da häufig Gruppen von Zügen identische Simulationsparameter haben sollen, können auch zunächst die betroffenen Zugfahrten ausgewählt und dann durch den Aufruf des neuen Dialogfensters die Parameter für alle Züge gleichzeitig gesetzt werden. Der Umweg über die Zugcharakteristiken der einzelnen Züge zur Eingabe identischer Parameter entfällt so.

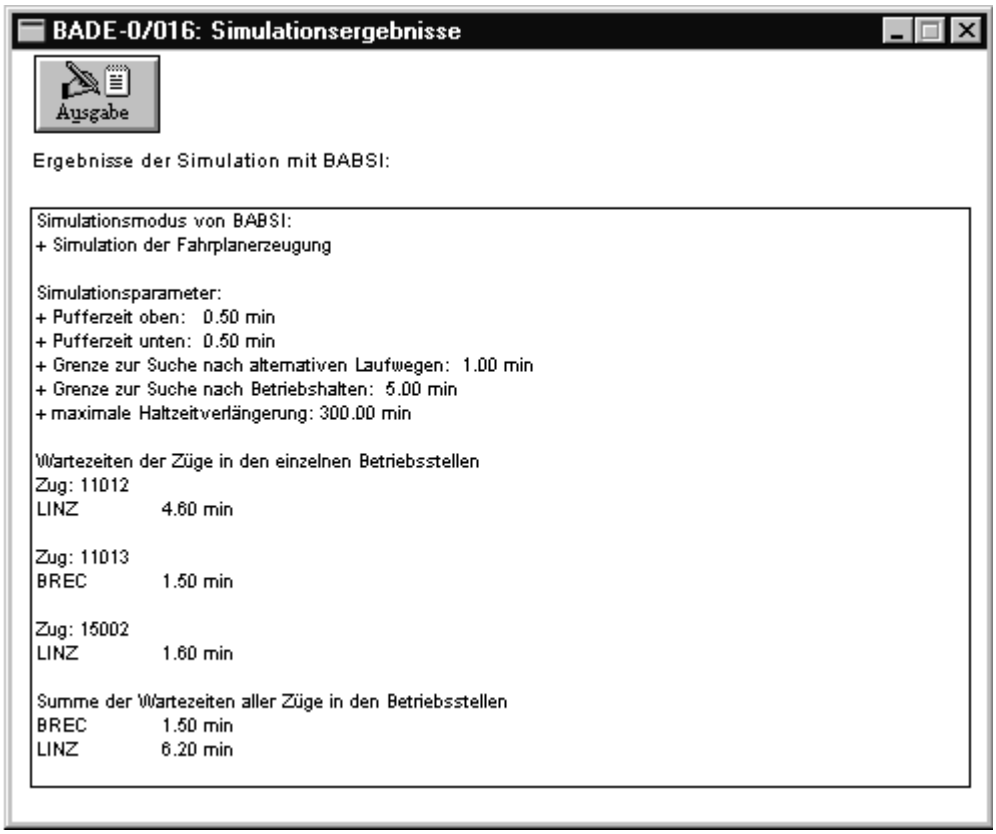


**Abb. 33: Fenster zur Anzeige der Simulationsergebnisse**

Hat der Bearbeiter die notwendigen Vorgaben gemacht und den gewünschten Simulationsmodus ausgewählt, werden von BABSI die im letzten Abschnitt beschriebenen Verfahrensschritte für den gewählten Modus unter Verwendung der automati-

schen Konfliktlösung durchgeführt. In dem neuen, in Abb. 33 dargestellten Ausgabefenster werden die gewählten Simulationsparameter zusammen mit den Simulationsergebnissen dargestellt. Hierbei handelt es sich insbesondere um die durch die Konfliktlösungen entstandenen Wartezeiten, die sowohl zugbezogen als auch summiert für die betroffenen Betriebsstellen dokumentiert werden. Zusätzlich können die Wartezeiten auch den Belegungselementen zugeordnet werden, in denen die Züge die jeweiligen Konflikte hatten. Auf diese Weise können analog zu analytischen Verfahren die im Netz existierenden Engpässe ermittelt werden. Die Verwendung alternativer Fahrwege und Halteplätze bei der Konfliktlösung ermöglichen dem Simulationsverfahren BABSI sogar eine exaktere Identifizierung infrastruktureller Engpässe.

## 8.5 Validierung und Pilotanwendung

Nach der Beschreibung des neuen Simulationsverfahrens BABSI sollen die bereits vorliegenden Erfahrungen mit dem neuen DV-System skizziert werden. Der erste Schritt zu einem Einsatz in der Praxis bestand in der Validierung von BABSI, also dem Nachweis der Gültigkeit bezüglich der nachgebildeten Prozesse. Anschließend wurden im Rahmen einer Pilotanwendung erste Praxiserfahrungen gesammelt.

Aufgrund der Verwendung der in der Praxis vielfach bewährten Routinen von FAKTUS zur Infrastrukturmodellierung, Fahrzeit- und Belegungsrechnung ist für diese keine weitere Validierung erforderlich. Für die erkannten Konflikte berechnet BABSI auf der Basis des in dieser Arbeit dargestellten Konzeptes Konfliktlösungen und realisiert diese mit Hilfe der vorhandenen Funktionalität von FAKTUS. Zur Validierung müssen daher nur noch zwei Aspekte betrachtet werden. Zum einen muss gewährleistet sein, dass die von BABSI ermittelten Konfliktlösungen tatsächlich die Konflikte lösen und zum anderen muss überprüft werden, ob die Konflikte sinnvoll gelöst werden.

Der erste Nachweis kann direkt durch BABSI selbst geschehen. Hierfür wurden für eine ganze Reihe realer und hypothetischer Infrastrukturnetze Konfliktlösungen berechnet und mit Hilfe der Basisfunktionen von FAKTUS realisiert. Stellt sich hierbei heraus, dass der ursprüngliche Konflikt weiter existiert oder in dem betrachteten Bereich ein neuer entstanden ist, arbeitet die Konfliktlösung von BABSI fehlerhaft. Nach einer kurzen Testphase konnten die entsprechenden Implementierungsfehler, die insbesondere bei ungewöhnlichen Infrastrukturkonstellationen auftraten, behoben werden. Die notwendigen Prüfroutinen waren einfach zu realisieren und können weiterhin parallel zum Simulationslauf eingeschaltet werden.

Bereits in der Konzeptionsphase von BABSI wurden die Basisalgorithmen zur Ermittlung planmäßiger Wartezeiten mit dem parallel in Entwicklung befindlichen analytischen Verfahren ANKE wechselseitig auf Konsistenz geprüft [Ste00]. Beide DV-Systeme basieren auf der Infrastrukturmodellierung, Fahrzeit- und Belegungsrechnung von FAKTUS. Allerdings unterscheiden sich die theoretischen Ansätze zur Berechnung der planmäßigen Wartezeiten grundsätzlich voneinander. Um dennoch zu vergleichbaren Ergebnissen kommen zu können, durfte die Konfliktlösung von BABSI im Rahmen dieser Untersuchungen weder alternative Laufwege oder Halteplätze noch partiellen Vorrang verwenden. Unter diesen Bedingungen konnte gezeigt werden, dass die von ANKE und BABSI ermittelten planmäßigen Wartezeiten im Mittel in derselben Größenordnung liegen.

Eine fundierte Beurteilung der von BABSI berechneten Konfliktlösungen erfordert die Verwendung von Expertenwissen oder den Einsatz allgemein anerkannter DV-Systeme. Neben der zwangsweise subjektiven Beurteilung der realisierten Konfliktlösung durch Experten, bei der diese häufig auf den ersten Blick unwichtige Nebeneffekte übersahen, wurden Vergleiche mit bestehenden DV-Systemen durchgeführt. Hierdurch konnten insbesondere eine Vielzahl von Konfliktlösungen automatisch durchgeführt und analysiert werden.

Ein entsprechender Vergleich wurde mit dem Simulationssystem STRESI durchgeführt [GröAth01]. Um die Effekte der unterschiedlichen Infrastrukturmodellierung zu minimieren, wurde eine hypothetische, an der Stecke Köln – Aachen orientierte Referenzstrecke entwickelt. Die mit beiden Verfahren ermittelten Wartezeiten korrespondierten bei den durchgeführten Simulationsläufen in ihrer Verteilung gut miteinander. Aufgrund der genaueren Betrachtung alternativer Laufwege waren in BABSI allerdings geringere absolute Wartezeiten erforderlich. In einzelnen Fällen zeigte sich zudem, dass Unterschiede in der Fahrzeitrechnung im Sekundenbereich zu unterschiedlichen Konfliktlösungen im Minutenbereich führen können, wenn beispielweise Konfliktlösungen in zurückliegende Bahnhöfe verlegt werden müssen.

Schließlich wurden im Rahmen einer Pilotuntersuchung die verkehrlichen und betrieblichen Auswirkungen des neugebauten Vereina-Tunnels auf das umgebende Netz der Rhätischen Bahn in der Schweiz untersucht [Nie01]. Dieses vornehmlich aus eingleisigen Streckenabschnitten bestehende Schmalspurnetz und das anspruchsvolle Betriebsprogramm mit pendelnden Autotransportzügen durch den Vereina-Tunnel stellten hohe Anforderungen an die eingesetzten DV-Verfahren FAKTUS, ANKE und BABSI. Die notwendige Anpassung der Infrastrukturmodellierung und der Triebfahrzeugdaten an die Besonderheiten des schweizerischen Schmalspurnetzes konnte ohne Änderung der Verfahren allein mit Hilfe entspre-

chender Eingabeparameter durchgeführt werden. Auf dieser Basis wurde dann eine Fahrplanstudie mit FAKTUS erstellt, mit BABSI eine automatische Fahrplanerstellung durchgeführt, die kapazitiven Engpässe im Netz mit den Verfahren ANKE und BABSI bestimmt und schließlich entsprechende Ausbauvarianten analysiert. Die automatische Fahrplanerstellung mit BABSI führte zu einem Fahrplan, der zu dem manuell von der Rhätischen Bahn erstellten Fahrplan, bis auf verschobene Überholungshalte bei einigen Güterzügen, identisch ist. Die Engpässe in Fahrstraßenknoten und auf der Strecke wurden sowohl von ANKE als auch von BABSI erkannt. Die Auswirkung fehlender Wartekapazität in den Bahnhöfen konnte nur BABSI erkennen, da die entsprechenden analytischen Verfahren zur Zeit noch nicht in ANKE integriert sind. Gerade diese Art von Engpässen war bei dem betrachteten Untersuchungsraum von zentraler Bedeutung. ANKE sollte daher um ein entsprechendes Modul zur Bemessung von Bahnhofsgleisen erweitert werden. Bei der Untersuchung unterschiedlicher Ausbauvarianten von Bahnhöfen konnte mit BABSI die Entschärfung der vorhandenen Engpässe nachgewiesen werden.

## 8.6 Einsatzgebiete

Die unterschiedlichen Simulationsmodi von BABSI können sowohl im Rahmen des Trassenmanagements als auch bei eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Untersuchungen eingesetzt werden. Die einzelnen Anwendungsfälle unterscheiden sich insbesondere im zeitlichen Abstand zwischen dem Zeitpunkt der Simulation und dem simulierten Sachverhalt. Je geringer der zeitliche Abstand ist, um so genauer sind die Kenntnisse über die vorhandene Infrastruktur und das konkrete Betriebsprogramm.

Bei strategischen Planungen werden Infrastrukturprojekte wie Neubaustrecken oder Umbauten von größeren Eisenbahnknoten untersucht, die erst 5 bis 20 Jahre später realisiert werden. Hier liegt die Infrastruktur und das zu berücksichtigende Betriebsprogramm erst sehr vage vor. Die Simulation der Fahrplanerstellung ist in diesen Fällen von wesentlicher Bedeutung, damit Betriebssimulationen auf der Grundlage unterschiedlicher Fahrpläne durchgeführt werden können. Nur so sind abgesicherte Aussagen über die zu erwartende Betriebsqualität möglich. Die heutige Praxis der manuellen Erstellung eines oder maximal zweier konkreter Fahrpläne auf der Grundlage der vagen Betriebsprogramme kann so abgelöst und die Aussagequalität erhöht werden.

Operative Planungen betrachten dagegen Projekte mit einem zeitlichen Horizont von 6 bis 24 Monaten. Hierbei liegt die Infrastruktur schon im Wesentlichen fest, das Betriebsprogramm existiert dagegen erst in Varianten und ist zumeist Gegenstand

der Untersuchungen. Beispiele hierfür sind die Einführung eines integralen Taktfahrplans, die Einrichtung von Direktzügen im Personenfernverkehr oder die langfristige Baustellenplanung. Bei der Erstellung konkreter Fahrpläne im Rahmen des Trassenmanagements können insbesondere die Simulation der Fahrplanerstellung und die Unterstützung der manuellen Fahrplankonstruktion durch Konfliktlösungsvorschläge verwendet werden. Die Beurteilung der Stabilität dieser Fahrpläne ist ebenfalls durch eine Simulation der Betriebsabwicklung möglich.

Auch wenn die vorhandene Infrastruktur und der Jahresfahrplan relativ fest sind, können kurzfristig eintretende Situationen Entscheidungen erforderlich machen, die mit Hilfe des Simulationsverfahrens BABSI unterstützt werden können. Beispiele für solche taktischen Planungen sind kurzfristig einzulegende Sonderzüge oder Gleissperrungen aufgrund von Störungen. Gerade für das Bearbeiten einzelner Sonderzüge ist die automatische Trassensuche von BABSI konzipiert worden. Aber auch die Erstellung vollständig neuer Fahrpläne ist mit den anderen Simulationsmodi in kurzer Zeit möglich. Hierbei existiert ein fließender Übergang zur Disposition der Züge im Betriebsablauf, die direkten Zugriff auf die verkehrenden Züge hat und mit realen Störungen arbeitet. Mit diesem Thema beschäftigt sich das bereits erwähnte Forschungsvorhaben ASDIS, das am Verkehrswissenschaftlichen Institut der RWTH Aachen bearbeitet wird [Jac02].

# 9 Zusammenfassung und Ausblick

Der Schwerpunkt dieser Arbeit besteht in der Weiterentwicklung der asynchronen Verfahren zur Simulation der Fahrplanerstellung und der Betriebsabwicklung von Schienenbahnen. Die neu entwickelte Simulationsstrategie und die Verwendung geeigneter Basiskomponenten aus dem Bereich des rechnergestützten Trassenmanagements führen zu einem Simulationsverfahren, das in verschiedenen Planungsphasen unter Berücksichtigung der Zugprioritäten eingesetzt werden kann und dem direkt flächendeckende Infrastruktur- und Fahrplandaten zur Verfügung stehen.

In den klassischen Fragestellungen der Eisenbahnbetriebswissenschaft – Bemessung von Eisenbahninfrastruktur und Validierung neuer Fahrplan- und Betriebskonzepte – erzielt das neue asynchrone Simulationsverfahren aufgrund der verfeinerten Konfliktlösung insbesondere in eingleisigen Abschnitten und in komplexen Netzstrukturen bessere Ergebnisse. Hierzu tragen vor allem die selbst bestimmten Laufwegalternativen, die abschnittsweise Konfliktlösung auf der Basis von Überholungsabschnitten und die adaptive Berechnung unterschiedlicher Konfliktlösungsalternativen mit Auswahl anhand einer Zielfunktion bei.

Im Rahmen der Konzeption dieser neuen Simulationsstrategie werden neben den Modellen der Eisenbahnbetriebswissenschaft die Verfahren zur Erstellung von Fahrplänen betrachtet, die algorithmische Komplexität einer automatischen Fahrplanerstellung diskutiert und entsprechende mathematische Ansätze analysiert. Dabei zeigt sich insbesondere, dass die mathematische Modellierung aufgrund der kombinatorischen Vielfalt der möglichen Reihenfolgen der Züge und der jedem Zug zur Verfügung stehenden Fahrwege eine Betrachtung vereinfachter Modellstrukturen erfordert, die von den Fragestellungen des Trassenmanagements zum Teil weit entfernt sind. So ist die Kombination von sperrzeitenbasierten Verfahren und mathematischen Ansätzen bislang auf die Suche nach freien Einzeltrassen in bestehenden Fahrplänen begrenzt. Allerdings kann durch die sukzessive Suche nach Einzeltrassen kein neuer Fahrplan erzeugt werden, der die vorhandene Infrastrukturkapazität insbesondere auf eingleisigen Abschnitten sinnvoll auslastet. Eine generelle Verwendung von Sperrzeiten in den bestehenden mathematischen Ansätzen zur automatischen Fahrplanerstellung würde zu einer weiteren Steigerung der Komplexität führen und somit den praktischen Einsatzbereich nochmals reduzieren.

Dagegen ergibt sich durch die Verwendung des sperrzeitenbasierten Ansatzes und die explizite Betrachtung der Konflikte eine konzeptionelle Nähe zum rechnergestützten Trassenmanagement, die aufgrund der verbesserten Konfliktlösungsstrategie neue Anwendungen in diesem Bereich erlaubt. So kann durch die Erzeugung von Konfliktlösungsvorschlägen, die Suche nach freien Einzeltrassen in bestehenden Fahrplänen und das kapazitätsschonende Einlegen mehrerer Zugtrassen eine direkte Effizienzsteigerung im rechnergestützten Trassenmanagement erreicht werden. Mit Hilfe der Simulation der Betriebsabwicklung kann schließlich die im Betriebsablauf zu erwartende Stabilität beliebiger Fahrpläne überprüft und so eine frühzeitige Qualitätssicherung der zugehörigen Planungen realisiert werden.

Die automatische Suche nach freien Trassen in vorhandenen Fahrplänen erlaubt eine Reduzierung vorkonstruierter Angebotstrassen, da durch ein automatisches Verfahren im Sonderzugbereich bis kurz vor dem Betriebsablauf freie Trassenkapazität vergeben werden kann. Hierdurch können aus zwei Gründen Kapazitätsreserven aktiviert werden. Zum einen passen die Parameter der Sonderzüge selten exakt zu denen der vorkonstruierten Trassen. Hieraus resultieren entweder künstlich verlangsamte Zugfahrten oder unnötig gebundene Infrastrukturkapazität. Zum anderen wird die zur Verfügung stehende Infrastrukturkapazität durch im Fahrplan reservierte Angebotstrassen, die keinen Abnehmer finden, weiter künstlich reduziert.

Darüber hinaus können durch die im Rahmen der Entwicklung des Simulationsverfahrens notwendige Modellierung der Trassenvergabe auch Rückschlüsse auf den modellierten Prozess gezogen werden. So gibt es derzeit Trassenbestellungen mit sich widersprechenden Anforderungen, die zu prinzipiellen Problemen bei der Konstruktion führen. Beispielsweise muss die Richtung eines Anschlusses mit der jeweiligen Konstruktionsrichtung des Zuges korrespondieren. Werden die Anforderungen an die Trassenbestellungen so erweitert, dass keine Widersprüche auftreten können, steigt die Qualität der Ergebnisse und ein erweiterter Einsatz von DV-Systemen zur Unterstützung des Prozesses wird möglich.

Durch eine verbesserte Pufferzeitbemessung, die die konkreten Zugfolgefälle, die im Betrieb zu erwartenden Verspätungen und die geforderte Betriebsqualität berücksichtigt, ist eine gezielte, kapazitätsschonende Vergabe der tatsächlich notwendigen Pufferzeiten möglich. Die entsprechenden analytischen und simulativen Ansätze aus der Eisenbahnbetriebswissenschaft müssen an die Anforderungen des Trassenmanagements angepasst werden, damit die geforderte Stabilität der Fahrpläne im Betriebsablauf erreicht werden kann und gleichzeitig zu große, unnötig kapazitätsmindernde Pufferzeiten vermieden werden können.

Im Rahmen der Trassenvergabe stehen einem Bearbeiter insbesondere bei der Konfliktlösung eine große Zahl von Optionen zur Verfügung, deren Verwendung sich aus den späteren Konstruktionsergebnissen nur schlecht nachvollziehen lässt. Die in der EIBV geforderte transparente Trassenvergabe und das allgemeine Gebot der Diskriminierungsfreiheit legen allerdings die Entwicklung und Veröffentlichung eindeutiger Konstruktionsregeln zur Vergabe der Infrastrukturkapazität an die bestellten Zugfahrten nahe. Da es sich hierbei um eine fest vorgegebene Handlungsabfolge, also einen Algorithmus, handeln müsste, wäre eine weitgehende Unterstützung der Trassenvergabe durch ein DV-System analog zu BABSI möglich. Allerdings muss unter diesen geänderten Rahmenbedingungen die Auslastung der Infrastruktur als zentrales Ziel eines Infrastrukturbetreibers explizit in dem Algorithmus berücksichtigt werden. Dieses wäre durch die Verwendung der kapazitätsorientierten Trassenvergabestrategie von BABSI in Verbindung mit der (Wieder-) Einführung einer Preiskomponente im Trassenpreissystem, die direkt auf der zulässigen planmäßigen Wartezeit beruht und damit zu einer hohen und zudem marktgerechten Auslastung der Infrastruktur führt, möglich.

# 10 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Sperrzeitentreppen zweier Züge ..... 17

Abb. 2: Rahmenbedingungen der Produktionsplanung bei der DB [Lin84] ..... 20

Abb. 3: Arbeitsschritte der Produktionsplanung bei der DB [Lin84] ..... 21

Abb. 4: Spannungsfeld zwischen Kundenwunsch und Infrastrukturauslastung ..... 25

Abb. 5: Beispielhafte Darstellung eines Bildfahrplans ..... 29

Abb. 6: Beispielhafte Darstellung einer bildlichen Bahnhofsfahrordnung ..... 31

Abb. 7: Technologen-Arbeitsplatz Fahrplanbearbeitung (aus [HoLoKr91]) ..... 36

Abb. 8: Spurplan-Graph eines einfachen Kreuzungsbahnhofs ..... 38

Abb. 9: Interaktive Fahrplankonstruktion mit FAKTUS ..... 39

Abb. 10: Grundkonzept von DaViT zur Erstellung von Jahresfahrplänen ..... 41

Abb. 11: Grafische Darstellung eines einfachen PESP ..... 51

Abb. 12: Infrastruktur für den Einrichtungsbetrieb (nach [BrHeHu00]) ..... 53

Abb. 13: Beispiel für einen Konflikt in FAKTUS ..... 92

Abb. 14: Überholungsabschnitte eines Zuges ..... 97

Abb. 15: Beispiel für Fahrwege mit zugrunde liegender Infrastruktur ..... 110

Abb. 16: Fahrnetz für das Beispiel aus Abb. 15 ..... 111

Abb. 17: Fahrnetz zur Suche eines alternativen Wegs ..... 112

Abb. 18: Traversierungen eines Beispielgraphen ..... 115

Abb. 19: Entwicklung des Stack bei der Tiefensuche ..... 116

Abb. 20: Konflikt zwischen zwei Zugfahrten ..... 122

Abb. 21: Aufbau der Belegungsmatrix in FAKTUS ..... 125

Abb. 22: Duale Belegungsmatrix ..... 127

Abb. 23: Konflikt zwischen den beiden Zügen k und j ..... 129

Abb. 24: Konflikt zwischen den beiden Zügen j und i ..... 130

Abb. 25: Konfliktlösung durch zusätzlichen Betriebshalt ..... 135

Abb. 26: Konfliktlösung durch Verlängerung der Fahrzeiten ..... 139

Abb. 27: Systemarchitekturen von FAKTUS und BABSI ..... 143

Abb. 28: Phasen einer Konfliktlösung ..... 144

Abb. 29: Ermittlung der Konfliktlösungen für einen Zug ..... 146

Abb. 30: Simulationsverfahren BABSI ..... 153

Abb. 31: Konfliktlösungsparameter ..... 154

Abb. 32: Dialogfenster zur Eingabe von Zugparametern ..... 155

Abb. 33: Fenster zur Anzeige der Simulationsergebnisse ..... 156

# 11 Abkürzungsverzeichnis

| | |
|---|---|
| ABN | Allgemeine Bedingungen für die Nutzung der Eisenbahninfrastruktur |
| AFAIG | *Affectation Automatique et Interactive des circulation dans les Gares* |
| ANKE | Analytische Netzkapazitätsermittlung |
| ASDIS | Asynchrone Disposition des Eisenbahnbetriebes |
| BABSI | Bahnbetriebssimulation |
| BRB | Bundesbahn-Reisezugfahrplanbesprechung |
| DB | Deutsche Bundesbahn |
| DB AG | Deutsche Bahn AG |
| DONS | *Designer Of Network Schedules* (bzw. *Dienstregelingontwikkeling bij NS*) |
| DR | Deutsche Reichsbahn |
| DV | Datenverarbeitung |
| D-CIF | Dezentrales System der computerintegrierten Fahrplanbearbeitung |
| EFK | jährliche Europäische Reisezugfahrplankonferenz |
| EG | Europäische Gemeinschaft |
| EIBV | Eisenbahninfrastruktur-Benutzungsverordnung |
| ENeuOG | Eisenbahnneuordnungsgesetz |
| FAKTUS | Fahrplankonstruktion und –untersuchung |
| FBS | Fahrplanbearbeitungssystem |
| FIFO | *first in first out* |
| GFD | Gemeinsame Fahrplandatenhaltung |
| HfV | Hochschule für Verkehrswesen in Dresden |
| HVB | Hauptverwaltung der Deutschen Bundesbahn |

| | |
|---|---|
| IFB | Interaktive Fahrplan-Bearbeitung |
| IRSK | Ergebnisse der Internationalen Reisebüro-Sonderzugkonferenz |
| NSIM | Netzsimulation |
| NSS | Normierte Schnittstelle |
| PESP | *Periodic Event Scheduling Problem* |
| PROLOP | Programmsystem zur Linienplanung und Belastungssimulation |
| RFK | Rechnergestützte Fahrplankonstruktion |
| RUF | Rechnerunterstützte Fahrplanerstellung |
| RUT | Rechnerunterstützte Trassenkonstruktion |
| RZü | Rechnerunterstützte Zugüberwachung |
| SABINE | Simulation und Auswertung des Betriebsablaufs im Netz |
| SIMONE | *Simulation Model of Networks* |
| STRESI | Streckensimulation |
| SYFA | System Fahrplan |
| TEFA | Technologen-Arbeitsplatz Fahrplanbearbeitung |
| Zü | Zugüberwachung |

# 12 Literaturverzeichnis

[BaBr99] **Baars, J.; Brünger, O.:** Von der Trassenbestellung zum Kursbuch
Eisenbahntechnische Rundschau, 48 (1999), H. 10, pp 662 – 667

[Bär98] **Bär, M.:** Planungs- und Dispositionssysteme für den Bahnbetrieb
EI – Der Eisenbahningenieur, 49 (1998), H. 3, pp 19 – 26

[Bau97] **Baumgarten, B.:** Petri-Netze – Grundlagen und Anwendungen
Spektrum, Akademischer Verlag, Heidelberg u. a., 2. Auflage (1996)

[BGBl93] Gesetz zur Neuordnung des Eisenbahnwesens (Eisenbahnneuordnungsgesetz – ENeuOG) vom 27.12.93
BGBl. I (1993), pp 2378 – 2474

[BGBl97] Verordnung über die diskriminierungsfreie Benutzung der Eisenbahninfrastruktur und über die Grundsätze zur Erhebung von Entgelt für die Benutzung der Eisenbahninfrastruktur (Eisenbahninfrastruktur-Benutzungsverordnung – EIBV) vom 17.12.97
BGBl. I (1997), pp 3153 – 3155

[BiMi71] **Binnewies, H.; Mittmann, H.-D.:** Einsatz von Datenverarbeitungsanlagen für Fahrzeit- und Verbrauchswerte-Ermittlung
Eisenbahntechnische Rundschau, 20 (1971), H. 9, pp 378 – 387

[BoOl94] **Bouma, A.; Oltrogge, Ch.:** Linienplanung und Simulation für öffentliche Verkehrswege in Praxis und Theorie
Eisenbahntechnische Rundschau, 43 (1994), H. 6, pp 369 – 378

[Bou86] **Bourachot, J.:** Computergestützte Planung großer Bahnhöfe mit Hilfe des Modells AFAIG
Rail International (Schienen der Welt), Mai 1986, pp 2 – 18

[BrGi92] **Brückner, E.; Ginzel, Th.:** Das Technologische Labor des Eisenbahntransports der Hochschule für Verkehrswesen “Friedrich List”
Verkehrswissenschaft aktuell, 2 (1992), H. 2, pp 114 – 118

[BrHeHu00] **Brucker, P.; Heitmann, S.; Hurink, J.:** Scheduling of Trains on a Single-Track Railway-Line
in: Extended Abstracts of the Seventh International Workshop on Project Management and Scheduling (PMS2000), Universität Osnabrück, April 2000, pp 85 – 87

[Bru01] **Brucker, P.:** Scheduling Algorithms
Springer-Verlag Heidelberg u. a., 3. Auflage (2001)

[Brü95] **Brünger, O.:** Konzeption einer Rechnerunterstützung für die Feinkonstruktion von Eisenbahnfahrplänen
Dissertation, Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Institutes der RWTH Aachen, Heft 51 (1995)

[Brü00] **Brünger, O.:** Fahrplanfeinkonstruktion mit Rechnerunterstützung – Grundlagen, Meilensteine und Visionen
Edition ETR: Informationstechnologie bei den Bahnen
Hestra-Verlag Darmstadt (2000), pp 148 – 154

[BuWiZi97] **Bussieck, M.; Winter, T.; Zimmermann, U.:** Discrete Optimization in Public Rail Transport
Mathematical Programming 79 (1997), H. 1 – 3, pp 415 – 444

[CaGo94] **Cai, X.; Goh, C. J.:** A Fast Heuristic for the Train Scheduling Problem
Computers & Operations Research, 21 (1994), H. 5, pp 499 – 510

[Car94] **Carey, M.:** A Model and Strategy for Train Pathing with Choice of Lines, Platforms, and Routes
Transportation Research, 28B (1994), H. 5, pp 333 – 353

[CoToVi98] **Cordeau, J.-F.; Toth, P.; Vigo, D.:** A Survey of Optimization Models for Train Routing and Scheduling
Transportation Science, 32 (1998), H. 4, pp 380 – 404

[DB94] **Deutsche Bahn AG, Geschäftsbereich Netz:** Trassenpreise
Mainz (1994)

[DB99a] **DB Netz, Deutsche Bahn Gruppe:** DB Netz. Für Sie geöffnet.
Frankfurt am Main (1999)

[DB99b] **DB Netz AG:** Richtlinie 405, Fahrwegkapazität –
Modul 405.102 Zeitverbrauch bei Nutzung der Fahrwegkapazität
Frankfurt am Main (1999), Stand: 01.12.1999

[DB01a] **DB Netz AG:** Trassenpreissystem 2001
Frankfurt am Main (2001)

[DB01b] **DB Netz AG:** Allgemeine Bedingungen für die Nutzung der Eisenbahninfrastruktur der DB Netz AG (ABN)
Frankfurt am Main (2001), Stand: 27.04.2001

[DB01c] **DB Netz AG:** Richtlinie 402, Trassenmanagement –
Modul 402.301 Trassen konstruieren
Frankfurt am Main (2001), Stand: 10.06.2001

[DB01d] **DB Netz AG:** Richtlinie 420, Betriebszentralen DB Netz AG –
Modul 420.102 Betriebsplanung BZ
Frankfurt am Main (2001), Stand: 10.06.2001

[EcKa99] **Ecke, J.; Kant, M.:** Umsetzung des Konzeptes der Betriebszentralen in Frankfurt/M.
Signal+Draht, 91 (1999), H. 5, pp 27 – 30

[EG91] Richtlinie 91/440/EWG zur Entwicklung der Eisenbahnunternehmen der Gemeinschaft
Amtsblatt der EG (1991), Nr. L 237, pp 25 – 28

[EG95] Richtlinie 95/19/EG über die Zuweisung von Fahrwegkapazität der Eisenbahn und die Berechnung von Wegeentgelten
Amtsblatt der EG (1995), Nr. L 143, pp 75 – 78

[EG01a] Richtlinie 2001/12/EG zur Änderung der Richtlinie 91/440/EWG zur Entwicklung der Eisenbahnunternehmen in der Gemeinschaft
Amtsblatt der EG (2001), Nr. L 75, pp 1 – 25

[EG01b] Richtlinie 2001/13/EG zur Änderung der Richtlinie 95/18/EG über die Erteilung von Genehmigungen von Eisenbahnunternehmen
Amtsblatt der EG (2001), Nr. L 75, pp 26 – 28

[EG01c] Richtlinie 2001/14/EG über die Zuweisung von Fahrwegkapazität der Eisenbahn, die Erhebung von Entgelten für die Nutzung von Eisenbahninfrastruktur und die Sicherheitsbescheinigung
Amtsblatt der EG (2001), Nr. L 75, pp 29 – 46

[Fer99] **Ferchland, Ch.:** Interaktive Fahrplanerstellung für den intermodalen ÖPV mit Methoden der Netzplantechnik
Dissertation, Schriftenreihe des Institutes für Verkehrswesen und Raumplanung, Universität der Bundeswehr München, Heft 42 (1999)

[FiHe90] **Fischer, K.; Hertel, G.:** Bedienungsprozesse im Transportwesen
Transpress Berlin (1990)

[Fis95] **Fischer, H.; Bolemant, M.; Margaritov, A.; Friedrich, G.-R.:**
Das Projekt SABINE – Simulation und Auswertung des Betriebsablaufs im Netz
in: VDI Bericht Nr. 1219: „Simulation und Simulatoren für den Schienenverkehr“, VDI-Verlag Düsseldorf (1995), pp 451 – 462

[GöBr88] **Göbertshahn, R.; Brand, J.-A.:** Produktionsplanung Schienenpersonenverkehr – ein Element des Management-Regelkreises Betrieb
Die Bundesbahn, 64 (1988), H. 7, pp 615 – 622

[Gre00] **Greaves, T.:** Dynamic train scheduling on a national scale
Railway Gazette International, Juni 2000, pp 369 – 371

[GrKa66] **Groll, A.; Kayser, H.:** Fahrplanwesen
Josef Keller Verlag Starnberg, 1. Auflage (1966)

[Grö00] **Gröger, Th.:** Simulation des Vorganges der Trassenvergabe und Nachweis der Stabilität der Betriebsabwicklung
Vortrag auf dem 3. Eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Kolloquium
in: Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Institutes der RWTH Aachen, Heft 57 (2000), pp 123 – 133

[GröAth01] **Gröger, Th.; Athanasoglou, E.:** Nachweis korrespondierender Ergebnisse der Simulationsverfahren BABSI und STRESI
Interne Studie des Verkehrswissenschaftlichen Institutes der RWTH Aachen, Juli 2001

[HaKaRa99] **Hauptmann, D.; Kaminsky, R.; Radtke, A.:** Integrierte Planung des Eisenbahnbetriebs mit Simu++
Signal+Draht, 91 (1999), H. 7/8, pp 5 – 9

[Hap59] **Happel, O.:** Sperrzeiten als Grundlage für die Fahrplankonstruktion
Eisenbahntechnische Rundschau, 8 (1959), H. 2, pp 79 – 90

[HaSc99] **Haase, D.; Schwalbach, M.:** Trassenpreise in Deutschland und Europa
Rail International (Schienen der Welt), November 1999, pp 8 – 14

[Hau00] **Hauptmann, D.:** Automatische und diskriminierungsfreie Ermittlung von Fahrplantrassen in beliebig großen Netzen spurgeführter Verkehrssysteme
Dissertation, Wissenschaftliche Arbeit Nr. 54 des Instituts für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und -betrieb der Universität Hannover,
in: Wissenschaftliche Arbeiten für den Schienenverkehr, Hestra-Verlag Darmstadt (2000)

[HeUh92] **Heber, K.; Uhlmann, M.:** Rechnergestütztes Fahrplanzeichnen – Stand und Erfahrungen in der Reichsbahndirektion Dresden
Rail International (Schienen der Welt), Februar 1992, pp 14 – 19

[HeLu97] **Hertel, G.; Ludwig, D.:** Kundenorientierte Leistungsuntersuchungen im Netz der Eisenbahn
Edition ETR: Bahn Report ’97, Hestra-Verlag, Darmstadt (1997),
pp 49 – 54

[Her94] **Hertel, G.:** Qualität als strategischer Erfolgsfaktor
Eisenbahningenieur, 45 (1994), H. 3, pp 186 – 198

[HoLoKr91] **Horn, P.; Lorenz, H.; Krebs, H.:** Dezentrales System der computerintegrierten Fahrplanbearbeitung – Konzept und Erfahrungen
Verkehrswissenschaft aktuell, 1 (1991), H. 1, pp 51 – 56

[HöKlHa93] **Hörstel, J.; Klahn, V.; Hauptmann, D.:** Interaktive Fahrplankonstruktion mit dem Simulationsmodell SIMU VII
Eisenbahntechnische Rundschau, 42 (1993), H. 9, pp 589 – 593

[Hoo95] **Hooghiemstra, J.:** An automatic timetable generator for the Dutch railway network
in: Vorträge des Zweiten Eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Kolloquiums, Schriftenreihe des Instituts für Verkehrssystemtheorie und Bahnverkehr der TU Dresden, Band 2 (1995), pp 105 – 114

[Hoo96] **Hooghiemstra, J.:** Design of regular interval timetables for strategic and tactical railway planning
in: Computers in Railways V (Proceedings COMPRAIL 96, Berlin), Computational Mechanics Publications, Southampton (1996), Volume1: Railway Systems and Management, pp 394 – 402

[HoUl00] **Hopcroft, J.; Ullman, J.:** Einführung in die Automatentheorie, Formale Sprachen und Komplexitätstheorie
R. Oldenbourg Verlag München, Wien, 4. Auflage (2000)

[Hro01] **Hromkovic, J.:** Algorithmics for Hard Problems – Introduction to Combinatorial Optimization, Randomization, Approximation, and Heuristics
Springer-Verlag Heidelberg u. a. (2001)

[IRFP00] **Institut für Regional- und Fernverkehrsplanung:** Anleitung zum Fahrplanbearbeitungssystem FBS
Frankenheim bei Leipzig (2000)

[ISW98] **Ingenieurgesellschaft Schultze, Wakob und Partner:** Erläuterungen zum Simulationsverfahren NSIM
Aachen (1998)

[Jäg93] **Jäger, U.:** „Normierte Schnittstelle“ zwischen Fahrplananwendern
Die Deutsche Bahn, 69 (1993), H. 11, pp 767 – 770

[Jac02] **Jacobs, J.:** Rechnergestützte Konfliktermittlung und Entscheidungsunterstützung bei der Disposition des Zuglaufs
Dissertation, Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Institutes der RWTH Aachen, Heft 61 (2002) **(in Vorbereitung)**

[JoHa91] **Jovanovic, D.; Harker, P.:** Tactical Scheduling of Rail Operation: The SCAN I System
Transportation Science, 25 (1991), H. 1, pp 46 – 64

[Kam01] **Kaminsky, R.:** Pufferzeiten in Netzen des spurgeführten Verkehrs in Abhängigkeit von Zugfolge und Infrastruktur
Dissertation, Wissenschaftliche Arbeit Nr. 56 des Instituts für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und -betrieb der Universität Hannover,
in: Wissenschaftliche Arbeiten für den Schienenverkehr, Hestra-Verlag Darmstadt (2001)

[Kan00] **Kandels, C.:** Erwartungen der DB Netz AG an die Werkzeuge für Planung und Führung des Bahnbetriebes
Vortrag auf dem 3. Eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Kolloquium in: Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Institutes der RWTH Aachen, Heft 57 (2000), pp 19 – 28

[KaWi87] **Kannengießer, F.; Wiche, B.:** Einfluß der Fahrzeitenzuschläge und Pufferzeiten auf die Pünktlichkeit
Die Bundesbahn, 63 (1987), H. 11, pp 1001 – 1007

[Kla94] **Klahn, V.:** Die Simulation großer Eisenbahnnetze
Dissertation, Wissenschaftliche Arbeit Nr. 41, Institut für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und -betrieb der Universität Hannover (1994)

[Kre85] **Kretschmer, W.:** Entwicklung eines EDV-gestützten Datenaufbereitungssystems für eisenbahnbetriebliche Untersuchungen
Dissertation, Wissenschaftliche Arbeit Nr. 21, Institut für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und -betrieb der Universität Hannover (1985)

[KrHa95] **Kraay, D.; Harker, P.:** Real-Time Scheduling of Freight Railroads
Transportation Research, 29B (1995), H. 3, pp 213 – 229

[Kri96] **Krista, M.:** Verfahren zur Fahrplanoptimierung dargestellt am Beispiel der Synchronzeiten
Dissertation, Schriftenreihe des Institutes für Eisenbahnwesen und Verkehrssicherung der TU Braunschweig, Heft 56 (1996)

[KuLa00] **Kuntze, P.; Lauckhardt, M.:** Das Strecken-GIS der DB Netz AG
EI – Der Eisenbahningenieur, 51 (2000), H. 10, pp 47 – 49

[LeLoSa92] **Leoff, M.; Lorenz, F.; Sauer, W.:** Interaktive Fahrplan-Bearbeitung
Die Deutsche Bahn, 68 (1992), H. 11, pp 1229 – 1232

[Lie92] **Liebl, F.:** Simulation – Problemorientierte Einführung
R. Oldenbourg Verlag München, Wien, 2. Auflage (1995)

[Lin84] **Lindner, H.-R.; Overrath, H.; Bürger, R.; Weiß, G.:** Der Fahrplan – allgemeines Basiswissen und Grundsätze
Eisenbahn-Fachverlag Heidelberg, Mainz (1984)

[Lin00] **Lindner, Th.:** Train Schedule Optimization in Public Rail Transport
Dissertation, Abteilung für mathematische Optimierung, Online-Veröffentlichung der TU Braunschweig (2000)

[Meh92] **Mehta, S.:** Programmpaket zur asynchronen Simulation des Eisenbahnbetriebes
Diplomarbeit am Lehrstuhl für Verkehrswirtschaft, Eisenbahnbau und -betrieb der RWTH Aachen (1992)

[MiBo00] **Middelkoop, D.; Bouwman, M.:** Train network simulator for support of network wide planning of infrastructure and timetables
in: Computers in Railways VII (Proceedings COMPRAIL 2000, Bologna) WIT Press, Southampton (2000), pp 267 – 276

[Nie01] **Nießen, N.:** Untersuchung der Leistungsfähigkeit einer Eisenbahnstrecke im Netz der Rhätischen Bahn nach Inbetriebnahme des Vereinatunnels unter Berücksichtigung der sich für den kombinierten Verkehr ergebenden Perspektiven
Diplomarbeit am Lehrstuhl für Schienenbahnwesen und Verkehrswirtschaft der RWTH Aachen (2001)

[Odi98] **Odijk, M.:** Railway Timetable Generation
Dissertation, Delft University of Technology (1998)

[OsRo89] **Oser, U.; Roth, W.:** Informationssysteme zur Überwachung, Disposition und Steuerung des Zugbetriebs
Die Bundesbahn, 65 (1989), H. 11, pp 985 – 991

[OsThBi94] **Oser, U.; Thorwarth, W.; Biernatzki, F.:** Betriebszentralen
Eisenbahningenieur, 45 (1994), H. 12, pp 859 – 866

[Pac93] **Pachl, J.:** Steuerlogik für Zuglenkanlagen zum Einsatz unter stochastischen Bedingungen
Dissertation, Schriftenreihe des Institutes für Verkehr, Eisenbahnwesen und Verkehrssicherung der TU Braunschweig, Heft 40 (1974)

[Pac00] **Pachl, J.:** Systemtechnik des Schienenverkehrs
Verlag B. G. Teubner Stuttgart, Leipzig, 2. Auflage (2000)

[PeKr00] **Peeters, L.; Kroon, L.:** An Optimization Approach to Railway Timetabling
in: Extended Abstracts of the Seventh International Workshop on Project Management and Scheduling (PMS2000),
Universität Osnabrück, April 2000, pp 230 – 232

[PlVeSe75] **Plietz, K.-D.; Vetter, H.; Seifert, K.-H.:** Anwendungsmöglichkeiten der EDV für die Zugfahrplankonstruktion
Die Eisenbahntechnik, 23 (1975), H. 11, pp 492 – 494

[Pom92] **Pomp, R.:** Die Anwendung der Datenverarbeitung in der Fahrplanarbeit aus Sicht der Deutschen Reichsbahn
Die Deutsche Bahn, 68 (1992), H. 9, pp 1011 – 1014

[PuHo89] **Puhlmann, J.; Hoffmann, H.-G.:** Konzept für einen Technologenarbeitsplatz „Fahrplanbearbeitung“
Eisenbahnpraxis, 33 (1989), H. 4, pp 135 – 136

[Put81] **Putzer, S.:** Simulationsmodell für den Eisenbahnbetrieb auf dreigleisigen Strecken
Dissertation, Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Institutes der RWTH Aachen, Heft 33 (1981)

[Rau98] **Rauh, H.-F.:** Trassenmanagement bei der DB AG
Eisenbahntechnische Rundschau, 47 (1998), H. 10, pp 620 – 625

[Rüg64] **Rüger, S.:** Darstellung und günstigste Lösung der Fahrplanverknüpfungen in einem Nahverkehrsnetz
Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Verkehrswesen Dresden, 11 (1964), H. 2, pp 145 – 148

[Sa99] **Sauer, W.:** RUT – Rechnerunterstützte Trassenkonstruktion
Eisenbahntechnische Rundschau, 48 (1999), H. 11, pp 720 – 725

[Schö01] **Schöning, U.:** Theoretische Informatik kurz gefasst
Spektrum, Akademischer Verlag, Heidelberg/Berlin, 4. Auflage (2001)

[Schr00] **Schrijver, A.:** Timetabling for the Dutch Railways
in: Extended Abstracts of the Seventh International Workshop on Project Management and Scheduling (PMS2000), Universität Osnabrück, April 2000, p 22

[Schu85] **Schultze, K.:** Modell für die asynchrone Simulation des Betriebes in Teilen des Eisenbahnnetzes
Dissertation, Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Institutes der RWTH Aachen, Heft 38 (1985)

[Schw74] **Schwanhäußer, W.:** Die Bemessung der Pufferzeiten im Fahrplangefüge der Eisenbahn
Dissertation, Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Institutes der RWTH Aachen, Heft 20 (1974)

[Schw78] **Schwanhäußer, W.:** Die Ermittlung der Leistungsfähigkeit von großen Fahrstraßenknoten und von Teilen des Eisenbahnnetzes
Archiv für Eisenbahntechnik, 33 (1978), pp 7 – 18

[Schw94a] **Schwanhäußer, W.:** The Status of German Railway Operations Management in Research and Practice
Transportation Research, 28A (1994), H. 6, pp 495 – 500

[Schw94b] **Schwanhäußer, W.:** Berechnung der zwischen dem einzulegenden Zug und den benachbarten Zügen wahrscheinlich übertragenen Folgeverspätungen
Arbeitspapier des Verkehrswissenschaftlichen Instituts der RWTH Aachen (1994)

[SchwGr97] **Schwanhäußer, W.; Gröger, Th.:** Analyse ausgewählter Simulationsmodelle für den Schienenverkehr
Forschungsprojekt „Situationsanalyse über den Stand der Simulationsmodelle im Verkehrswesen“ des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (Kennzeichen 19 K 9706 1)

[Schw98] **Schwanhäußer, W.:** Verfahren zur Steuerung und Sicherung eines fahrplangebundenen Verkehrssystems
Deutsches Patent- und Markenamt, Offenlegungsschrift DE 197 26 542 A 1 vom 19.11.1998

[Schw00] **Schwanhäußer, W.; Gast, I.; Schultze, K.; Wakob, H.; Brünger, O.; Mehta, S.:** Programmfamilie SLS – STRESI, STRELE, ALFA – PC-Programme zur Leistungsfähigkeitsberechnung und Simulation
Benutzerhandbuch, Version 4.91, Aachen (2000)

[Sed98] **Sedgewick, R.:** Algorithmen
Addison-Wesley Bonn u. a., 4. Auflage (1998)

[SeUk89] **Serafini, P.; Ukovich, W.:** A mathematical model for periodic event scheduling problems
SIAM Journal of Discrete Mathematics, 2 (1989), No. 4, pp 550 – 581

[SMA99] **SMA und Partner AG:** Viriato – Das Programmsystem zur konzeptionellen Angebotsplanung
Zürich (1999)

[Ste00] **Stemann, H.:** Ermittlung der Kenngrößen im Eisenbahnfahrplan mittels analytischer und simulativer Verfahren
Diplomarbeit am Lehrstuhl für Verkehrswirtschaft, Eisenbahnbau und -betrieb der RWTH Aachen (2000)

[Tan01] **Tanenbaum, A.:** Modern Operating Systems
Prentice Hall, Upper Saddle River, 2. Auflage (2001)

[Tre83] **Trettin, J.:** Untersuchungen zur Verknüpfung von Taktfahrplänen unter den Bedingungen der Technologie des Eisenbahntransports
Dissertation, Hochschule für Verkehrswesen Dresden (1983)

[Tri00] **Trinckauf, J.:** Das neue Eisenbahnlabor der Technischen Universität Dresden
Signal+Draht, 92 (2000), H. 12, pp 34 – 35

[Tsch00] **Tschorn, S.:** Automatisierte Fahrplanabstimmung zwischen Netzbetreiber und Eisenbahnverkehrsunternehmen
Eisenbahntechnische Rundschau, 49 (2000), H. 7/8, pp 487 – 493

[Vak02] **Vakhtel, S.:** Rechnerunterstützte analytische Ermittlung der Kapazität von Eisenbahnnetzen
Dissertation, Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Institutes der RWTH Aachen, Heft 59 (2002)

[VDI00] **VDI-Richtlinie 3633:** Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen
Entwurf, Beuth Verlag Berlin (2000)

[Vol96] **Volkmann, L.:** Fundamente der Graphentheorie
Springer-Verlag Wien, New York (1996)

[Wak85] **Wakob, H.:** Ableitung eines generellen Wartemodells zur Ermittlung der planmäßigen Wartezeiten im Eisenbahnbetrieb unter besonderer Berücksichtigung der Aspekte Leistungsfähigkeit und Anlagenbelastung
Dissertation, Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Institutes der RWTH Aachen, Heft 36 (1985)

[Wei81] **Weigand, W.:** Graphentheoretisches Verfahren zur Fahrplangestaltung in Transportnetzen unter Berücksichtigung von Pufferzeiten mittels interaktiver Rechentechnik
Dissertation, Schriftenreihe des Institutes für Eisenbahnwesen und Verkehrssicherung der TU Braunschweig, Heft 24 (1981)

[Wei98] **Weinman, M.:** Timetable and Train Planning Software: A Brief Review
European Railway Review, November 1997, pp 85 – 88

[Wei99] **Weinman, M.:** Software für Fahrplanerstellung und Zugplanung
Rail International (Schienen der Welt), November 1999, pp 3 – 6

[Weg74] **Wegel, H.:** Fahrplangestaltung für taktbetriebene Nahverkehrsnetze
Dissertation, Schriftenreihe des Institutes für Eisenbahnwesen und Verkehrssicherung der TU Braunschweig, Heft 8 (1974)

[Wen95] **Wendler, E.:** Weiterentwicklung der Sperrzeitentreppe für moderne Signalsysteme
Signal+Draht, 87 (1995), H. 7/8, pp 268 – 273

[Wen99] **Wendler, E.:** Analytische Berechnung der planmäßigen Wartezeiten bei asynchroner Fahrplankonstruktion
Dissertation, Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Institutes der RWTH Aachen, Heft 55 (1999)

[Wen01] **Wendler, E.:** Quality Management in the Operation Planning Process by means of Harmonized Modelling
in: Proceedings of the Sessions of the World Congress on Railway Research (WCRR 2001), Köln, November 2001

[Zim92] **Zimmermann, H.-J.:** Methoden und Modelle des Operations Research
Vieweg Verlag Braunschweig/Wiesbaden, 2. Auflage (1992)

[Zim99] **Zimmermann, W.:** Operations Research
R. Oldenbourg Verlag München, Wien, 9. Auflage (1999)

[Zwa96] **Zwaneveld, P.; Kroon, L.; Romeijn, H.; Salomon, M.; Dauzère-Pérès, S.; van Hoesel, S.; Ambergen, H.:** Routing Trains Through Railway Stations: Model Formulation and Algorithm
Transportation Science, 30 (1996), H. 3, pp 181 – 194

# LEBENSLAUF

### Persönliche Daten

Thomas Andreas Gröger

geboren am 01.02.1968 in Lübbecke (Westfalen)

verheiratet, zwei Kinder

### Berufstätigkeit

| | |
|---|---|
| 10/2001 – heute | Deutsche Bahn AG, Frankfurt am Main |
| 09/1996 – 09/2001 | wissenschaftlicher Assistent am Verkehrswissenschaftlichen Institut der RWTH Aachen |
| 01/1993 – 08/1996 | Mathematisch-technischer Assistent am Lehrstuhl für Informatik III der RWTH Aachen |
| 10/1990 – 12/1992 | studentische Hilfskraft am Rechenzentrum der RWTH Aachen |

### Bildungsweg

| | |
|---|---|
| 10/1990 – 07/1996 | Studium der Informatik mit Nebenfach Wirtschafts-wissenschaften an der RWTH Aachen |
| 09/1987 – 08/1990 | Ausbildung zum Mathematisch-technischen Assistenten am Rechenzentrum der RWTH Aachen |
| 1974 – 1987 | Grundschule und Gymnasium in Lübbecke (Westfalen) |