

Rechnerunterstützte analytische Ermittlung der Kapazität von Eisenbahnnetzen

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

von

Sergey Vakhtel

aus der Gemeinde Tselinnyj, Schirinsker Bezirk, Land Krasnojarsk der UdSSR
(heute Autonome Republik Chakasia, Russische Föderation)

Berichter:

Universitätsprofessor Dr. -Ing. W. Schwanhäußer

Universitätsprofessor Dr. -Ing. J. Pachtl

Tag der mündlichen Prüfung: 15. Februar 2002

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Hochschulbibliothek online verfügbar

Inhaltsverzeichnis

1	Leistungsuntersuchungen von Eisenbahnanlagen.....	12
2	Problematik der Leistungsuntersuchungen.....	17
3	Unterteilung des Eisenbahnnetzes in Untersuchungsbereiche.....	43
4	Analytische Modellierung.....	51
5	Teilfahrstraßenknoten.....	79
6	Modellfahrten.....	98
7	Ermittlung von Mindestzugfolgezeiten.....	113
8	Gesamtfahrstraßenknoten.....	140
9	Qualitätsmaßstäbe.....	150
10	EDV-System ANKE.....	157
	Zusammenfassung und Ausblick.....	181
	Literaturverzeichnis.....	183
	Anlage A Numerischer Vergleich der Ansätze zur Ermittlung von Folgeverspätungen.....	191
	Anlage B Vergleich der Verfahren ALFA und ANKE.....	196
	Anlage C Planmäßige Wartezeiten – Vergleich mit der Simulation.....	203

Zusammenfassung

Eisenbahnbetriebswissenschaftliche Untersuchungen von Bahnanlagen sind heute ohne elektronische Datenverarbeitung kaum vorstellbar. Mit modernen technischen Hilfsmitteln können die Qualitäts- und Leistungskenngößen von Strecken, Bahnhöfen und Fahrstraßenknoten mit hoher Abbildungsgenauigkeit ermittelt werden. Eine bewährte Grundlage für die Kapazitätsberechnungen bilden seit Jahrzehnten analytische Methoden, mit deren Hilfe Leistungsfähigkeitsnachweise und Dimensionierungen von bestehenden bzw. geplanten Bahnanlagen durchgeführt werden.

Bei analytischen Leistungsuntersuchungen werden zwei Hauptaufgaben unterschieden, die Modellierung der Fahrplanerstellung und die Nachbildung der Betriebsabwicklung. Dementsprechend unterteilt man die analytischen Methoden in zwei Gruppen:

- Bedienungstheoretische Modelle zur Quantifizierung von Wartezeiten im Fahrplan. Sie basieren auf der Warteschlangentheorie des Operations Research. Ausgangspunkt für diese Modellgruppe war die Behinderungstheorie von POTTHOFF.
- Wahrscheinlichkeitstheoretische Modelle zur Berechnung der Folgeverspätungen im Betrieb.

Die bisher bekannt gewordenen EDV-Verfahren zur Leistungsfähigkeitsermittlung, die auf der analytischen Modellierung aufbauen, entsprechen nicht mehr dem neuesten Stand der Rechentechnik, der Abbildung der Infrastruktur und der Weiterentwicklung der theoretischen Grundlagen. Deswegen wächst der Bedarf nach einem modernen und universellen Werkzeug für die Leistungsuntersuchungen von Eisenbahnanlagen.

In der vorliegenden Arbeit wird ein Konzept, das die neuesten Erkenntnisse der Eisenbahnbetriebswissenschaft berücksichtigt und dem aktuellen Stand der Rechentechnik entspricht, für ein neues analytisches EDV-System ausgearbeitet, welches als Standardwerkzeug bei der Deutschen Bahn AG demnächst eingesetzt werden soll. Die Bezeichnung dieses Systems ist **ANKE** (Analytische Netzkapazitätsermittlung).

Nach einem kurzen geschichtlichen Überblick und der Analyse einzelner Aspekte der analytischen Modellierung erfolgt hier eine kritische Auseinandersetzung mit herkömmlichen Computeranwendungen. Anschließend werden die Anforderungen an eine umfassende interaktive analytische Netzuntersuchung formuliert.

Als nächster Schritt wird ein geeignetes Modell für die Abbildung der Eisenbahninfrastruktur gewählt. Bei der darauffolgenden Analyse zur Unterteilung des in

Untersuchungsbereiche, welche die theoretischen Voraussetzungen am besten erfüllen müssen, fällt die Wahl auf das Netzelement Teilfahrstraßenknoten (TFK).

Die für die Verwendung in Frage kommenden wahrscheinlichkeitstheoretischen und bedienungstheoretischen Modelle werden detailliert beschrieben und analysiert. Eine besondere Aufmerksamkeit verdienen dabei die neuesten wissenschaftlichen Entwicklungen von SCHWANHÄUßER, HERTEL und WENDLER. Im Rahmen der Untersuchung der bisher nicht umgesetzten zuggattungsscharfen Formel für die Berechnung von Folgeverspätungen von SCHWANHÄUßER wird der Beweis erbracht, dass sich die bekannte summarische Formel aus der zuggattungsscharfen ableiten lässt.

Alle dargestellten Modelle interpretieren Teilfahrstraßenknoten als einstellige Bedienungssysteme. Diese müssen in der Eisenbahninfrastruktur noch vor der Untersuchung automatisch abgegrenzt werden. Die infrastrukturbezogene Abgrenzung von TFK wird in dieser Arbeit zum ersten Mal überhaupt theoretisch begründet.

Bei der Ermittlung von Mindestzugfolgezeiten werden vor allem alternative Fahrtmöglichkeiten im Zusammenhang mit der Bestimmung von Überholungs- und Kreuzungsabschnitten in Betracht gezogen. Außerdem werden verschiedene Arten von Mindestzugfolgezeiten und ihre spezifischen Eigenschaften eingehend untersucht.

Als Alternative zu TFK hilft ein weiteres Netzelement, der Gesamtfahrstraßenknoten (GFK), gegenseitige Einflüsse zwischen einzelnen TFK aufzudecken. Hierfür werden spezielle Regeln zur Abgrenzung von GFK formuliert und die Verfahren zur Berechnung der planmäßigen Wartezeiten in GFK vorgestellt.

Eine wichtige Rolle bei den Leistungsuntersuchungen spielen die Qualitätsmaßstäbe, anhand deren die ermittelte Belastung von Eisenbahnanlagen beurteilt wird. Eine Reihe neuer Ansätze für eine wirtschaftliche Bewertung der Wartezeitfunktion wurde in letzter Zeit veröffentlicht. Es wird untersucht, ob diese neuen Verfahren die erprobten Interpolationsformeln ersetzen können.

Abschließend wird das EDV-System ANKE vorgestellt, wobei neben der Systemstruktur auch alle Phasen einer typischen Netzuntersuchung beschrieben werden. Detailliert werden u.a. Ursprung und Aufteilung von Wartezeiten, Steuerungsmöglichkeiten und Programmoptionen, Varianten der Engpassauflösung und Maßnahmen zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit von Eisenbahnanlagen behandelt.

Summary

Scientific studies of railway facilities are hardly conceivable today without electronic data processing. With modern technical aids the quality and performance characteristics can be precisely determined for railroad lines, stations and route nodes. Since decades analytical methods, with whose assistance efficiency proofs and dimensioning of existing or planned railway facilities have been executed, have formed a proven basis for the capacity calculations.

Analytical performance investigations are divided into two major tasks: the modelling of the timetable construction and the modelling of the railway operation. Accordingly we can divide the analytic methods into two groups:

- Queuing models, for the quantification of scheduled waiting time based on the theory of operational research. The starting point for this group of models was the handicap theory of Potthoff.
- Probabilistic models, for the calculation of the dispatching delays within the railway network.

The current railway efficiency calculation software tools, based on analytical modelling, do not correspond to the latest state of affairs in hardware or infrastructure modelling nor do they take into account the development made to the basic research theory. Therefore we see a growing demand for an universal tool for the performance investigations of railway systems.

This publication deals with a concept for a new analytical software system and takes into account the newest scientific achievements and the current state of computing techniques. The name of this system is ANKE (abbreviation for Analytic Network Capacity Determination) and is going to be used as a standard infrastructure investigation tool by the German Railways.

A critical consideration of conventional software follows a short historical overview and an analysis of the individual aspects of analytical modelling. Subsequently the requirements for a global interactive analytic railway network investigation are formulated.

The next step selects a suitable model for the railway infrastructure. Following this an analysis, which fulfils best the theoretical prerequisites for the partitioning of the railway network into investigation areas, results in the selection of the network item section route node (TFK).

The applicable probabilistic and operating theoretical models are described in detail and analysed next. Thereby the newest scientific developments of Schwanhäußer, Hertel and Wendler earn a special attention. In the context of the investigation of the

enhanced formula of Schwanhäußer for the calculation of follow-up delays, the proof is accomplished that the well-known summary formula can be derived from enhanced one.

All the analytical models interpret section route nodes as single-channel queuing systems. These must be automatically delimited in the railway infrastructure before its investigation. The infrastructure-related outlining of TFK is for the first time theoretically justified in this work.

The calculation of minimum spacing time between trains considers above all the alternative tracking possibilities with regard to the determination of overtaking and crossroad sections. Additionally different types of minimum spacing time and their specific characteristics are examined in detail.

Another network item, the total route node (GFK), can be used as an alternative to TFK. This helps to reveal the mutual influences between individual TFK's. Special rules for the delimiting of GFK are formulated and the procedures for the calculation of the regular scheduled waiting periods in GFK are introduced.

The quality control specifications play an important role in the railways performance investigations. Based on this the loading of railway systems utilisation can be determined. A number of new methods for a profitable evaluation of the waiting period function has lately been published. It is examined, whether these new approaches can replace the established interpolation formulas.

Finally the electronic data processing system ANKE is presented, whereby the system structure for all phases of a typical network investigation are described. Origin and allocation of waiting periods, control and program options, versions of the dissolution of bottleneck and measures for the improvement of the efficiency of railway systems are considered comprehensively.

Краткое содержание

Научные исследования железнодорожных систем непредставимы сегодня без электронной обработки данных. Современное программное обеспечение позволяет с высокой точностью вычислять параметры качества и производительности железнодорожных веток, станций и узлов. Особенно зарекомендовали себя в этой области аналитические методы, с помощью которых возможно не только проводить анализ протекающих на железной дороге процессов, но и также проектировать её инфраструктуру.

Систематические исследования железной дороги преследуют две основные цели: моделирование составления расписания и анализ производственных процессов. В соответствии с этим аналитические методы подразделяются на две группы:

- Модели, базируемые на теории массового обслуживания. Исходным пунктом для этой группы являются исследования Г.Поттгоффа
- Вероятностные модели для вычисления времени последовательного запаздывания в процессе эксплуатации железной дороги

Существующее на сегодня программное обеспечение как правило отстает от уровня развития вычислительной техники, не позволяет с абсолютной точностью моделировать железнодорожную инфраструктуру и не соответствует современным требованиям теории. Поэтому уже давно существует необходимость в разработке современного и универсального инструмента для исследований производительности железнодорожных систем.

В данной работе представлена всесторонняя концепция ПО нового типа, которое с одной стороны интегрирует новейшие научные познания в этой области, а с другой полностью соответствует уровню техники. Название этого программного пакета, который в настоящее время проходит тестирование в Deutsche Bahn, "Аналитические исследования пропускной способности железнодорожных сетей", сокращенно ANKE.

После короткого исторического обзора и анализа отдельных аспектов аналитического моделирования в работе производится детальный анализ известного в настоящее время программного обеспечения. На основе этого анализа выдвигаются требования к новой универсальной интерактивной системе. Далее производится выбор схемы моделирования железнодорожной инфраструктуры. Затем следует разбиение железнодорожной сети на зоны для детального исследования. Выбор останавливается на секции узла маршрута (TFK), которая в полной степени соответствует требованиям теории к одноканальной системе массового обслуживания.

На следующем этапе производится описание и сравнительный анализ существующих вероятностных моделей и методов теории массового обслуживания, применяемых исследованиях железнодорожных систем. Особенно выделяются новейшие научные исследования В.Шванхойссера, Г.Хертеля и Э.Вендлера. В рамках исследования новой уточненной формулы Шванхойссера для расчета вычисления времени последовательного запаздывания приводится доказательство того, что эту формулу можно привести к уже известному суммарному виду.

Все рассматриваемые аналитические модели интерпретируют секцию узла маршрута как одноканальную систему массового обслуживания. Перед непосредственным исследованием необходимо автоматически выделить секции узлов из инфраструктуры. В этой работе впервые приводится теоретическое обоснование распознавания ТФК на основе теории графов.

При вычислении минимального времени следования поездов принимаются во внимание прежде всего возможные альтернативные маршруты на участках сети. Кроме того проводится детальный анализ различных типов минимального времени следования и некоторые их особенности.

В качестве альтернативы к ТФК в работе представлен еще один сетевой элемент - полный узел маршрута (GFK), позволяющий учитывать взаимодействие между отдельным ТФК. Для выделения GFK в железнодорожной сети в работе формулируются специальные алгоритмы. Кроме того приводится формальное описание методов расчета времени ожидания в расписании для GFK.

Важную роль при исследованиях пропускной способности железной дороги играют критерии качества, посредством которых делается оценка произведенных расчетов. В последние годы в научной литературе было приведено несколько новых подходов к заданию критериев качества, основанных на экономическом анализе функции времени ожидания. В работе приводится сравнительный анализ новых методов с испытанными интерполяционными формулами.

В заключение в работе представлено описание программно пакета ANKE. Наряду с его системной структурой описываются основные фазы вычисления пропускной способности железнодорожных сетей. Подробно рассматриваются причины задержки поездов и возникновения времени ожидания в расписании, а также распределение этого времени по сети. Кроме того описываются основные приёмы работы с программой и варианты разгрузки перегруженных узлов, включая меры для улучшения пропускной способности.

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Abkürzungen

Durchschnittswerte über alle Züge

pV_g Wahrscheinlichkeit für das Auftreten gleichrangiger Zugfolgefälle

pV_e Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer Einbruchsverspätung

tP_m mittlere Pufferzeit: die Zeit um die im Durchschnitt ein erster Zug i verspätet sein darf, ohne einen planmäßig verkehrenden zweiten Zug j aus seiner planmäßigen Lage zu verdrängen.

tV_m mittlere Einbruchsverspätung je Verspätungsfall über alle Züge

tZ_m mittlere Mindestzugfolgezeit als arithmetisches Mittel über alle Zugfolgefälle

tZ_{mg} mittlere Mindestzugfolgezeit als arithmetisches Mittel über alle gleichrangigen Zugfolgefälle

tZ_{mv} mittlere Mindestzugfolgezeit als arithmetisches Mittel über alle nichtgleichrangigen Zugfolgefälle

E_n mittlere Anzahl der Einheiten im System

E_{tW} mittlere Wartezeit

E_{lW} mittlere Anzahl der wartenden Einheiten (Warteschlangenlänge)

E_{tB} mittlere Bedienungszeit

Zugspezifische Werte

p_i Wahrscheinlichkeit für das Auftreten des Modellzuges i

h_{ij} Wahrscheinlichkeit für das Auftreten des Zugfolgefalles Modellzug i vor Modellzug j im Bezugszeitraum tU

n_{ij} mittlere Anzahl der Zugfolgefälle i vor j im Bezugszeitraum tU

h_{ijk} Wahrscheinlichkeit für das Auftreten der Zugreihenfolge $i - j - k$ im Bezugszeitraum tU

pV_{ei} Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer Einbruchsverspätung bei dem ersten Zug i des betrachteten Zugfolgefalles

pV_{ej} Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer Einbruchsverspätung bei dem zweiten Zug j des betrachteten Zugfolgefalles

tW_i spezifische Wartezeit des Zuges i

tD_{ij} Dispositionszeit, um die der Zug i gegenüber den Zug j verspätet sein darf, bis die Reihenfolge geändert wird.

tV_{mi} mittlere Einbruchsverspätung je Verspätungsfall des ersten Zuges i des betrachteten Zugfolgefalles

tV_{mj} mittlere Einbruchsverspätung je Verspätungsfall des zweiten Zuges j des betrachteten Zugfolgefalles

$t_{Z_{ij}}$ Mindestzugfolgezeit zwischen den an einem Zugfolgefall beteiligten Zügen i (erster Zug) und j (zweiter Zug)

$t_{Z_{ji}}$ Mindestzugfolgezeit zwischen den Zügen i und j bei vertauschter Reihenfolge.

Elemente der Sperrzeit

t_F reine Fahrzeit

t_{Rb} Fahrstraßenbildezeit

t_{Rs} Sichtzeit

t_{Fn} Annäherungsfahrzeit

t_{Fr} Räumfahrzeit

t_{Ra} Fahrstraßenauflösezeit

t_{Sa} Sperrzeitanfang

t_{Se} Sperrzeitende

Summarische Werte

$\sum t_{V_f}$ Summe der Folgeverspätungen (Wartezeiten im Betrieb)

P_0 Wahrscheinlichkeit, dass die Bedienungsstelle (TFK) leer ist

P_b Summe der Behinderungszeiten

$\sum t_W$ Summe der Wartezeiten

m Anzahl der Zugfamilien (Modellzüge)

N Gesamte Anzahl der Züge bzw. der Zugfolgefälle

N_g Anzahl der gleichrangigen Zugfolgefälle

N_v Anzahl der nichtgleichrangigen Zugfolgefälle

N_k Anzahl aller Fahrten im Gesamtfahrstraßenknoten

Bezeichnungen aus der Bedienungstheorie

t_A Zufallsgröße Ankunftsabstand

t_B Zufallsgröße Bedienungszeit

λ Ankunftsrate

μ Bedienungsrate

V_{tA} Variationskoeffizient der Ankunftsabstände

V_{tB} Variationskoeffizient der Bedienungszeiten

ρ Belegungsgrad (Verkehrsdichte, Verkehrswert)

Alle Zeiten haben die Dimension Minuten.

1 Leistungsuntersuchungen von Eisenbahnanlagen

In den letzten Jahrzehnten ist eine Vielzahl von Modellen zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit und der Betriebsqualität von Eisenbahnanlagen (Strecken, Fahrstraßenknoten, Gleisgruppen usw.) in der Fachliteratur behandelt worden. Maßgebliche Einflussgrößen auf Leistungsfähigkeit der Eisenbahnbetriebssysteme sind planmäßige Wartezeiten und Wartezeiten im Betrieb, für deren Ermittlung zahlreiche EDV-Anwendungen entwickelt worden sind und bei der Deutschen Bahn AG und in anderen Unternehmen eingesetzt werden. Solche Instrumentarien lassen sich grundsätzlich in zwei wesentliche Modellgruppen einteilen:

- **analytische Modelle:** abstrakte Darstellungen eisenbahnbetrieblicher Prozesse, die auf der Wahrscheinlichkeitstheorie oder der Bedienungstheorie basieren,
- **Simulationsmodelle:** Imitation aller einzelnen Prozesse mit statistischer Auswertung von Ergebnissen. Eine Simulation erfolgt synchron (in Zeitschritten) oder asynchron (hierarchisch).

Allgemeine Anwendungsgebiete für beide Modellgruppen sind:

1. Analyse und Ursachenerkennung von Verspätungen in bereits stattgefundenen Betriebsabläufen, die in ihrer zeitlichen Lage und Dauer einzeln erfasst und bewertet werden. Als Ergebnis dieser Bewertung werden zur Verbesserung des gültigen oder geplanten Fahrplangefüges die Zugtrassen u.a. zeitlich konstruktiv variiert und zusammengesetzt.
2. Auswertung der zukünftig möglichen fahrplan- und betriebstechnologischen Prozessabläufe, die zweckmäßigerweise mathematisch in deterministischer oder stochastischer Form beschrieben werden.

Dementsprechend werden in den Dienstschriften der DB AG [13] die Hauptaufgaben der Kapazitätsberechnungen für Eisenbahnanlagen wie folgt definiert:

1. Bemessung der Infrastruktur zwecks Ermittlung der Größe und der Gestaltung von Betriebsanlagen,
2. Erstellung von fahrplan- und betriebstechnologischen Studien zur Überprüfung der Fahrplanprogramme und Quantifizierung der Betriebsqualitäten.

1.1 Entwicklung der Modellierung im Verkehrswesen

Solange es Verkehrsmittel gibt, stellen sich folgende Fragen:

- Welche Qualität und -sicherheit können sie gewährleisten?
- Von welchen Einwirkungen werden diese beeinflusst?
- Mit welchen Maßnahmen kann die höchste Leistung erbracht werden?

Um solche Probleme zu lösen und ein optimales Ergebnis erzielen zu können, ergab sich schon mit der Gründung erster Verkehrsunternehmen im 19. Jh. die Notwendigkeit, Transportprozesse nach bestimmten Regeln, Normen oder Vorschriften durchzuführen.

Jahrzehnte später, kurz nach dem Bau der ersten Eisenbahnen in den USA und Europa, sicherte sich dieses neue Transportmittel eine führende Stellung, und das Verkehrswesen als Wissenschaftsdisziplin erhielt seitdem wesentliche Impulse von diesem Verkehrszweig. Allerdings hat man damals noch keine abstrakten Untersuchungsmodelle benötigt und sah die Ursachen für auftretende Betriebsschwierigkeiten ausschließlich in einem mangelhaften Ausbau der Eisenbahnanlagen oder einem zu geringen Fahrzeugpark.

Mit dem rapiden Industriefortschritt mussten zwangsläufig neue Methoden entwickelt werden, um innere Gesetzmäßigkeiten der Transportprozesse aufzuklären. In den 20er Jahren des 20. Jh. wurden großflächig sogenannte Bahnhofsdurchleuchtungen durchgeführt, die eine sehr detaillierte Abbildung der einzelnen Prozesse auf einem Bahnhof oder einer Strecke erlaubten [31]. Beobachtungen der Zeitaufwände für Handlungen und Bewegungen einer Bahnanlage lieferten Arbeitsübersichten für einzelne Vorgänge und eine Betriebsübersicht der gesamten Anlage. Die Betriebsübersicht lieferte eine anschauliche Darstellung, da alle Vorgänge nach Art, Ort, Zeitlage und Dauer in einem Bild zusammengefasst waren. So konnte man u.a. feststellen, welche zeitliche Anordnung der Abläufe am vorteilhaftesten waren. Betriebsdurchleuchtungen waren dennoch wenig zur Prüfung der Realisierbarkeit wechselnder Prozessbedingungen geeignet und konnten nur vergleichsweise elementare Prozesssituationen beurteilen.

Als mit den Arbeits- und Zeitstudien begonnen wurde, hatte schon die Entwicklung von Methoden eingesetzt, bei denen Gesetze der Mechanik auf die Fahrzeugbewegungen in Bahnhöfen angewendet wurden. Sie verfolgten ebenfalls das Ziel, Leistung und Wirtschaftlichkeit des Eisenbahnbetriebes zu erhöhen, und wurden vorwiegend bei der Untersuchung von Ablaufanlagen eingesetzt. Die Notwendigkeit, auch andere Bewegungen auf den Gleisanlagen der Berechnung zugänglich zu machen, führte zur Erweiterung der Ablaufdynamik hin zur Fahrdynamik – ein revolutionärer Schritt in der Entwicklung nicht nur eisenbahnbetrieblicher, sondern aller Verkehrsmodelle mit dynamischen Prozessen. W. MÜLLER, der 1926 seine erste graphische Fahrzeitermittlung veröffentlichte, in der die Fahrzeiten unmittelbar in die Gleispläne eingetragen wurden, und als erster das Zeit-Weg-Diagramm für eisenbahnbetriebswissenschaftliche Untersuchungen verwendet hat, gilt als Gründer der modernen Eisenbahnbetriebslehre [32].

Seit den Anfängen wurden die konstruktiven fahrdynamischen Methoden konsequent verfeinert, mit den Zielen, das raumzeitliche Neben- und Hintereinander der

Bewegungsvorgänge im Detail abzubilden, Reserven und Betriebsbehinderungen in ihrer zeitlichen und räumlichen Lage zu erkennen, den Verspätungsabbau nachzuweisen u.s.w., mit anderen Worten, durch eine konstruktiv geführte Betriebsuntersuchung einen Durchführbarkeitsbeweis für den Plan zu liefern. Diese Methoden bilden mittlerweile die Grundlage für die rechnergestützten interaktiven dispositiven Systeme im Eisenbahnbetrieb. Die Bewertung der mit konstruktiven Methoden gefundenen Lösungen ist aber aufgrund ihrer deterministischen Natur nur bedingt möglich. BRÜNGER [6] gibt z.B. nur eine Möglichkeit an, den mit seiner rechnerunterstützten Feinkonstruktion erzeugten Fahrplan direkt auszuwerten: Es können die Differenzen zwischen den „Mindestbeförderungszeiten“ und den tatsächlichen planmäßigen Fahrzeiten, die er als „Wartezeiten im Fahrplan“ bezeichnet, errechnet werden. Die Abschätzung der Empfindlichkeit des Fahrplans, seiner Fahrzeitreserven und der Konsequenzen von möglichen Fahrplanabweichungen im Betriebsablauf, überlässt BRÜNGER anderen verkehrswissenschaftlichen Modellen und Methoden.

Die prognostischen Aufgaben können erst durch eine stochastische Betrachtung der zufällig auftretenden Ereignisse gelöst werden. Schwankungen und Störungen, nichtkonstante zeitliche und räumliche Abstände charakterisieren fast alle dynamische Systeme und Prozesse. Im System Eisenbahn unterliegen die Fahrzeiten, die Zugfolgeabstände und die Verspätungen dem Einfluss des Zufalls, dessen Berücksichtigung durch die mathematische Behandlung von Zufallsgrößen und Zufallsprozessen erfolgt. Hierzu liefern diverse mathematisch-statistische Modelle brauchbare Abbilder und Hilfsmittel für beschreibende und auch prognostische Aussagen.

Eine wichtige Rolle bei der Entwicklung von stochastischen Betrachtungen in der Eisenbahnbetriebslehre hat der Gründer der „Dresdner Schule“ POTTHOFF gespielt. In den fünf Bänden seiner Verkehrsströmungslehre (u.a. [40]-[42]) hat er die stochastischen Konzepte der Eisenbahnbetriebswissenschaft vielseitig beleuchtet und zahlreiche Richtungen für Weiterentwicklungen vorgegeben.

1.2 Analytisches EDV-System ANKE

Dank der raschen Entwicklung der Rechentechnik wird der Einsatz von Simulationsverfahren für die Leistungsuntersuchungen immer effizienter. Trotzdem lohnt sich in vielen Fällen die analytische Modellierung aufgrund

- der exakten Ortung von Engpässen mit Ermittlung ihrer Stauwirkung,
- der schnellen Ursachenerkennung von Verspätungen bei stattgefundenen Betriebsabläufen,
- der relativ einfacher Handhabung,

- des geringen Verbrauches der Rechnerressourcen,
- und in Anbetracht der Anwendbarkeit für ungenau vorgegebene zukünftig mögliche Betriebsprogramme.

Andererseits wird die Genauigkeit der Aussagen von analytischen Methoden in bestimmten Situationen durch die bei der Modellierung getroffenen Annahmen (z.B. durch akzeptierte Hypothesen über bestimmte Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Zugströme) beeinträchtigt. Außerdem sollte man von analytischen Ansätzen keine Lösungen von konkreten Trassenkonflikten und keine automatische Fahrplanerstellung erwarten, weil dort die Fahrten als abstrakte Massenerscheinungen betrachtet werden.

Das **EDV-System Analytische Netzkapazitätsermittlung (ANKE)**, dessen Konzept in dieser Arbeit behandelt wird, basiert ausschließlich auf der analytischen Modellierung und wurde ursprünglich für die Umsetzung der Software-Werkzeuge aus der SLS-Programmfamilie auf die neue, den modernen Anforderungen der Rechentechnik entsprechende Plattform vorgesehen. Der wesentlich größere Umfang der Untersuchungsbereiche, der spezifische Aufbau der Infrastrukturdatenbanken, sowie die neuesten theoretischen Erkenntnisse der Eisenbahnbetriebswissenschaft stellten an diese Umsetzung derart hohe Anforderungen, dass daraus eine umfangreiche methodische Software entstand, die sowohl in der Forschung als auch in der Praxis Verwendung finden kann. Insofern stellt ANKE das Ergebnis einer langjährigen Entwicklung von wissenschaftlichen Methoden und Werkzeugen zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit und der Betriebsqualität von Eisenbahnanlagen dar und beinhaltet eine Vielzahl neuer Konzepte, Algorithmen, Verfahren und praktischer Lösungen.

In den nachfolgenden Kapiteln werden grundlegende Ideen, theoretische Hintergründe, die Einzelheiten des Modellaufbaus und einige Aspekte der softwaretechnischen Umsetzung des Systems ANKE systematisch angegangen.

Im Kapitel 2 werden die Aufgaben und Anwendungsgebiete der analytischen Modellierung ausführlich beschrieben, eine detaillierte Analyse von existierenden EDV-Werkzeugen für die Leistungsuntersuchungen von Eisenbahnanlagen durchgeführt und die Anforderungen an das neue Softwaresystem formuliert. U.a. wird im Abschnitt 2.5 die Auswahl einer geeigneten EDV – Abbildung der Eisenbahninfrastruktur behandelt. Gegenstand des Kapitels 3 ist die Aufteilung des Eisenbahnnetzes in aus theoretischer und praktischer Sicht geeignete Untersuchungsbereiche. Im Kapitel 4 werden alle für die Implementierung in Frage kommenden analytischen Ansätze vorgestellt, wobei die Unterscheidung und die Aufteilung der maßgebenden Modellkenngrößen – der Warte- und Beförderungszeiten – besonders detailliert analysiert werden. Kapitel 5 beinhaltet Theoretische Grundlagen der Abgrenzung von einstelligen Bedienungssystemen – Teilfahrstraßenknoten auf der Eisenbahninfrastruktur und entsprechende algorithmische

Lösungen. Kapitel 6 stellt das Konzept der Modellfahrten als Forderungenströme dar. Kapitel 7 beschäftigt sich mit der Ermittlung der Mindestzugfolgezeiten – der wichtigsten Eingangsgröße für alle Modelle. Im Kapitel 8 werden die Ansätze für die Untersuchung eines erweiterten Bedienungssystems, des Gesamtfahrtstraßenknotens, untersucht. Weitere bestimmende Faktoren, die Qualitätsvorgaben, werden in Kapitel 9 betrachtet. Abschließend werden im Kapitel 10 einzelne Aspekte der softwaretechnischen Realisierung des Softwaresystems ANKE präsentiert.

2 Problematik der Leistungsuntersuchungen

Da beide Modellklassen – Simulation und analytische Modellierung – durch spezifische Vor- und Nachteile gekennzeichnet sind, muss für jede auf die Praxis orientierte Anwendung gesondert entschieden werden, welches Modell geeignet ist. Analytische Modelle werden in der Regel für langfristige Planung und Bewertung von Bahnanlagen mit globaler Leistungsdarstellung und Simulationsmodelle für die Prüfung des Verhaltens der Anlagen mit konkreten Anforderungen verwendet.

2.1 Aspekte der Modellauswahl

Analytische Verfahren verfolgen den Ansatz, aus gegebenen charakteristischen Werten zur Beschreibung der Infrastruktur und des Betriebsprogramms mit Hilfe der abstrakten mathematischen Modelle Kenngrößen zur Einschätzung der Qualitäten des Systems zu berechnen. Einfache empirische Ansätze (z.B. Bahnhofsdurchleuchtungen) erlauben wenig präzise, aber in vielen Fällen ausreichende Einschätzungen der elementaren Auslastungskenngrößen von Bahnanlagen und waren vor der Einführung der EDV nahezu die einzige Möglichkeit, das Leistungsverhalten der Eisenbahnsysteme zu beschreiben. Komplexere und anspruchsvollere analytische Verfahren für Leistungsuntersuchungen basieren auf den ausgearbeiteten Methoden des Operations Research und sind in der Praxis nur mit EDV- Unterstützung anwendbar. Solche Verfahren liefern aussagekräftigere Kenngrößen wie Erwartungswerte für Wartezeiten und Warteschlangenlängen.

Simulationsverfahren sind vom Ansatz her mit der experimentellen Methode der Naturwissenschaften, die an einem als Datenmodell vorliegenden Abbild der Realität vorgenommen wird, vergleichbar. Die Ergebnisse einer Simulation sind die für eine vorgegebene Belastung charakteristischen Kenngrößen. Mit Simulationsverfahren kann sowohl die reine Fahrplanerstellung mit daraus folgender Ermittlung der planmäßigen Wartezeiten, als auch die Betriebsdurchführung mit zufällig erzeugten Störungen und Abweichungen nachgebildet werden. Während analytische Modelle in der Regel für die Infrastrukturplanung, also noch vor der Trassenerstellung, verwendet werden, eignet sich die Simulation für das Trassenmanagement zur Überprüfung von Konfliktfällen und zur Feinoptimierung der Infrastruktur. Als bedeutendste Qualitätsmaßstäbe gelten für beide Modellgruppen zulässige Fahrtenanzahlen bzw. Wartezeiten im Fahrplan und Folgeverspätungen.

Mit einer Simulation ist zwar die genaue Verifizierung der Bemessung durch konkrete Belegungen möglich, statistisch gesicherte Ergebnisse lassen sich jedoch nur mit einem erheblichen Zeitaufwand erreichen, was besonders die Untersuchung von großen Eisenbahnnetzen erschwert. Analytische Methoden liefern dagegen mit relativ geringem Aufwand wahrscheinlichkeits-theoretisch abgesicherte Ergebnisse,

deren Genauigkeit von einer Reihe von Annahmen beim Übergang zur abstrakten Darstellung beeinträchtigt wird. Ein weiterer wichtiger Vorteil der analytischen Modelle ist die bereits genannte Fähigkeit, Stauerscheinungen genau zu orten und die Wirkung von unterschiedlichen Entlastungsmaßnahmen prüfen zu können.

Mit den Hilfsmitteln der Bedienungstheorie, die den Kern der analytischen Modellierung bilden, ist es unmöglich, über kurzfristige, im operativen Bereich liegende Einzelmaßnahmen zu entscheiden. Gegenstand der bedienungstheoretischen Untersuchungen sind also planbare, prognostizierbare Massenerscheinungen.

2.2 Kenngrößen

Die Eingangsdaten für die Leistungsuntersuchungen und deren Ergebnisse sollen als spezifische Kenngrößen in konzentrierter Form Aufschluss über Stärken und Schwächen von Systemen und deren Prozessvorgänge geben. Sie beziehen sich

- auf einen Punkt, einen Abschnitt oder auf das gesamte Eisenbahnnetz (ortsbezogene Kenngrößen),
- auf die Fahrplanerstellung oder die Betriebsdurchführung auf der planmäßig bzw. der im Betrieb tatsächlich verfügbaren Infrastruktur (prozessbezogene Kenngrößen),
- auf die Leistung oder die Qualität des Systems (Kenngrößen des Verhaltens). Leistungskenngrößen charakterisieren die potenziellen Fähigkeiten des Systems, während die Qualitätskenngrößen beurteilen, wie gut ein vorgegebenes Betriebsprogramm ausgeführt werden kann.

2.2.1 Ortsbezogene Kenngrößen

Eine punktbezogene Betrachtung konzentriert sich auf einen Schnitt durch die betriebliche Infrastruktur, eine abschnittbezogene wird durch zwei Messpunkte begrenzt und bezieht sich auf den dazwischenliegenden Strecken- oder Gleisabschnitt. Netzbezogene Kenngrößen beschreiben Sachverhalte im Streckennetz oder in ausgewählten Teilnetzen. Sie beruhen wiederum auf dem Zusammenwirken der punkt- und abschnittbezogenen Sachverhalte innerhalb der Strecken und Bahnhöfe entsprechend ihrer topologischen Einbindung in das Teilnetz. In der Praxis sind vor allem die abschnittbezogenen Kenngrößen von großer Bedeutung, weil sie einerseits erlauben, die Engpässe und die Kapazitätsreserven im Netz eindeutig zu lokalisieren, andererseits im Unterschied zu den punktbezogenen Kenngrößen Einflüsse nahliegender Netzelemente besser berücksichtigen.

2.2.2 Prozessbezogene Kenngrößen

Innerhalb des Planungsprozesses können die Kenngrößen auf einen bekannten Fahrplan oder auf voraussichtliche Fahrpläne bezogen werden. Bei Untersuchungen des tatsächlichen Betriebsablaufes werden die Kenngrößen aus den Daten der Betriebsprozessanalyse ermittelt. Werden voraussichtliche Betriebsabläufe betrachtet, haben die Kenngrößen ebenfalls einen „voraussichtlichen“ Charakter. Die Unterscheidung zwischen den Fahrplan- und Betriebskenngrößen basiert auf dem spezifischen Aufbau beider Prozesse und unterschiedlichen Randbedingungen im System: Bei der typischen asynchronen Fahrplankonstruktion werden die bestellten Trassen in der Reihenfolge ihrer Rangordnungen unabhängig von den konkreten Zeitpunkten angelegt und die durch Sperrzeitenüberschneidung entstehenden Konflikte beseitigt. Im Betriebsablauf unterliegt ein vorgegebener konfliktfreier Fahrplan zufälligen Störungen und Abweichungen, welche die Verspätungen und als Folge neue Trassenkonflikte hervorrufen, die im Betrieb operativ gelöst werden müssen.

2.2.3 Leistungskenngrößen

Die Leistungskenngrößen beschreiben das Vermögen eines Eisenbahnbetriebssystems, Trassenbestellungen im Fahrplan zu realisieren bzw. Zugfahrprozesse während des Betriebsablaufes zu beherrschen. An das Eisenbahnbetriebssystem werden bestimmte Leistungsanforderungen gestellt, die sich in der Regel auf die Anzahl von Zugbewegungen je Betrachtungszeitraum beziehen.

Als **Leistungsfähigkeit** wird die Fähigkeit eines Eisenbahnbetriebssystems verstanden, eine bestimmte Anzahl von Zugtrassen im Untersuchungszeitraum technisch gesichert bei voller Nutzung der zulässigen Fahrmöglichkeiten durchzuführen. Die Leistungsfähigkeit entspricht der oberen Grenze des fahrplan- und betriebstechnologischen Leistungsbereichs. Sie kann in der Praxis nicht erreicht werden, weil die Wartezeiten in diesem Fall gegen unendlich anwachsen würden. Dies bedeutet allerdings nicht, dass die Abläufe im System vollständig zum Stillstand kommen, sondern, dass sich eine Warteschlange aufbaut, die im dauernd überlasteten System nicht mehr abgebaut werden kann.

Die **Fahrplanleistung** entspricht der Anzahl der Zugtrassen je Betrachtungszeitraum, die fahrplantechnologisch auf der planmäßig verfügbaren Infrastruktur eingelegt werden können. Zu den fahrplantechnologischen Bedingungen zählen u.a. Zugreihenfolge, Reservezeitanteile (z.B. Regel- und Bauzuschläge, Pufferzeiten) und die nicht nutzbaren Zeitlücken, die infolge von Vertaktung, der zeitlichen Bindungen zwischen Zugfahrten oder asynchronem Einlegen der Zugtrassen entstehen. Aus diesen Gründen fällt die Fahrplanleistung in der Regel etwas geringer aus als die Leistungsfähigkeit.

Die **Betriebsleistung** ist die Anzahl der Fahrten, die auf der tatsächlich verfügbaren Infrastruktur stattgefunden haben bzw. voraussichtlich stattfinden. Für die Betriebsleistung ist das tatsächlich verkehrende Zuggefüge unter den Einflüssen der zufällig auftretenden Störungen und Abweichungen und eventuell unter der Auslassung von Reservezeitanteilen aus dem Fahrplan ausschlaggebend.

Die Kenngröße **Nennleistung** charakterisiert die technologische Rückwirkung aus dem voraussichtlichen Betriebsablauf auf die Fahrplanerstellung. Die Nennleistung entspricht der Anzahl von Zügen, die auf der planmäßig verfügbaren Infrastruktur bei vorgegebener Fahrplanstruktur während des voraussichtlichen Betriebsablaufs mit einer befriedigenden (marktgerechten) Betriebsqualität verkehren können. Sie verbindet die Leistungskenngrößen mit den Qualitätsvorgaben und stellt eine Systemcharakteristik dar, die im Gegenteil zu der Leistungsfähigkeit in der Praxis tatsächlich erreichbar ist.

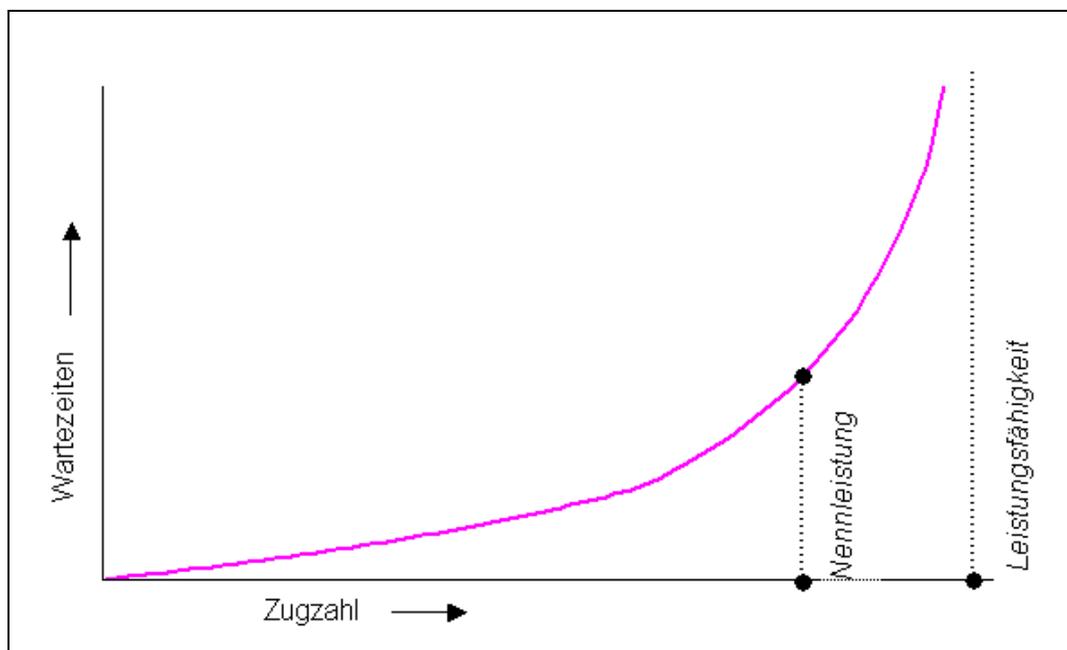


Abbildung 2-1: Leistungsfähigkeit und Nennleistung in der Wartezeitfunktion

Die **Nutzungs-** oder **Belastungsgrade** der Leistungsfähigkeit und der Nennleistung geben an, in welchem Ausmaß die entsprechende Kenngröße genutzt wurde bzw. werden kann. Oft wird der Kehrwert des Auslastungsgrades der Nennleistung, der **Hochrechnungsfaktor**, angegeben, der darüber Aufschluss gibt, um welchen Anteil die geforderte oder die tatsächliche Zuganzahl erhöht oder verringert werden muss, damit die Nennleistung erreicht werden kann. In der Praxis ist der Wert des Belastungsgrades der Leistungsfähigkeit relativ niedrig, er liegt im Durchschnitt zwischen 0,4 und 0,6.

Der **Engpass** eines Netzelementes und damit Verursacher von Stauerscheinungen ist der Abschnitt mit der geringsten Leistungsfähigkeit. Ein sehr hochbelastetes Netzelement wird wiederum zum Engpassabschnitt eines Eisenbahnnetzes.

2.2.4 Qualitätskenngrößen

Zeitliche Qualitätskenngrößen beschreiben Aspekte der zeitlichen Beförderungsqualität und damit die Marktfähigkeit der Leistung. Zu den bedeutendsten Qualitätskenngrößen gehören die planmäßige **Beförderungszeit** und die tatsächliche, sowie die voraussichtliche Beförderungszeit bzw. deren Bestandteile.

Entscheidend für die Aussage über die Qualität eines Eisenbahnbetriebssystems sind vor allem die Zeitanteile, die zu der theoretisch realisierbaren Mindestbeförderungszeit aufgrund des Zusammenwirkens der Zugtrassen addiert werden müssen. Dies sind:

- **Planmäßige Wartezeiten** als Halte- und Fahrzeitverlängerungen, die im Fahrplan als Folge der Verdrängung durch früher eingeplante Trassen enthalten sind,
- Außerplanmäßige **Wartezeiten** als Folgeverspätungen, die durch Verspätungsübertragungen infolge von unzureichenden Pufferzeiten auftreten.

Um den möglichen Abweichungen von den im Fahrplan festgelegten Zeitanteilen während des Betriebsgeschehens entgegenzuwirken, werden in die planmäßige Beförderungszeit folgende zusätzliche Zeitreserven eingearbeitet:

- Die **Zugfolge-Pufferzeit** als nicht belegter Zeitraum zwischen den Sperrzeitentreppen zweier aufeinander folgender Züge (um diese Zeitdauer könnte ein vorausfahrender Zug verspätet sein, ohne den nachfolgenden Zug zu behindern) und
- die **Übergangs-Pufferzeit** als ein freier Zeitraum nach der Mindestübergangszeit zwischen zwei Zugfahrten, um die eventuelle Verspätung des Zubringerzuges nicht auf den Abbringerzug zu übertragen.

Eine ausführliche Analyse der Beförderungszeitanteile ist im Abschnitt 4.4 enthalten.

Zwei weitere wichtige Qualitätskenngrößen – die planmäßige (außerplanmäßige oder voraussichtliche) **Warteschlangenlänge** und die **Wartewahrscheinlichkeit** – sind aus der Warteschlangentheorie übernommen worden. An Behinderungspunkten reihen sich die Züge in die Warteschlangen ein. Warteschlangen können während des Planungs- und Betriebsablaufprozesses eintreten, führen zu Wartezeiten und verursachen Engpasserscheinungen. Um statistisch gesicherte Aussagen zu einzelnen Behinderungspunkten zu erhalten, wird in der Regel der Erwartungswert der Warteschlangenlänge – die mittlere Warteschlangenlänge – verwendet. Sie entspricht der Anzahl der Zugtrassen bzw. der Züge, die durchschnittlich vor dem Behinderungspunkt warten müssen. Die Wartewahrscheinlichkeit (Warterisiko) ist der Anteil der Züge, die infolge der Behinderungen (bei der Fahrplanerstellung oder im Betriebsablauf) an einem oder mehreren Messpunkten in Warteschlangen warten müssen.

Die Qualitäten des Eisenbahnbetriebssystems können bei gleichen Warteschlangenlängen und Wartewahrscheinlichkeiten abhängig von der Fahrplanstruktur unterschiedlich ausgewertet werden. Beispielsweise dürfen die Verspätungen einer Größenordnung im Fern- und Nahverkehr nicht gleich bewertet werden, weil dem Fernverkehr wegen der weiten Laufwege der Züge Priorität zuerkannt werden muss. Aussagekräftiger sind deshalb die Nutzungsgrade aus zeitlichen Qualitätskenngrößen, die durch den Bezug auf andere Größen oder auf bestimmte ableitbare Kriterien gebildet werden.

Der elementarste Nutzungsgrad ist der **Belegungsgrad** – der zeitliche Anteil, in dem der zu untersuchende Infrastrukturabschnitt innerhalb eines Betrachtungszeitraumes belegt ist. Der Belegungsgrad gibt an, inwiefern die theoretische Gesamtbelegungszeit des Betrachtungszeitraumes genutzt wird.

Der **Beförderungszeitgrad** (Beförderungszeitquotient) macht Aussagen über die Ausnutzung der Beförderungszeit und deren Veränderung infolge von Einflüssen bei der Fahrplankonstruktion oder im Betriebsgeschehen. Dementsprechend unterscheidet man

- den **Beförderungszeitgrad** Fahrplan als Quotient aus planmäßiger Beförderungszeit und der Regelbeförderungszeit und
- den **Beförderungszeitgrad** Betrieb als Quotient aus tatsächlicher und planmäßiger Beförderungszeit.

Um die Warteschlangenlängen qualitativ zu beurteilen, werden empirische Ansätze für die Schätzung der Qualitätsvorgaben abhängig vom jeweiligen Betriebsprogramm angewendet. Diese Verfahren werden im Kapitel 9 erläutert. Sie liefern zulässige, d.h. für eine wirtschaftliche Ausnutzung optimale, Warteschlangenlängen für den Fahrplan- bzw. den Betriebszustand.

Der **Qualitätsfaktor** ist der Quotient aus der tatsächlichen und der vorgegebenen zulässigen Warteschlangenlänge. Die Wertebereiche, in denen der Qualitätsfaktor q_{LW} liegt, und Ihre Auslegung sind in Tabelle 2-1 zusammengefasst.

$q_{LW} = 0$	Trivialfall, es finden keine Fahrten in der Eisenbahnanlage statt
$0 < q_{LW} < 0,5$	Das Eisenbahnbetriebssystem ist unterbelastet und verfügt über große Kapazitätsreserven
$0,5 < q_{LW} < 1$	Es sind noch Kapazitätsreserven vorhanden
$q_{LW} \approx 1$	Das System ist aus wirtschaftlicher Sicht optimal ausgelastet
$1 < q_{LW} < 1,5$	Die Überlastung hält sich in den zulässigen Grenzen
$q_{LW} > 1,5$	Die Anlage ist überlastet und stellt einen Systemengpass dar

Tabelle 2-1: Wertebereiche des Qualitätsfaktors q_{LW}

In [13] sind genaue Definitionen aller Leistungs- und Qualitätskenngrößen sowie eine Übersicht über die Formelzeichen für Kapazitätsbetrachtungen enthalten.

2.3 Analyse der vorhandenen EDV-Werkzeuge

Eine Reihe von unterschiedlichen EDV-Anwendungen für die Infrastrukturplanung von Strecken, Knoten und zur Fahrplanauswertung entstand in den letzten zwei Jahrzehnten. Die in diesem Abschnitt folgende Systematisierung und kurze Analyse der bekanntesten Werkzeuge soll nicht als Kritik dieser Softwareprodukte oder eine Unterbewertung ihrer Eignung und Funktionalität angesehen werden. Es ist vielmehr ein Versuch, die Vorteile dieser Anwendungen und wertvolle Erfahrungen ihrer Entwickler für ein neues EDV-System nutzbar zu machen.

2.3.1 Aufgliederung der Verfahren

Abbildung 2-2 zeigt eine prinzipielle Aufgliederung der Verfahren für die Leistungsuntersuchungen der Eisenbahnbetriebssysteme. Wie bereits im Kapitel 1 erwähnt, bilden analytische und simulative Verfahren zwei Kernbereiche der stochastischen Modellierung.

Analytische Verfahren werden in weitere zwei Gruppen unterteilt, die unterschiedliche, vom Verwendungszweck bestimmte, theoretische Hintergründe aufweisen. So wird der **bedienungstheoretische** Ansatz in der Regel für die Berechnung von Kenngrößen im Fahrplanzustand verwendet. Der **wahrscheinlichkeitstheoretische** Ansatz bezieht sich hingegen auf die Ermittlung von Folgeverspätungen und anderen Charakteristika der Betriebsdurchführung. Theoretische Grundlagen dieser beiden Ansätze werden im Kapitel 4 näher beschrieben.

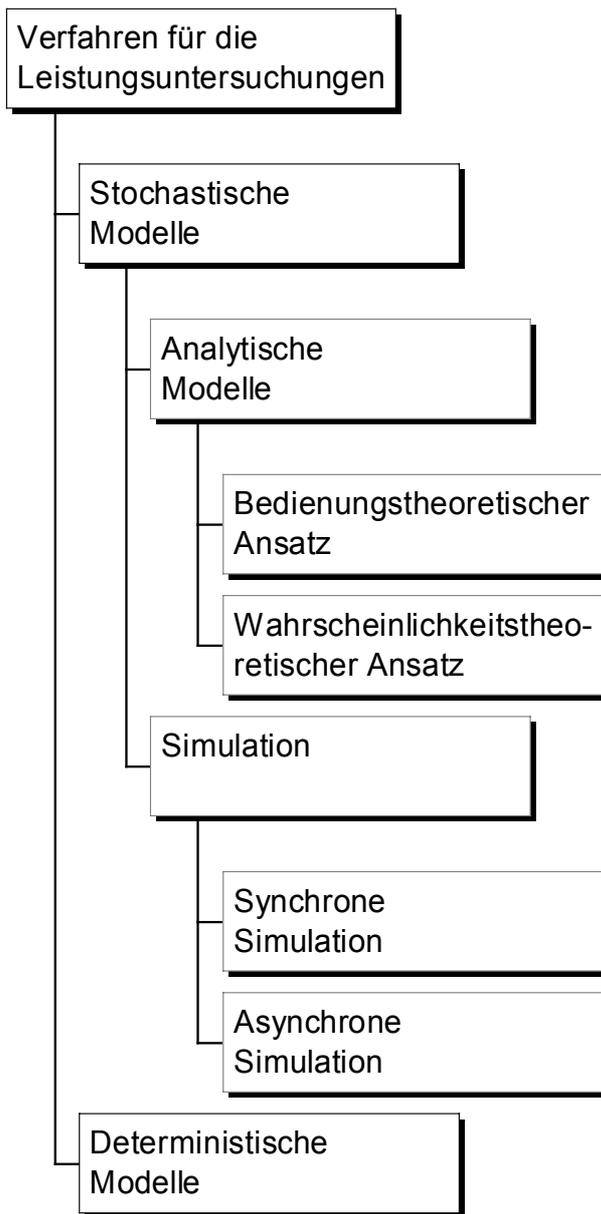


Abbildung 2-2: Aufgliederung der Verfahren für die Leistungsuntersuchungen

Die Simulationsverfahren lassen sich ebenfalls hinsichtlich der dabei angewandten Strategie in zwei Klassen einteilen:

Asynchrone Simulation beinhaltet eine getrennte Untersuchung der Phasen Fahrplanerstellung und Betriebsdurchführung. Bei der Simulation der Fahrplankonstruktion werden die Trassen nach ihrer Rangordnung stufenweise in einen Fahrplan eingelegt. Im Betriebsablauf wird mit Berücksichtigung von zufällig generierten Störungen ebenfalls ein neuer Fahrplan asynchron hergestellt.

Synchrone Simulation bedeutet eine unmittelbare Nachbildung der zeitsynchron ablaufenden Prozesse. Mit der synchronen Simulation lässt sich nur der Betriebsablauf, aber auch nur bedingt, abbilden. Obwohl die synchrone Vorgehensweise sehr nah an die realen Prozessvorgänge heranreicht, ist damit die Systemübersicht, wie sie in einer Betriebszentrale vorhanden ist, kaum modellierbar.

Die zur Zeit vorhandenen EDV-Anwendungen für die Leistungsuntersuchungen in der Eisenbahn sind auf verschiedene Kunden ausgerichtet. Sie wurden für mehrere Anwendungsgebiete konzipiert, weisen unterschiedliche Systemeigenschaften auf und sind in der Regel nicht miteinander kompatibel. Dennoch lassen sich alle Softwareprodukte dieser Art in zwei oben aufgeführte Verfahrensgruppen unterteilen. Eine Übersicht über die bekanntesten Simulations- und analytischen Softwaresysteme ist in Tabelle 2-2 dargestellt.

Software	Methode	Modelleigenschaften	Ergebnisse	Anwendungsgebiete
STRELE (SLS)	analytisch	Wahrscheinlichkeitstheoretischer Ansatz	Zulässige Zuganzahl bei notwendiger mittlerer Pufferzeit in Abhängigkeit von einer zulässigen Folgeverspätung	Infrastrukturplanung von zweigleisigen Strecken
STRESI (SLS)	Simulationsmodell	Asynchrone Simulation zur Erzeugung eines konfliktfreien Fahrplans	Zulässige Zuganzahl in Abhängigkeit von der planmäßigen und außerplanmäßigen Wartezeit	Infrastrukturplanung von zweigleisigen Strecken
ALFA (SLS)	analytisch	Bedienungs- und wahrscheinlichkeitstheoretische Ansätze	Zulässige Zuganzahl in Abhängigkeit von der Warteschlangenlänge	Infrastrukturplanung von Fahrstraßenknoten
PC-Engpaß	analytisch	Bedienungstheoretischer Ansatz	Engpässe auf der Strecke in Form von Zugmeldeabschnitten	Infrastrukturplanung von SLS-Strecken
Gleise	analytisch	Bedienungstheoretischer Ansatz	Zulässige Zuganzahl in Abhängigkeit von der mittleren Warteschlangenlänge	Infrastrukturplanung von Gleisgruppen
SABINE	Simulationsmodell	Synchrone Simulation	Durchführbarkeit des Betriebes	Überprüfung der Betriebsprogramme
UX-SIMU, SIMU VII, SIMU ++	Simulationsmodell	Synchrone Simulation	Überprüfung auf Konfliktfreiheit des Fahrplans und Bewertung der Höhe und der Verteilung von Zeitreserven	Trassenmanagement: Überprüfung von Konfliktfällen eines aktuellen und genau vorgegebenen Fahrplans
RUT-0 FAKTUS	analytisch	Deterministische Fahrplankonstruktion	Detaillierter Fahrplan, Beförderungszeitenanteile	Trassenmanagement: Erstellung der Jahresfahrpläne
PIN	analytisch	Bedienungs- und wahrscheinlichkeitstheoretische Ansätze	Optimale Zugströme im gesamten Eisenbahnnetz	Globale Netzplanung

Tabelle 2-2: Softwarewerkzeuge für die Leistungsuntersuchungen in der Eisenbahn

2.3.2 Eigenschaften einzelner Softwaresysteme

Die drei Programmpakete der **SLS**-Programmfamilie (Strecken - Leistungsfähigkeitsberechnung und Simulation) wurden Mitte 80-er Jahre am Verkehrswissenschaftlichen Institut (VIA) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen entwickelt und zählen längst zu den Standardwerkzeugen für die Leistungsuntersuchungen der Deutschen Bahn AG. SLS-Programme sind Einplatz-PC-Anwendungen für das Betriebssystem DOS mit gemeinsam nutzbaren Infrastruktur- und Modellzugdaten.

Mit dem Programmpaket **STRELE** (Streckenleistungsfähigkeit) wird die Leistungsfähigkeit einer Strecke in Anlehnung an die Richtlinie DS 405 [8] der Deutschen Bundesbahn (Ausgabe 1976) ermittelt. Mit Hilfe von Matrizen der Mindestzugfolgezeiten und der Fahrtenfolgefälle sowie des Verspätungsniveaus der einzelnen Modellzüge werden die Pufferzeiten nach dem wahrscheinlichkeitstheoretischen Verfahren von SCHWANHÄUßER [47] so bemessen, dass eine befriedigende Betriebsqualität, die sich an einer zulässigen Summe der Folgeverspätungen orientiert, eingehalten wird.

Im Programm **STRESI** (Streckensimulation) werden die Fahrplanerstellung und der Betrieb auf einer zweigleisigen Strecke simuliert. Die Zugtrassen werden bei der Simulation in der gewünschten oder zufällig ermittelten Lage eingelegt. Falls sich mit den Belegungen der zuvor eingelegten Fahrten Überschneidungen ergeben, werden Überholungshalte eingefügt. Bei der nachfolgenden Betriebssimulation werden zufällige Verspätungen eingespielt und ihre Auswirkungen berechnet, wobei die Rangordnung der Fahrten durch die asynchrone Vorgehensweise exakt eingehalten wird.

ALFA (Analytische Leistungsfähigkeitsermittlung der Fahrstraßenknoten) dient der eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Untersuchung von Fahrstraßenknoten (Abzweigstellen oder Bahnhofsköpfen). Durch Fahrwegausschlüsse entstehen darin Wartezeiten, die in zurückliegenden Wartepositionen zu Standzeiten der Züge führen. Dabei wird zwischen planmäßigen Wartezeiten (Beförderungszeitanteilen infolge der asynchronen Fahrplankonstruktion) und außerplanmäßigen Wartezeiten (Folgeverspätungen) unterschieden. In ALFA werden planmäßige Wartezeiten nach dem bedienungstheoretischen Ansatz von WAKOB [63] und die Wartezeiten im Betrieb wiederum nach dem wahrscheinlichkeitstheoretischen Verfahren von SCHWANHÄUßER [47] ermittelt und mit bestimmten Qualitätsvorgaben verglichen. Durch Hochrechnung an die Leistungsfähigkeitsgrenzen ergeben sich Faktoren, die die Kapazitätsreserve oder Überlastung für den Fahrstraßenknoten oder seiner Teile ausweisen.

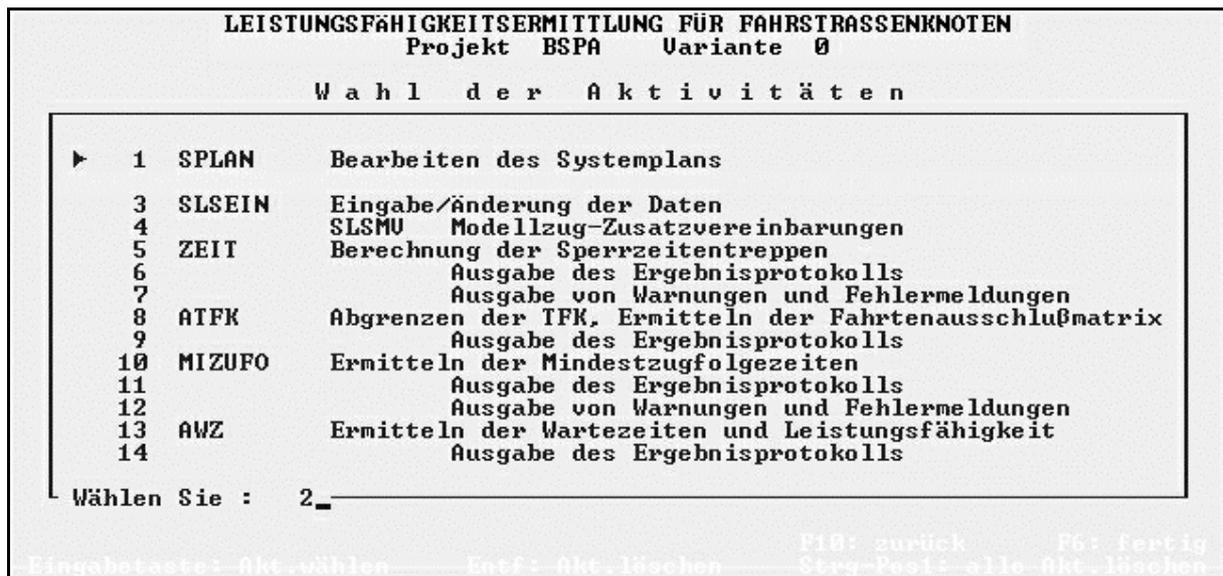


Abbildung 2-5: Benutzerinterface der SLS – Programme (hier das ALFA-Hauptmenü)

Die SLS – Programme werden immer noch bei zahlreichen Infrastrukturplanungen und Fahrplanuntersuchungen der DB AG eingesetzt. Die Software wird ständig gewartet und überarbeitet. Durch die eingeschränkten Plattformfähigkeiten sind die Verwendbarkeit und die Möglichkeiten der Weiterentwicklung jedoch begrenzt: Während die SLS-Funktionalität die Betrachtung von sehr großen Eisenbahnknoten wie Rosenheim und Stuttgart erlaubt, unterliegt die Benutzerschnittstelle des Betriebssystems DOS vielen Einschränkungen. Textuelle Umgebung bewirkt umständliche Programmsteuerung, die zwar eine kontrollierte und einfache Dateneingabe erlaubt, aber sehr gewöhnungsbedürftig ist. Grafische Unterstützung ist unzureichend, die Verbindung der Infrastrukturdaten mit ihrer grafischen Darstellung ist nicht immer eindeutig. Einige Bearbeitungsmodule wurden in SLS nachträglich eingebaut und passen nicht immer ins logische Gesamtsystemkonzept. In vielen Situationen sind besondere Handlungsweisen erforderlich, die nicht dokumentiert sind. Ein Online-Hilfesystem ist in SLS nicht vorhanden. Die durch genannte Nachteile beeinflusste Programmsteuerung erlaubt nicht immer eine gute Übersicht über die umfangreichen Datenbestände und erschwert gegebenenfalls die Fehlersuche.

Auch die Datenhaltung von SLS ist nicht zeitgemäß: sowohl die Infrastruktur- als auch die Zugdaten werden im ASCII-Format gespeichert. Dies erleichtert einerseits die Programmierung von Schnittstellen zu anderen Softwareprodukten, erlaubt jedoch einen externen Datenzugriff (nicht aus der SLS-Umgebung), welcher die Systemsicherheit und -stabilität beeinträchtigt, und bleibt zudem äußerst unflexibel bei Anpassungen und Änderungen im Datenstruktur. Außerdem sind der Dateninhalt und die Kompatibilität der Datenformate innerhalb von SLS unvollständig, weil z.B. in ALFA die besser ausgearbeitete Infrastruktur der Knotenpunktbahnhöfe an die vereinfachten Strecken nachträglich angeknüpft wird.

Ferner sind die wissenschaftlichen Modelle, welche die theoretische Grundlage für ALFA und STRELE bilden, inzwischen überarbeitet und weiter ausgebaut worden. Dies betrifft sowohl den Wahrscheinlichkeitstheoretischen Ansatz von SCHWANHÄÜßER als auch die bedienungstheoretische Näherungslösung von WAKOB. Einzelheiten dieser Entwicklungen in der Eisenbahnbetriebswissenschaft sind im Kapitel 4 beschrieben. Ein weiterer Schwachpunkt des SLS-Systems ist die eingeschränkte Dimensionierungsmöglichkeit von Eisenbahnbetriebsanlagen: Mit STRELE, STRESI und ALFA kann höchstens ein Streckenabschnitt bzw. ein Knotenpunktbereich abgebildet und untersucht werden, so dass die Zusammenhänge zwischen einzelnen Netzelementen nur innerhalb dieser begrenzten Bereiche nachvollziehbar sind. Für eine einigermaßen realistische Darstellung der Fahrplankonstruktion und der Betriebsdurchführung ist jedoch die Betrachtung größerer Netzteile erforderlich.

Die gleichen kritischen Überlegungen treffen auch auf das Programm **PC-ENGPAB**, eine Entwicklung der Dresdner Hochschule für Verkehrswesen, zu. PC-ENGPAB baut vollständig auf den STRELE-Daten auf und liefert detaillierte Informationen zu den überlasteten Streckenabschnitts-Engpässen.

Einen anderen sehr spezifischen Zweck erfüllt das von SCHWANHÄÜßER entwickelte Programm **GLEISE**. Es ist für die Berechnung der erforderlichen Gleisanzahl von Gleisanlagen bestimmt und basiert auf einem Warteschlangenmodell für mehrstellige Bedienungssysteme. An sich benötigen solche Kalkulationen keinen Ausbau der Untersuchungsgebiete, weil für sie nur die Struktur der Gleisverbindungen und die Haltezeiten von größter Bedeutung sind. Die Unzulänglichkeiten der bescheidenen DOS-Umgebung sind dennoch auch für GLEISE zutreffend.

SABINE (Simulation und Auswertung des Betriebsablaufs In Netz) ist ein Bestandteil des Simulationssystems DIOGENES der Gesellschaft für Steuerungs- und Informationssysteme (GSI) mbH Berlin. SABINE arbeitet auf der Basis höherer zeitbewerteter Petri-Netze und dient der Abbildung von Zugfahrten in großen Eisenbahnnetzen. Mit Hilfe von Strukturen und Daten zur Beschreibung der Elemente des Eisenbahnnetzes, der Betriebstechnologie im Netz, sowie der Züge mit ihren Laufwegen und Fahrzeiten, wird die zeitliche Auslastung der Ressourcen des Eisenbahnnetzes nachgebildet. Die besondere Stärke von SABINE besteht darin, dass große, stark verkettete Netze komplett erfasst werden, und damit die Wechselwirkungen zwischen voneinander entfernten, scheinbar unabhängigen Netzelementen verdeutlicht werden. Als Schwächen sind in erster Linie zwei Modelleigenschaften zu nennen: Die außerordentlich komplexe Logik der Petri-Netze, wodurch komplexere Knotenbereiche nicht genau abgebildet werden können, und die im System verwendete Methode der synchronen Simulation, welche für den einfachen Betriebsablauf zwar geeignet ist, aber die dispositiven Funktionen einer Betriebszentrale nur bedingt nachahmen kann.

Das am Institut für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und -betrieb (IVE) der Universität Hannover entwickelte Softwaresystem **SIMU++** ist sowohl auf einem Standard-PC als auch auf der UNIX-Workstation einsetzbar. SIMU++ und seine Vorgänger UX-SIMU und SIMU VII basieren ebenfalls auf synchronen Simulationsmodellen und werden zur Überprüfung der Konfliktfreiheit des Fahrplans und Bewertung der Höhe und Verteilung von Zeitreserven eingesetzt. Folgeverspätungen werden in SIMU++ auf der Grundlage eines simulierten Fahrplans in Abhängigkeit von der Einbruchsverspätung ermittelt. Das Programm kann im Trassenmanagement zur Überprüfung von Konfliktfällen eines exakt definierten Fahrplans in Knoten und Teilnetzen, sowie zur Feinoptimierung der Infrastruktur angewendet werden. Detaillierte Infrastrukturabbildung, gute grafische Unterstützung, übersichtliche Darstellung von Teilen des Streckennetzes sind unbestritten die Stärken von SIMU++. Dennoch beeinträchtigt die zeitsynchrone Betrachtung der Betriebsabläufe auch in SIMU++ eine korrekte Abschätzung der Auslastung von Bahnanlagen. Noch umständlicher erscheint deswegen auch eine Automatisierung der von der Natur her asynchronen Fahrplankonstruktion mit SIMU++, es sei denn der Fahrplan wird für geschlossene Bahnsysteme mit absolut homogenen Betriebsprogrammen (d.h. alle Züge sind gleichrangig) erstellt. Demzufolge eignet sich SIMU++ am besten für kleinere Nahverkehrssysteme mit einheitlichem Fahrzeugpark (Stadtbahn, Straßenbahn). Das Programm Railsys soll demnächst die Programme UX-SIMU und SIMU++ als Nachfolgeprodukt ablösen.

Das System **RUT-0** (Rechnerunterstütztes Trassenmanagement) entstand genauso wie die SLS-Programmfamilie am Verkehrswissenschaftlichen Institut der RWTH Aachen. Mit ihm sollte eine automatisierte interaktive Fahrplanerstellung für das gesamte Netz der DB AG ermöglicht werden. Durch eine sehr detaillierte Infrastrukturabbildung, präzise Fahrzeitenermittlung und vollständig automatische Konflikterkennung gestattet RUT-0, unterstützt durch eine standardisierte grafische Benutzeroberfläche von MS-Windows, eine schnelle und fehlerfreie Fahrplanerstellung. Das System besteht in seiner ursprünglichen Form aus zwei Hauptmodulen: **SPURPLAN**, mit dem die Infrastruktur aufgenommen wird, und dem Konstruktionsteil **FAKTUS**. Für die Auswertung der Fahrplanqualität ist in FAKTUS eine einfache Berechnung der Beförderungszeitenanteile integriert. RUT-0 basiert auf einer rein deterministischen Darstellung von Prozessen und eignet sich daher in dieser Form nur für sehr einfache Kapazitätsberechnungen und auf keinem Fall für prognostische Aussagen. Dennoch wäre dieses EDV-System als Grundlage für mögliche Leistungsuntersuchungen sehr gut geeignet, denn

- der interne Aufbau der Infrastruktur von SPURPLAN entspricht den Anforderungen, die mathematische Modelle stellen, so dass die Infrastruktureigenschaften am besten ausgenutzt werden können (für eine detaillierte Analyse der SPURPLAN-Struktur siehe Abschnitt 2.5.2)

- in FAKTUS werden die Zugtrassen in Form von Sperrzeitentreppen wiedergegeben, die auf sehr genauen Fahrzeiten beruhen und im Gegensatz zu einfachen Zeit-Weg-Linien eine exakte Berechnung von Mindestzugfolgezeiten zulassen, welche für analytische Modellierung ausschlaggebend sind
- mit RUT-0 können größere Netzteile bis zu gesamten Eisenbahnnetzen detailgetreu abgebildet werden
- der Quellcode von RUT-0 ist übersichtlich und ausbaufähig und steht dem VIA als einem der Urheber zur Verfügung, so dass aus den Grundkomponenten von RUT-0 weitere Programme entwickelt werden können
- nach einigen Jahren im Einsatz gibt es inzwischen wertvolle praktische Erfahrungen mit RUT-0

Zur Zeit ist eine neue betriebssystemunabhängige auf einer relationalen Datenbank basierende Mehrplatzversion von RUT beim DB-Systemhaus TLC (Transport, Informatik und Logistik Consulting GmbH) in Bearbeitung, durch die die Fähigkeiten von RUT-0 mit Sicherheit noch ausgebaut werden können.

TLC hat 1998 auch einen ersten Versuch unternommen, das gesamte Eisenbahnnetz Deutschlands und dessen Zusammenhänge in einem analytischen Modell zu erfassen. Das Projekt „Pilot Integrierte Netzoptimierung“ (**PIN**) verfolgte das Ziel, die Zugströme auf einer vereinfachten zukünftigen Netzstruktur möglichst optimal umzulegen. Dafür wurden die Belastungen von „Netzkanten“ (Streckenabschnitten) und „Knoten“ (Knotenpunktbahnhöfe mit mindestens drei Zulaufstrecken) mit analytischen Algorithmen, analog zu SLS, ausgewertet und gegebenenfalls als Engpässe identifiziert (Die Knotenbewertung wurde im übrigen mit Hilfe eines Prototypen des Programms ANKE durchgeführt). Unter Berücksichtigung der Angebot-Nachfrage-Verhältnisse wurden danach die Engpässe durch die Umleitung von Zugströmen auf andere Kanten und Knoten iterativ aufgelöst und erneut ausgewertet. Die „Gesamt-Netz“-Betrachtung von PIN stellt zweifelsohne eine Innovation dar, die Ergebnisse des Projektes liefern die Vorgabe für eine grobe Planung der DB-Netzstruktur. Eine vereinfachte Infrastruktur- und Zugfahrtendarstellung, die es eigentlich ermöglicht, alle in einem solch umfangreichen Untersuchungsbereich unbeherrschbaren Datenmengen im Griff zu halten, lässt jedoch keine sehr präzisen und detaillierten Aussagen zu und gibt kaum Spielraum für die Weiterentwicklung und den Ausbau von PIN.

Es ist noch eine Reihe von Softwareentwicklungen zu erwähnen, die sich zur Zeit in der Entwicklung am VIA befinden und für die Leistungsuntersuchungen der Eisenbahn geeignet sind:

- Im Programm **Kapazit** [54] wird versucht, einige innovative Maßstäbe für die Auslastung und die Betriebsqualität von Eisenbahnstrecken zu setzen. Dabei soll das Maximum einer neuartigen Kenngröße, der „Transportkraft“, eine optimale Auslastung der Anlage in der Abhängigkeit von den Wartezeiten indizieren. Die Wahl der funktionellen Darstellung für die Transportkraft und deren Bestandteile (z.B. Beförderungsgeschwindigkeit, Zugmasse) ist im Moment noch nicht abgeschlossen (näheres zur Transportkraft im Abschnitt 9.3).
- Die bisher existierende Laborversion des Programms **VERENA** (Verspätungen im Netz [62]) wertet die Stabilität des Fernverkehrsfahrplanes durch eine ausführliche Analyse der Verspätungsursachen und -fortpflanzung aus. Als Anwendungsmöglichkeiten sind neben der Stabilisierung des Fahrplans eine Optimierung der Baustellenplanung und die Zusammenarbeit mit den Dispositionssystemen und Reisendeninformation vorgesehen.
- **BABSI** (Bahnablaufsimulation, Laborversion) [19] ist auf der Grundlage von RUT-0 aufgebaut. Diese Anwendung simuliert eine komplett asynchrone Trassenvergabe für die RUT-0 Fahrpläne und ermittelt dadurch planmäßige Wartezeiten. Bei der Betriebsabwicklung werden in BABSI zufällige Störungen erzeugt, anhand deren die Stabilität des Betriebes überprüft werden kann. Die für BABSI entwickelten Algorithmen können später für die automatische Trassensuche und -vergabe in RUT verwendet werden.

2.4 Anforderungen an eine umfassende interaktive analytische Netzuntersuchung

Die Anwendung von den meisten in der Tabelle 2-2 aufgeführten Softwaresysteme für die Leistungsuntersuchungen von Eisenbahnanlagen ist wegen der im letzten Abschnitt genannten softwaretechnischen und konzeptuellen Aspekte oft eingeschränkt. Ältere auf DOS basierende Softwarepakete zeichnen sich durch nicht zeitgemäße Benutzerschnittstellen und mangelnde Übersichtlichkeit aus. Sie sind systembedingt auf kleinere Infrastrukturbereiche beschränkt und können daher gegenseitige Einflüsse im gesamten Netz schlecht nachvollziehen. Zudem ist die Datenmodellierung in solchen Systemen wenig flexibel und nicht ausbaufähig.

Modernere Programme versuchen zwar größere Netzbereiche und komplette Eisenbahnnetze zu erfassen, gehen aber oft nicht detailgetreu vor und verlieren so an Genauigkeit. Häufig wird als Grundkonzept die synchrone Simulation verwendet, mit der eine qualitative Aussage über die meisten Fahrplanleistungs- und Qualitätskenngrößen nur eingeschränkt möglich erscheint. Zudem erschweren unterschiedliche Datenformate und -konzepte den Datenaustausch zwischen diesen Systemen und existierenden DB-Datenbanken.

Ausgehend von allen genannten Vor- und Nachteilen existierender EDV-Systeme für die eisenbahnbetriebliche Untersuchungen lassen sich entsprechende Anforderungen an ein neues interaktives Tool für umfassende analytische Netzuntersuchung wie folgt formulieren:

Allgemeine Anforderungen an das EDV-System:

- Möglichkeit der detaillierten Abbildung größerer Netzteile
- grafische Benutzeroberfläche
- Kompatibilität zu den vorhandenen DB-Datenbanken
- Software, die für PC geeignet oder plattformunabhängig ist

Anforderungen an die Anwendung und algorithmische Voraussetzungen:

- weitgehend automatisierte Algorithmen, bedingt durch den Umfang des Untersuchungsraumes
- Verwendung der neuesten Erkenntnisse aus der Eisenbahnbetriebswissenschaft
- Integration verschiedener Methoden für eine gute Netzabdeckung und qualitative Aussagen
- flexible anpassungsfähige Datenmodellierung mit ausreichender Genauigkeit
- vergleichbare Aussagekraft, wie die von Standardwerkzeugen der DB AG (vor allem von den SLS-Programmen)
- benutzerfreundliche Schnittstelle und umfangreicher Informationsfluss
- Datenaustausch mit anderen Anwendungen
- ausreichende Schnelligkeit und Stabilität unter Berücksichtigung der Verfügbarkeit von Rechnerressourcen.

Vor allem wegen der Datenkompatibilität und Detaillierungsgrad ist die Wahl eines geeigneten und möglichst vorhandenen Infrastrukturmodells für die Entwicklung eines neuen Softwaresystems ausschlaggebend. Einige Vorteile, die eine Erweiterung von RUT-0 mit sich bringen könnte, wurden hier bereits genannt. Im nächsten Abschnitt wird ausführlicher auf die Infrastrukturdarstellung von RUT im Vergleich zu anderen Anwendungen eingegangen.

2.5 Auswahl eines Datenmodells für die Infrastruktur-Abbildung

Für analytische Leistungsberechnungen ist in erster Linie der Umfang des Untersuchungsbereiches von einer nicht zu unterschätzenden Bedeutung. Damit der Einfluss von angrenzenden Strecken korrekt bewertet werden kann, muss eine Verknüpfung des zu untersuchenden Abschnitts mit ihnen vorhanden sein. Weiterhin sollen Bahnhöfe, Abzweigstellen und freie Strecken im Infrastrukturmodell erkennbar sein.

Die Modellierung der Infrastruktur soll zum einen unkompliziert und möglichst realitätsnah sein, zum anderen soll sie eindeutige logische Zusammenhänge aufweisen und mathematische Formalisierung erlauben.

Eine exakte Fahrzeitenrechnung ist heute für präzise Modellierung unentbehrlich. Sie erfordert möglichst vollständige Informationen über alle Faktoren, die die Fahrdynamik der Züge beeinflussen können: Entfernungen, Strecken- und Fahrwiderstände (Neigungs-, Bogen- und Tunnelwiderstände), Geschwindigkeitsbegrenzungen, An- und Abfahrtschwindigkeiten in Bahnhöfen, Halteplatzlagen, Bahnsteiglängen usw. Für die Sicherung der Zugfolge und der Fahrweegelemente ist das Signalsystem für das Fahren im festen Raumabstand oder/und der Einbau von Zugbeeinflussungssystemen von entscheidender Bedeutung. Alle technisch gesicherten und von Stellwerken einstellbaren Fahrstraßen innerhalb von Bahnhofsbereichen und Abzweigstellen müssen vom Modell abgebildet werden können.

Im Hinblick auf die Datenstruktur ist die Erweiterbarkeit und Übertragbarkeit von Infrastrukturdaten wünschenswert. Im Interesse einer strengen internen Datenanordnung und einer Minimierung der Datengröße soll die erfasste Infrastruktur möglichst wenig redundant sein. Ferner wird die Kompatibilität zu vorhandenen Infrastrukturdatenbanken für den Einsatz der neuen Software eine bedeutende Rolle spielen. Eine korrekte und übersichtliche visuelle Infrastrukturdarstellung zählt auch zu den Anforderungen an das Infrastrukturmodell.

2.5.1 SLS-Infrastruktur

Die Daten eines STRELE/STRESI-Projektes beziehen sich auf Streckenabschnitte, die in der Regel zwischen Knotenpunktbahnhöfen verlaufen. In einer Streckendatei werden alle für eine Richtung relevanten Infrastrukturdaten gespeichert. Für zweigleisige Strecken müssen zwei Dateien verwaltet werden, so dass bereits kleinere Netzteile nicht zusammenhängend aufgenommen werden können.

Detailliert können in SLS nur die durchgehenden Hauptgleise in den Streckendaten mit allen Infrastrukturmerkmalen beschrieben werden. Die Bahnhöfe werden dagegen sehr vereinfacht dargestellt, was für den ursprünglichen Zweck, die Ermittlung von Folgeverspätungen, ausreichend war und jede detailliertere Bahnhofstruktur zu komplizierteren Variantenberechnungen geführt hätte. Vor allem können in STRELE/STRESI die Positionen der Weichen und der Gleisverknüpfungen nicht definiert und damit Bahnhöfe nicht originalgetreu abgebildet werden.

I N F R A S T R U K T U R A U S G A B E									
Richtung 1 (KDN-KA)									
Hauptbahn									
Üblicher Vorsignalabstand: 1000 m									
lfd. Nr.	Art	km-Ber.	km	Nunmer		Name		Kurzbez.	* * *
1	StrWiderst.	1	36.000			5.348 o/oo			
2	zul. U	1	36.000			220 km/h			
3	Vorsignal	1	36.350	Block 24	Hp	Dr	KDN A		
4	Anf.zulU G1	1	37.550	Gleis 101		40 km/h		KDN	
5	Anf.zulU G1	1	37.550	Gleis 102		60 km/h	außer LZB	KDN	
6	Anf.zulU G1	1	37.550	Gleis 103		80 km/h		KDN	
7	Anf.zulU G1	1	37.550	Gleis 106		80 km/h	außer LZB	KDN	
8	Signal	1	37.550	Block 24	Hp	Dr	KDN A		
9	ZSS	1	37.750	Block 24	Hp	Dr	KDN A		
10	zul. U	1	38.000			200 km/h			
11	Vorsignal	1	38.200	Block 1	Hp	Dr	KDN N1		
12	Fahrstr-ZSS	1	38.550	Gleis 101		9		KDN	
13	Fahrstr-ZSS	1	38.600	Gleis 105		1		KDN	
14	Fahrstr-ZSS	1	38.600	Gleis 199		1		KDN	
15	Fahrstr-ZSS	1	38.650	Gleis 103		3		KDN	

Bild1 - weitere Daten
F9: Ausgabemenü F6, F10: zurück

Abbildung 2-3: SLS - Streckendaten mit vereinfachter Bahnhofsdarstellung¹

Für das später entwickelte Programmpaket ALFA, welches Leistungsuntersuchungen von Fahrstraßenknoten, insbesondere von großen Knotenpunktbahnhöfen ermöglichen sollte, reichte die vereinfachte Modellierung der Bahnhöfe in den STRELE-/STRESI-Daten nicht aus. Deshalb wurde die streckenorientierte Datenerfassung mit schematisch dargestellten Überholungsbahnhöfen um präzisere Fahrwegdaten für Knotenpunktbahnhöfe ergänzt.

I N F R A S T R U K T U R D A T E N						
Strecken und Fahrwege						
ändern kopieren löschen prüfen ausgeben zurück						
Nr.	Art	Bezeichnung	Anfangspunkt	Endpunkt		
1	Strecke	Rechtshausen-A		S1 0-W		
2	Strecke	A-Rechtshausen	S1 W-0			
3	Strecke	A-Endhausen	S2 0-W			
4	Strecke	Endhausen-A		S2 W-0		
5	Strecke	A-Hochdorf	S3 0-W			
6	Strecke	Hochdorf-A		S3 W-0		
101	Fahrweg	S3 - 1	S3 W-0	GLEIS1		
102	Fahrweg	S3 - 2	S3 W-0	GLEIS2		
103	Fahrweg	1 - S3	GLEIS1	S3 0-W		
104	Fahrweg	S1 - 3 - S2	S1 0-W	S2 0-W		
105	Fahrweg	2 - S1	GLEIS2	S1 W-0		
106	Fahrweg	S2 - 4 - S1	S2 W-0	S1 W-0		
107	Fahrweg	S2 - 2	S2 W-0	GLEIS2		

Bild1 - weitere Daten
F6: zurück

Abbildung 2-4: Aufteilung der Infrastruktur in Strecken und Bahnhöfe in ALFA

Die Bahnhofstopologie wird in ALFA als Beschreibung aller Gleise und Weichenverbindungen vorgegeben. Die Fahrtmöglichkeiten werden als Weichenabfolgen erfasst.

¹ Diese und folgende Abbildungen stellen die Ausgabedaten aus einem ALFA-Musterprojekt dar

Diese sogenannten Fahrwege erhalten bestimmte charakteristische Merkmale wie Widerstandswechsel, Signalstandorte, Zugschlussstellen, Geschwindigkeitsangaben, Halteplätze usw. Die Zu- und Ablaufstrecken werden in ALFA an besonderen Übergangspunkten mit Fahrwegen verknüpft. Der Zugverlauf wird aus den Streckenabschnitten und in den Knotenpunktbahnhöfen aus den Fahrwegen gebildet. Obwohl ALFA-Fahrwege oft in Bahnhöfen abschnittsweise parallel verlaufen, müssen die in diesen Abschnitten gleichen Datensätze trotzdem mehrfach erfasst werden (Problem der Datenredundanz).

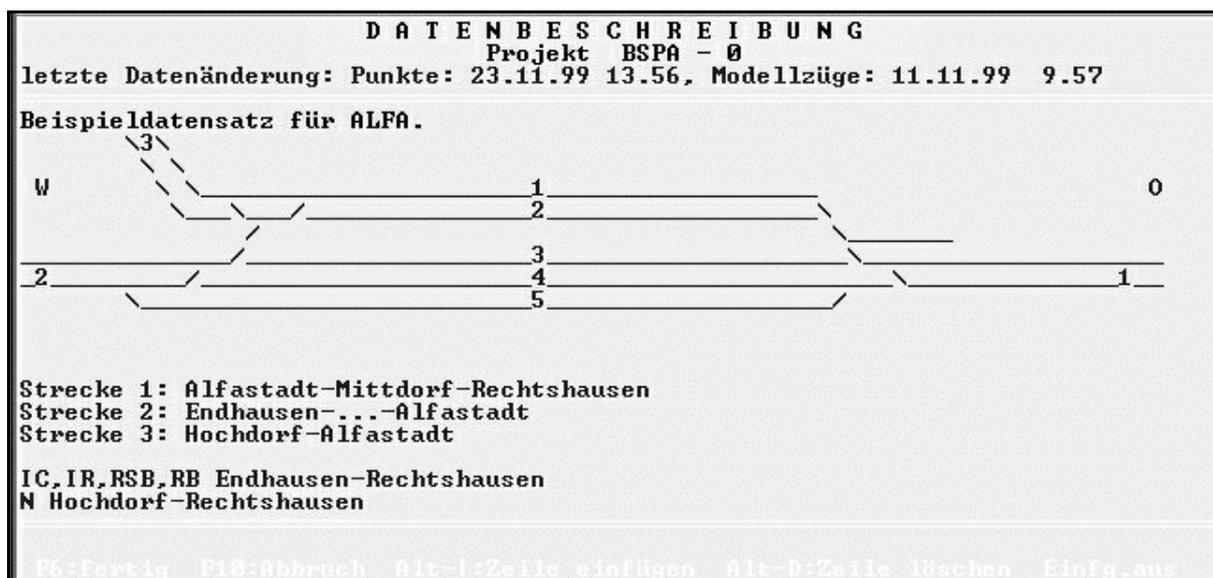


Abbildung 2-5: Schematische Darstellung eines Knotenpunktbahnhofes in ALFA²

Grafische Infrastrukturdarstellung existiert in SLS-Programmen auch in einer vereinfachten Form. In STRELE/STRESI muss sich der Programmbenutzer vollständig auf die textuelle Anzeige wie in Abbildung 2-3 verlassen. In ALFA ist dagegen eine Verknüpfung von Fahrwegdaten mit einem grafischen Systemplan vorgesehen, aber diese Verknüpfung ist nicht zwingend und sieht keine interaktive Dateneingabe direkt im Systemplan vor. So beschränkt man sich oft auch in ALFA-Projekten auf pseudo-grafische Darstellung der Bahnhofsstruktur wie in Abbildung 2-5. Eine fehlende oder unvollständige grafische Übersicht kann die Fehlersuche nach der Leistungsfähigkeitsrechnung, die Analyse der Verspätungsursachen sowie die Lokalisierung von Engpässen beeinträchtigen.

² Dieses Beispiel soll die Visualisierung der Infrastruktur in SLS demonstrieren. Für den Umfang des Untersuchungsbereiches ist es keinesfalls repräsentativ

2.5.2 RUT-0 mit SPURPLAN

Ein bedeutender Fortschritt von RUT-0-SPURPLAN gegenüber SLS ist eine grafisch orientierte Benutzerschnittstelle auf der Grundlage einer Systemplan-ähnlichen Darstellung (Abbildung 2-6). Sie lässt eine topologische Übersicht des gesamten Untersuchungsgebietes zu und gestattet gleichzeitig, jeden einzelnen Abschnitt (Bahnhof, Gleis usw.) detailgetreu zu betrachten.

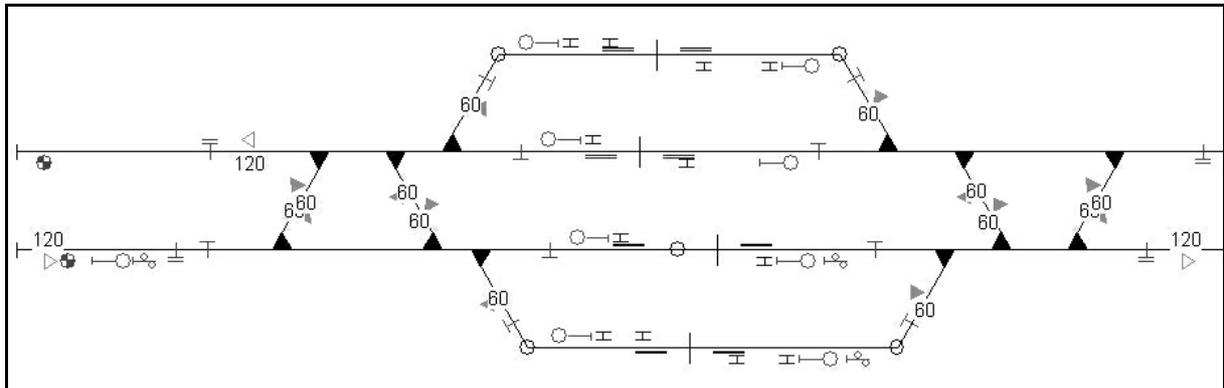


Abbildung 2-6: Bahnhof in Form des Spurplan-Graphen

Der Aufbau des SPURPLAN-Infrastrukturgraphen in RUT-0 ist vergleichbar mit der Darstellung auf Spurplanstellwerken. Dieser Infrastrukturgraph ist ein knotenbewerteter Digraph, dessen Knoten alle Merkmale der Infrastruktur darstellen: Signale, Widerstände, Haltepunkte usw. Alle Knoten des Graphen sind auf Positionen in Gleisplan-Zwischenweichenabschnitten bezogen, wobei jede Weiche aus drei Knoten besteht, die in drei verschiedenen Abschnitten liegen (eine Kreuzungsweiche oder Kreuzung besteht dementsprechend aus vier Knoten). Die Bewertung jedes Knotens setzt sich zusammen aus Knotenart, Knotenlage (Streckenkilometrierung), der Betriebsstellenbezeichnung, zu der dieser Knoten zugeordnet ist, und einigen weiteren knotenspezifischen Werten, wie z.B. der neuen Neigung in ‰ bei Streckenneigungswechseln. Die unbewerteten Kanten des Graphen stellen Gleisverbindungen dar. Wenn zwei Knoten im Graphen miteinander verbunden sind, bedeutet dies, dass sie auf einem Gleis nebeneinander liegende Infrastrukturmerkmale repräsentieren. Bei einer Weiche existieren die Verbindungen „Weichenspitze – Stammgleisende“ und „Weichenspitze – Zweiggleisende“. Die Richtung der Kanten entspricht der Kilometrierungsrichtung und steht in keinem Zusammenhang mit einer möglichen Fahrtrichtung.

Wenn man den Graphen in einem Gleisplan des Netzteils so darstellt, dass alle Knoten und Kanten auf den eingezeichneten Gleisen liegen, können im Graphen voneinander getrennte Bereiche entstehen, die die Einheit des Graphen und seine Behandlung erschweren können. Um einen geschlossenen Graphen zu erhalten, werden in RUT-SPURPLAN diejenigen Knoten, die keinen Vorgänger bzw. keinen Nachfolger haben, mit zusätzlichen Anfangs- bzw. Endknoten verbunden, welche

ihrerseits linear miteinander und mit zwei ausgezeichneten Knoten, der Quelle und der Senke, verbunden werden (siehe [6]).

Wie bereits erwähnt ist die SPURPLAN-Infrastruktur in größere Bereiche (Betriebsstellen), die Bahnhöfe und Streckenteile darstellen, unterteilt. In diesen Bereichen werden betriebsstellenbezogene Fahrwege als eine weitere Schicht über den Infrastrukturdaten aufgenommen. Dies sind explizit definierte Fahrmöglichkeiten innerhalb einer Betriebsstelle (Abbildung 2-7), die den technisch gesicherten Fahrstraßen entsprechen. Allerdings werden Fahrwege an den Hauptsignalen nicht unterbrochen und können so aus mehreren Fahrstraßenteilen bestehen. Der Laufweg eines Zuges wird durch eine Betriebsstellenreihenfolge mit der Nutzung eines bestimmten Fahrweges innerhalb jeder Betriebsstelle vorgegeben.

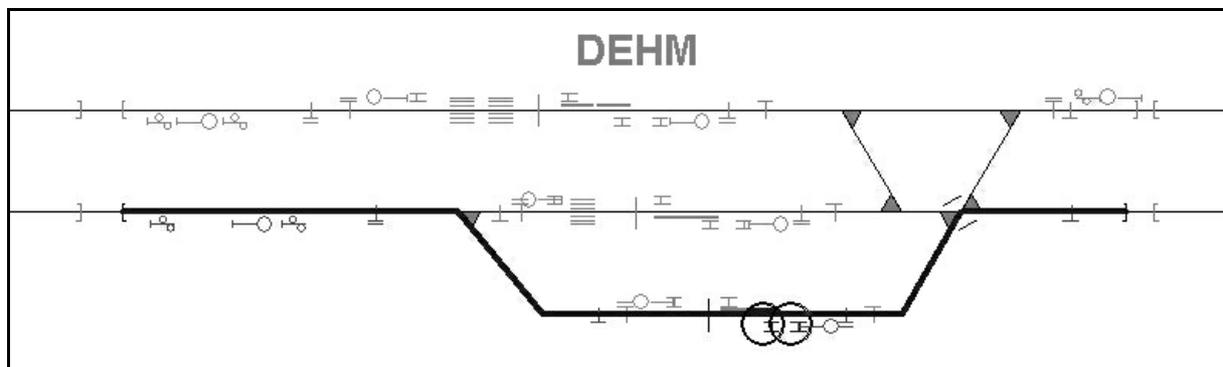


Abbildung 2-7: Betriebsstellenfahrweg als technisch gesicherte Fahrmöglichkeit innerhalb einer Betriebsstelle

Bei der Eingabe werden Infrastrukturdaten in SPURPLAN diversen kontextsensitiven Plausibilitätskontrollen unterzogen. Nach der Überprüfung der Bezeichnung und der Kilometrierung während der Dateneingabe wird am Ende auch die Gesamtkonsistenz der Infrastruktur kontrolliert. So findet u.a. eine Untersuchung der hintereinanderliegenden Neigungswechsel statt, die Übereinstimmung der Bahnsteignutzlängen mit dem Abstand bis zur Signalzugschlussstelle wird kontrolliert, das aufgenommene Signalsystem auf Vollständigkeit überprüft. RUT-0 bietet eine Reihe weiterer nützlicher Funktionen für die Bearbeitung von Infrastrukturdaten. Die Größe des Untersuchungsabschnittes kann beispielsweise durch die Zusammenfassung von mehreren Spurplänen variiert werden, oder auch der gesamte Datenbestand für andere Anwendungen zur Verfügung gestellt, komprimiert oder am entfernten Server gespeichert werden. Es besteht außerdem die Übernahmemöglichkeit aus anderen Infrastrukturformaten.

2.5.3 Weitere Infrastrukturmodelle

In der SIMU-Programmfamilie wird die Eisenbahninfrastruktur ebenfalls mittels eines ungerichteten Graphen modelliert. Einzelne Datensätze sind dort jedoch anders als bei bisher beschriebenen Ansätzen nicht punktbezogen, sondern kantenbezogen.

Die Kanten des Graphen, die wie in übrigen Modellen wichtige Merkmale von Knoten der Infrastruktur (Weichen, Signale, Widerstände usw.) verbinden, enthalten selbst bestimmte Streckencharakteristika, wie z.B. Länge des Gleisabschnittes, zulässige Geschwindigkeit oder Streckenneigung.

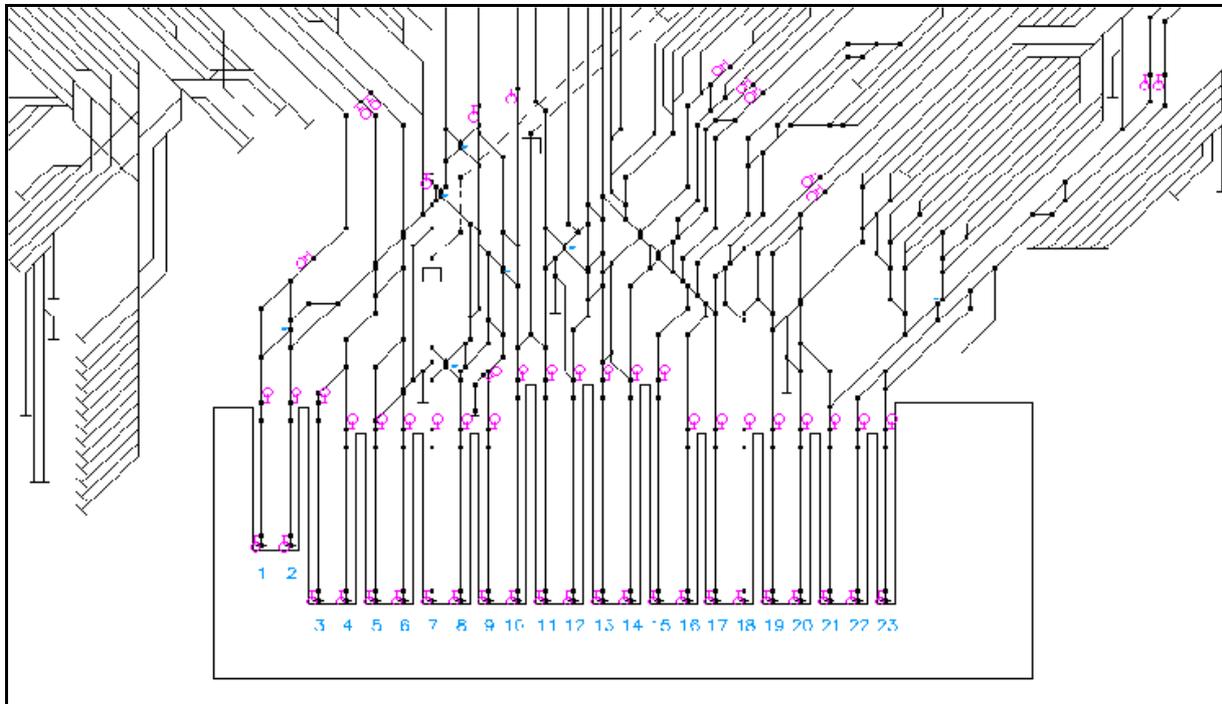


Abbildung 2-8: Darstellung eines Kopfbahnhofs in UX-SIMU³

Signaltechnik und Fahrstraßen passen in das graphenorientierte Gesamtkonzept von UX-SIMU jedoch nicht. Sie werden im System mit Hilfe von zusätzlichen Strukturen modelliert, und dies kann den Ausbau und effiziente Verwendung des Modells erheblich behindern. Außerdem erschwert die fehlende Streckenkilometrierung die Orientierung in größeren Infrastrukturbereichen. Ferner müssen viele Kantenbewertungen mehrmals redundant gespeichert werden, obwohl sich z.B. die Streckengeschwindigkeit vergleichsweise selten ändert. So gestattet die kantenorientierte Modellierung der Infrastruktur von UX-SIMU zwar exakte Abbildung der Gleistopologie, deren logisches Konzept ist jedoch sehr an synchrone Simulation orientiert, was den Einsatz des Modells für andere Zwecke in Frage stellt.

SIMU++ ist eine prinzipiell neue Entwicklung, die auf den vorhandenen Erfahrungen der UNIX-Basierten Modelle SIMU V, SIMU VII und UX-SIMU aufbaut und, abgesehen von der weiterhin synchronen Simulation, auch für die klassische Fahrplankonstruktion ausgerüstet ist [22]. Der kantenbewertete Infrastrukturgraph von SIMU++ enthält vier Komplexitätsstufen:

³ Quelle: HaCon Homepage, <http://www.hacon.de/uxsimu/>

1. Der Basis-Netz-Graph ist die höchste Detaillierungsstufe, die alle für eine volle Programmfunktionalität relevante Elemente enthält: Weichen, Signale, Halteplätze usw.
2. Der Signal-Netz-Graph enthält Fahrwegblöcke (Fahrstraßen) und Signale. Ein SIMU-Fahrweg besteht aus einer zusammenhängenden Folge von Zwischensignal-Kanten. Diese Struktur ermöglicht im Gegensatz zu SIMU++ -Vorgängern eine automatische Fahrwegsuche.
3. Der Gleis-Netz-Graph ist ein reduzierter Signal-Netz Graph. Er repräsentiert die Fahrtmöglichkeiten zwischen aufeinanderfolgenden Bahnhöfen und dient der Bestimmung der Zuglaufwege. Die Zugdaten werden direkt in den Kanten des Gleis-Netz Graphen vermerkt.
4. Der Bahnhof-Netz-Graph stellt die größte Abstraktion der Infrastrukturdaten dar. In dieser Stufe lassen sich die Fahrtmöglichkeiten zwischen einem eingegebenen Start- und Zielbahnhof bestimmen.

Dank der Netzübersichtsdarstellung lässt sich mit dem Datenmodell SIMU++ nicht nur eine automatisierte Fahrwegzusammenstellung, sondern auch das Konzept für eine automatische globale Trassensuche erstellen, die in der gegenwärtigen RUT-Version noch fehlt. Laut HAUPTMANN [22] soll die modulare interne Struktur des Programms flexibel und für andere Zwecke ausbaubar sein. Es sind außerdem Schnittstellen zu anderen Infrastrukturdatenbanken vorhanden (u.a. zu SPURPLAN).

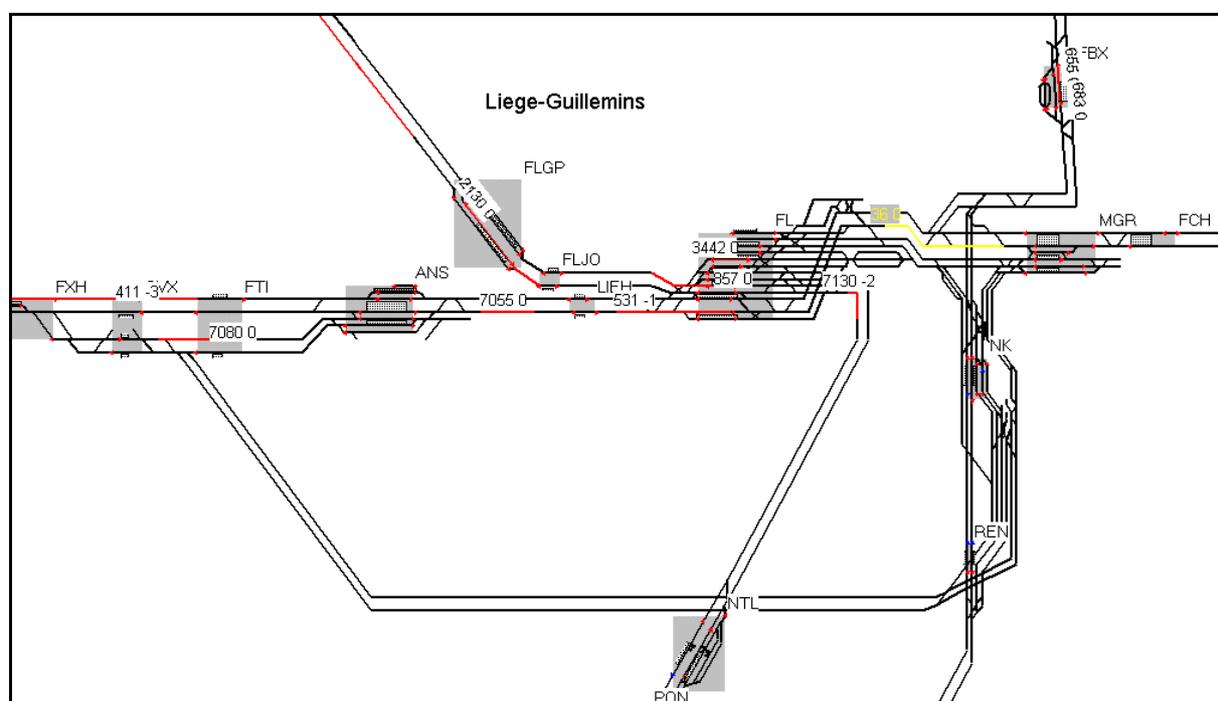


Abbildung 2-9: Darstellung eines Bahnhof-Netz-Graphen in SIMU++⁴

⁴ Quelle: IVE Homepage, <http://www.ive.uni-hannover.de/software/simu++/>

Das immer noch vorhandene Problem der Kanten-Redundanz scheint angesichts der erweiterten Funktionalität von SIMU++ eher nebensächlich. Einige Schwierigkeiten bei der Trassensuche auf der Mikroebene (z.B. alternative Fahrmöglichkeiten innerhalb von wenigen Betriebsstellen) würden aber u.a. eine zu pessimistische Einschätzung der Mindestzugfolgezeiten verursachen. Außerdem können die enge Verbindung und die gegenseitige Abhängigkeit zwischen der Infrastruktur und den Zugdaten für die analytische Modellierung, die Zugfahrten als Massenerscheinungen betrachtet und keine konkreten Zustände im Eisenbahnbetriebssystem auswerten kann, einige Probleme bereiten.

Das auf Petri-Netzen⁵ basierende Infrastrukturmodell von SABINE [14] erscheint für analytische Leistungsuntersuchungen noch weniger geeignet, da in diesem Modell die eigentliche Eisenbahninfrastruktur noch enger mit den Zugfahrten verschmolzen ist. Es handelt sich hierbei um zeitbewertete Petri-Netze mit hierarchischem Aufbau, um die mathematische Untersuchung von parallelen kooperierenden Vorgängen zu ermöglichen.

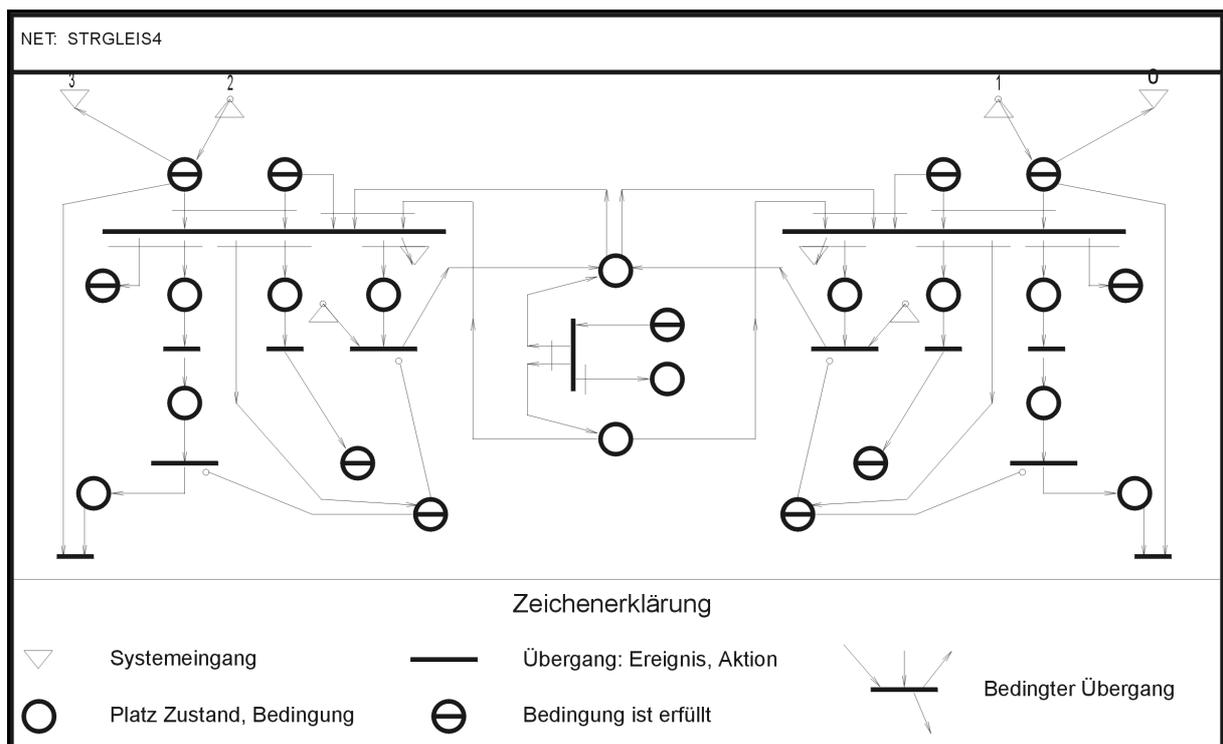


Abbildung 2-10: Petri-Netz-Modell eines Streckengleises⁶

⁵ Als Einführung in die Petri-Netz-Modellierung sind folgende Literaturquellen zu empfehlen: Baumgarten, B.: Petri-Netze: Grundlagen und Anwendungen; Spektrum Akademischer Verlag, 1996
Oberweis, A.: Modellierung und Ausführung von Workflows mit Petri-Netzen; B.G. Teubner-Verlagsgesellschaft, 1996

⁶ Dieses Schema ist von Prof. Dr. H. Fischer zur Verfügung gestellt.

Mit dem Einsatz einer komplexen Logik wird in SABINE jeder Bahnhof, jede Abzweigstelle und jeder einzelner Blockabschnitt durch ein Makronetz dargestellt, welches in das Hauptnetz aufgenommen wird. Alle Zustände und Ereignisse, die in einem Makronetz vorkommen können, werden durch einen speziellen Graphen abgebildet. Je nach Situation auf der Strecke finden in dem Graphen bestimmte Übergänge statt, die zu neuen Systemzuständen führen. Die Struktur des Graphen ist somit nicht nur von der Gleisinfrastuktur, sondern auch von den möglichen Fahrten abhängig. In Abbildung 2-10 ist ein Petri-Netz-Modell eines Streckengleises dargestellt, das in beiden Richtungen befahrbar und für insgesamt vier Züge konzipiert ist.

Dieser Modellaufbau mag für eine synchrone Simulation gut geeignet sein, weil er von bestimmten Systemzuständen für konkrete Zeitpunkte ausgeht. Eine Anwendung der statistischen analytischen Methoden des Operations Research wäre allerdings nicht zuletzt wegen der unüberschaubaren Komplexität der Petri-Netze mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden, denn komplexere Infrastrukturbereiche wie Fahrstraßenknoten können in SABINE nicht mit einem angemessenen Aufwand exakt abgebildet werden.

2.6 Fazit aus der Modelauswahl

Ausgehend von den im Abschnitt 2.4 formulierten Vorgaben und von den an das Infrastrukturmodell gestellten Anforderungen ist die Wahl des Systems RUT-0 als Vorlage für Netzkapazitätsuntersuchungen nahezu selbstverständlich. Zwar könnte sich das Konzept von SIMU++ künftig zu einer konkurrenzfähigen Alternative entwickeln, aber dafür müsste die synchrone Modellstruktur extra angepasst werden, um u.a. die früheren Belegungen für die Mindestzugfolgezeitenermittlung festzuhalten. Überdies konnte, als das Grundkonzept für ANKE 1996 entworfen wurde, nur auf das einzige akzeptable Modell zurückgegriffen werden, das existierte, nämlich auf RUT-0.

Mittlerweile befindet sich RUT-0 seit einigen Jahren im Einsatz zur Erstellung der Jahresfahrpläne der DB AG. Man hat in dieser Zeit sehr praktische Erfahrungen über Anpassungsmöglichkeiten und über unzählige betriebliche Ausnahmefälle, die bei der realen Fahrplankonstruktion auftreten, gesammelt und in dem System berücksichtigt.

Bereits in der Konzeption von RUT-0 waren mögliche Erweiterungen für analytische Untersuchungen und für die Simulation vorgesehen. BRÜNGER [6] betont u.a., dass die zugrundeliegenden Erkenntnisse der analytischen Verfahren direkt in einem Fahrplankonstruktionssystem nutzbringend eingesetzt werden können. Dies betrifft besonders die Folgeverspätungen, die ausschlaggebend für die Bestimmung von Pufferzeiten zwischen Zugtrassen sind. Daher enthalten die FAKTUS-Zugdaten die

Vorgaben zu den Einbruchsverspätungen sowie die charakteristischen Rangordnungskennzahlen der Züge. Darüber hinaus würde RUT-0 prinzipiell eine Gruppierung der Züge in Zugfamilien und eine nachfolgende Ermittlung von Mindestzugfolgezeiten anhand der vorliegenden Belegungen gestatten.

Auch in bezug auf den vorhandenen Datenbestand ist RUT-0 anderen EDV-Systemen überlegen. Zur Zeit sind Spurplan-Daten für alle Niederlassungen der DB AG vorhanden und könnten für die analytischen Leistungsuntersuchungen ohne umständliche Nachbearbeitung wiederverwendet werden. Außerdem verfügt RUT-0 über Schnittstellen zur GFD-Datenbank (gemeinsame Fahrplandatenhaltung der DB AG), zu STRELE-STRESI-Streckendaten und teilweise zu den ALFA-Fahrwegdaten. Weitere Austauschmöglichkeiten, u.a. mit der SIMU-Infrastruktur, sind für RUT ebenfalls vorgesehen.

Eine Makrodarstellung der großen Netzbereiche wie in SIMU++ fehlt dem System RUT-0 noch. Dadurch kann u.a. Redundanz entstehen, da einzelne Betriebsstellen, die an den Grenzen einzelner Projektbereiche liegen, in mehreren Spurplan-Projekten aufgenommen werden müssen, um die Projekte so zu verketten. Die Aufteilung des Netzes in Projektbereiche, die an den Grenzen verbunden werden, erschwert teilweise die Fahrplannerstellung, da lange Zugfahrten nur stückweise erfasst werden können. Dieser Effekt ist jedoch für analytische Untersuchungen nicht von großer Bedeutung, da die Ausdehnung eines Überholungsabschnittes für die Ermittlung der Mindestzugfolgezeit immer ausreichend ist, und die vereinfachte Modellierung keine Zuganschlüsse und Synchronisationszeiten benötigt.

Angedeutete Mängel in RUT-0 dürften allerdings in der nächsten Zukunft bereinigt werden. Zur Zeit befindet sich eine neue Variante von RUT in Bearbeitung, die außer einer makroskopischen Netzübersicht noch viele weitere Vorteile bietet. Das neue auf Oracle-Datenbank basierende plattformunabhängige Mehrplatzsystem heißt DaViT (Datenverarbeitung im Trassenmanagement). Es wäre prinzipiell möglich, das auf der Basis von RUT-0 entwickelte Softwaresystem ANKE, nachträglich auch auf DaViT zu übertragen.

3 Unterteilung des Eisenbahnnetzes in Untersuchungsbereiche

Das Eisenbahnnetz ist eine umfassende Struktur, deren Elemente komplex miteinander verkettet sind. Um das Zusammenwirken und die gegenseitigen Einflüsse im Netz möglichst realitätsnah zu bemessen, sollte es als Einheit oder als System zusammenhängender Teilnetze betrachtet werden. In der Regel wird die Netzstruktur bei einer solchen Vorgehensweise jedoch wegen der besseren Übersicht und der Einschränkungen der Datenverarbeitungssysteme stark vereinfacht abgebildet.



Abbildung 3-1: Fernverkehrsnetz der DB AG

Die schematisierte Darstellung des Fernverkehrsnetzes der DB AG (Abbildung 3-1) enthält z.B. alle wichtigen Knotenpunktbahnhöfe Deutschlands und die Streckenverbindungen zwischen ihnen. Detaillierte Gestaltung der Bahnhöfe, Struktur der Anschlusspunkte, Streckentopographie, Sicherungstechnik und viele weitere

Einzelheiten sind dagegen in diesem einfachen Modell nicht enthalten. Dementsprechend kann die Netzkapazität nur sehr ungenau eingeschätzt werden.

Mittlerweile sind moderne EDV-Systeme wie DaViT und SIMU++ in der Lage, eine Makroübersicht des Netzes mit der detaillierten Darstellung einzelner Bereiche, die 300 bis 500 Streckenkilometer umfassen, zu verbinden. Besonders vorteilhaft ist dieses modulare Schema für die interaktive Fahrplanerstellung, großräumige Simulation, sowie für die automatisierte Trassensuche. Für analytische Untersuchungen ist es ebenso erforderlich, möglichst umfangreich dimensionierte Eisenbahnanlagen zu betrachten, um das Zusammenwirken der Zugströme im Netz besser bewerten zu können. Die Anschlüsse zu benachbarten Teilnetzen werden jedoch von analytischen Methoden wegen vereinheitlichter Modellierung der Zugströme nicht berücksichtigt. Deswegen reicht für die fahrplantechnische Untersuchung eines Infrastrukturbereiches eine Ausdehnung bis zum nächsten Überholungsbahnhof der ranghöchsten Zugattung aus. Der dabei vernachlässigte hochrangige Fernverkehr, der die Grenzen der Teilnetze überschreitet, erleidet gewöhnlich weniger Wartezeiten, die zudem durch die Pufferzeiten und die Fahrzeitreserven abgebaut werden können. Im Betriebsablauf werden die Einbruchsverspätungen, die außerhalb des Untersuchungsbereiches entstehen, statistisch erfasst.

Ein Teilnetz muss für die analytische Untersuchung zusätzlich in kleinere Elemente aufgeteilt werden, da diese zum einen genaue Ortung der Engpässe erlauben, zum anderen die Modellierungsvoraussetzungen am besten erfüllen. Bekanntermaßen ist das Eisenbahnnetz aus der Sicht der Bedienungstheorie eine Vielzahl von Bedienungsstellen und Wartepositionen, die auf eine sehr komplexe Art miteinander verbunden sind. Es ist unmöglich, alle Bedienungsstellen und ihre Verbindungen als ein umfassendes und universelles Bedienungssystem in der Form $A/B/n/m$ (vgl. Abschnitt 4.2) zu beschreiben, weil, abgesehen von der Komplexität der mathematischen Anforderungen, jeder Untersuchungsraum im Netz ein eigenes Bedienungsmodell benötigen würde.

Eine natürliche Unterteilung des Eisenbahnnetzes in seine funktionellen Bestandteile erlaubt jedoch, einzelne Komponenten in erster Näherung als unabhängige Bedienungssysteme zu betrachten und sie auch separat zu untersuchen. Durch den Rückstau entstehen zwar nicht modellierbare gegenseitige Einflüsse zwischen den Bestandteilen, diese bleiben jedoch bei nicht allzu großen Stauwirkungen vergleichsweise klein.

3.1 Geeignete Netzelemente für die analytische Modellierung des Eisenbahnnetzes

An die zu untersuchenden funktionellen Netzelemente für das neue EDV-System ANKE werden folgende Anforderungen gestellt:

- Die Netzelemente sollen die Fähigkeit besitzen, die Leistungsengpässe in allen Netzteilen und verschiedenen Typen der Bahnanlagen aufzuspüren
- Eine gute Netzabdeckung und bestimmte Flexibilität (geringe Abhängigkeit von der Netzstruktur) müssen gewährleistet werden
- Die abstrakten analytischen Modelle sollen eine hohe Präzision besitzen und mit möglichst wenig Aufwand anwendbar sein
- Eine einfache Anpassungsmöglichkeit an die SPURPLAN-Struktur ist erforderlich

In Abbildung 3-2 sind die am häufigsten bei Leistungsuntersuchungen verwendeten Elemente schematisch dargestellt: Bahnhof (Knotenpunkt-, Rangier-, Umschlagbahnhof oder Abstellanlage), Strecke, Fahrstraßenknoten und Gleisgruppe.

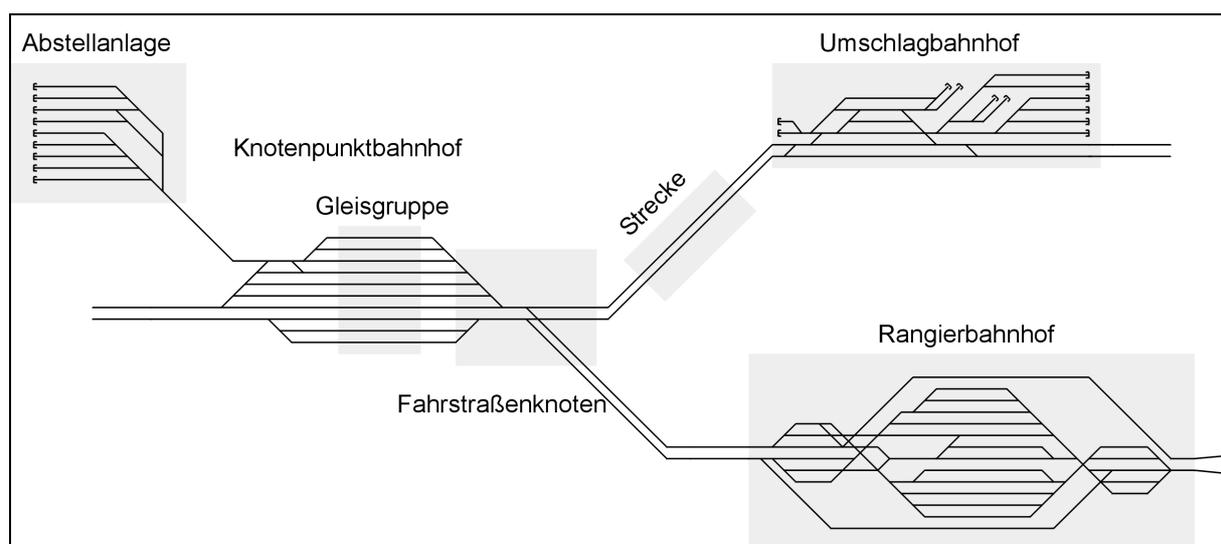


Abbildung 3-2: Untersuchungselemente von Bahnanlagen

Die meisten in bisherigen analytischen Verfahren analysierten Netzelemente können die hier gestellten hohen Anforderungen aus verschiedenen Gründen nicht erfüllen.

Komplette **Bahnhöfe** sind typische Untersuchungsbereiche der früheren Verfahren wie der Bahnhofsdurchleuchtung oder der Betriebsplanung mit fahrdynamischen Ansätzen. So ist im Betriebsplan von W. Müller (Abbildung 3-3) nur schwer zu erkennen, auf welche Gleisbereiche des Rangierbahnhofes sich die gezeichneten Zeit-Weg-Linien beziehen, wie sich die Gleisbelegungen gegenseitig beeinflussen und an welchen Stellen die Engpässe entstehen können.

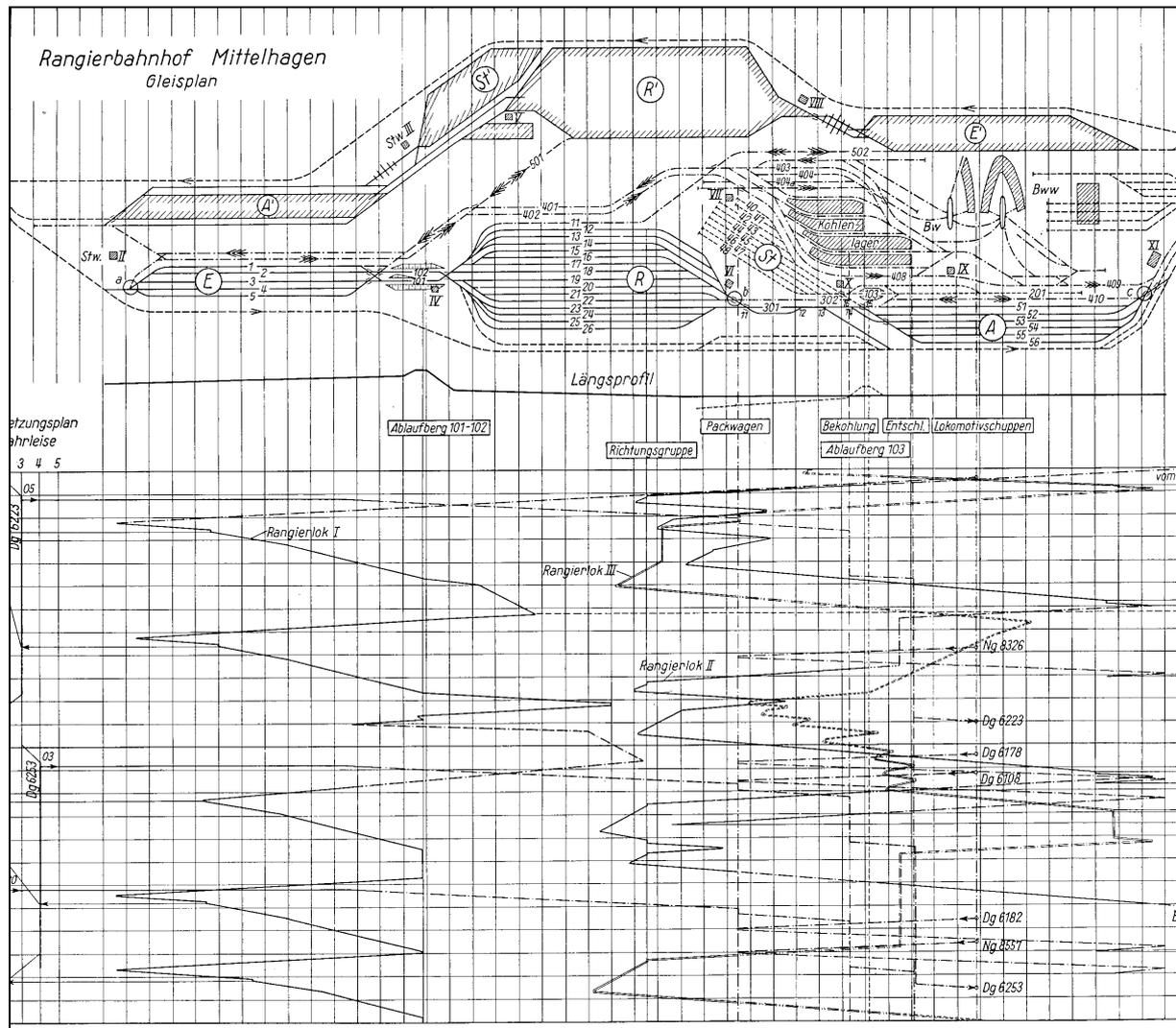


Abbildung 3-3: Betriebsplan – Untersuchung eines Rangierbahnhofs [31]

Im allgemeinen weisen komplette Bahnhöfe eine schlecht formalisierbare Struktur auf. Verschiedene Bahnhofsarten benötigen in der Regel auch unterschiedliche explizite Beschreibungen und Modellierungen. Dies macht alle universellen Ansätze und automatisierten Algorithmen für solche Strukturen kaum anwendbar.

Im Gegensatz zum Bahnhof lässt sich ein **Streckenabschnitt** auch formell beschreiben: Das ist der Teil einer Strecke, den alle Züge wenigstens in einem Querschnitt gemeinsam befahren. Demnach können Streckenabschnitte als langgestreckte einkanale Bedienungssysteme angesehen werden, die allerdings infolge von Überholungsmöglichkeiten interne Reihenfolgewechsel ermöglichen (siehe Abbildung 3-4).

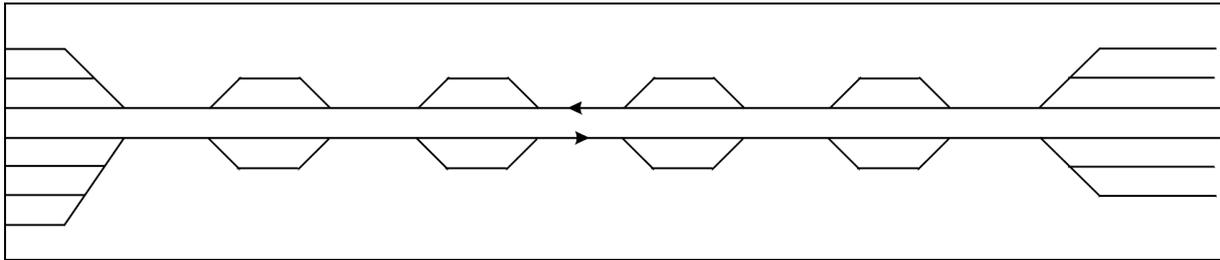


Abbildung 3-4: Schematische Darstellung eines Streckenabschnittes

Das Streckenabschnittsmodell wird in den Programmen STRELE und STRESI verwendet. Während eine Simulation die Vorgänge in einem Streckenabschnitt noch relativ eindeutig abbildet, offenbart die Benutzung analytischer Methoden bei der Ermittlung der Leistungsfähigkeit von Strecken einige Unvollkommenheiten:

- Der Wartevorgang ist als Teil des Reihenfolgewechsels auf der Strecke, also im Bedienungskanal, zugelassen. Die Wartezeiten aus Überholung im Bedienungskanal verlangsamen die Beförderungsgeschwindigkeit der im Bedienungskanal überholten Züge. Die Wartezeiten vor dem Bedienungskanal werden dabei jedoch als unverändert betrachtet.
- Als Bedienungszeit für das Wartesystem „Strecke“ wird die größte Mindestzugfolgezeit des Streckenabschnittes eingesetzt. Es wird angenommen, dass in allen Überholungsabschnitten für alle Zugfolgefälle die gleiche Wahrscheinlichkeit besteht. Damit werden die Mindestzugfolgezeiten jenes Überholungsabschnittes für den Durchsatz maßgebend, der die größte Spreizung aufweist. Dieser Überholungsabschnitt bildet zumindest für diese Zugfolgefälle den Flaschenhals, aber der Stau an dieser Stelle wird für den ganzen Streckenabschnitt als maßgebend betrachtet (weiteres zu Mindestzugfolgezeiten im Kapitel 7).
- Schließlich können die Streckenabschnitte in der SPURPLAN-Infrastruktur formell nicht geortet werden, weil das Grundgerüst von SPURPLAN aus Zwischenweichenabschnitten und Betriebsstellen besteht, welche sowohl einen Streckenteil als auch einen Knotenpunktbahnhof oder einen Überholungsbahnhof repräsentieren können. Eine freie Strecke ohne Weichen könnte in der SPURPLAN-Infrastruktur mit automatisierten Algorithmen zwar erkannt werden, aber eine Zuteilung der Betriebsstellen mit Weichen zu den Knotenpunkt- und Überholungsbahnhöfen, zu den Abzweigstellen oder zu Teilen von großen Bahnhöfen ist nahezu aussichtslos.

Etwas einfacher wäre aus der Sicht der SPURPLAN-Infrastruktur die Identifizierung von **Fahrstraßenknoten**: Alle Knotenpunkt- und Überholungsbahnhöfe, die Reihenfolgewechsel ermöglichen, enthalten in Form der Überholungsgleise Wartepositionen, die stets den Beginn eines neuen Fahrstraßenknotens bedeuten, wenn Züge dort planmäßig oder bedarfsweise halten. Das Fahrstraßenknoten-Konzept wird im Programm ALFA verwendet, wobei alle Bahnhofsgebiete, die

zwischen den Wartepositionen liegen (in der Regel Bahnhofsköpfe) dort als sogenannte Gesamtfahrstraßenknoten (GFK) aufgefasst werden. Abbildung 3-5 veranschaulicht dieses Prinzip.

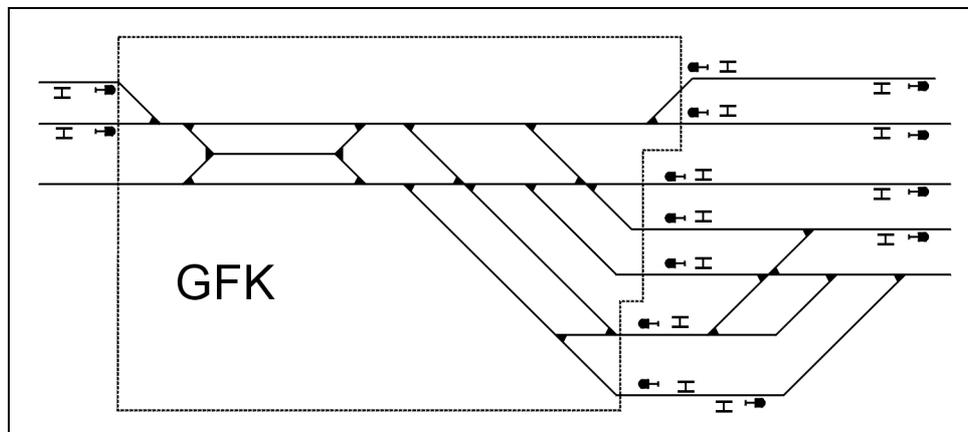


Abbildung 3-5: Gesamtfahrstraßenknoten (GFK) durch Haltepositionen abgegrenzt

In komplexen Fahrstraßenknoten finden normalerweise mehrere Parallel- und Querverfahren statt, insofern kann die Einschätzung von gegenseitigen Behinderungen dieser Fahrten wichtige Aufschlüsse über die Auslastung des Knotens geben. Leider weisen alle existierenden Modelle der GFK eine unzureichende Genauigkeit auf, weil die Struktur der Gleisverbindungen und der Fahrstraßenausschlüsse nur durch Bedienungssysteme mit variabler Verfügbarkeit der Kanäle exakt modelliert werden kann. Solche genauen Modelle könnten aber nur mit einem äußerst komplexen mathematischem Apparat geschaffen werden, da man für jeden einzelnen Gesamtfahrstraßenknoten ein eigenes Modell benötigen würde. Aus diesem Grund behandelt das ALFA-Modell die GFK als elementare einkanalige Bedienungssysteme und drückt dabei die parallelen Fahrmöglichkeiten durch eine besondere Verkettungszahl aus. Durch diese Annahme wird die Aussagekraft der GFK-Verfahren stark beeinträchtigt, dennoch kann es als Ergänzung zu Engpass-Erkennungsmodellen bei der Berücksichtigung der Auswirkungen von parallelen Fahrten behilflich sein. Ein GFK-Konzept für das System ANKE wird im Kapitel 8 vorgestellt.

Um Bahnhöfe dimensionieren zu können, wird häufig die Durchlässigkeit von **Gleisgruppen** ermittelt. Bei dieser Betrachtungsweise übernimmt der Bahnhof die Funktion eines Bedienungssystems, welches sich genauso wie ein Streckenabschnitt aufgrund der hohen Belastung zu einem Engpass entwickeln kann. Der Wartevorgang verlagert sich in diesem Bedienungssystem infolge der Trassenverschiebung auf den rückliegenden Bahnhof. Da dies die Bildung von Rückstaus verursachen kann, muss der Bahnhof so dimensioniert werden, dass die Wartevorgänge vor dem Bahnhof auf ein bestimmtes Maß reduziert werden.

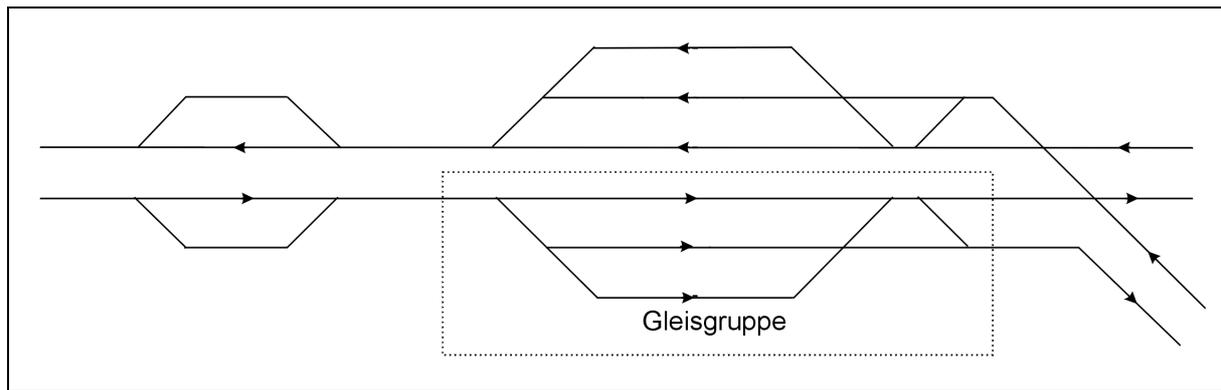


Abbildung 3-6: Gleisgruppe als Untersuchungsbereich

Das Programm GLEISE verwendet ein auf der Bedienungstheorie basierendes Statistisches Verfahren zur Ermittlung der Gleisanzahl für vorgegebene Betriebsprogramme. Die Aussagequalität von GLEISE ist für diesen Zweck sehr gut, für eine umfangreiche Netzuntersuchung eignet sich das Element „Gleisgruppe“ allerdings nicht. Die Ursache dafür ist eine schwache Netzabdeckung: Die für die Untersuchung der Gleisgruppen entwickelten mathematischen Modelle können keine Engpässe auf der Strecke oder in den Knotenpunkten selbst ausfindig machen. Als Vervollständigung anderer Modelle wäre ein Einsatz der Bahnhofsdimensionierung dennoch sinnvoll, z.B. um die Gleisnutzung in den Überholungsbahnhöfen realistisch zu bewerten und nach Auflösung der Stecken- und Knotenengpässe die Dimensionierung der Bahnhöfe zu überprüfen.

Das vollständige **Netz** bzw. ein Teilnetz als eine Gesamtheit ohne Unterteilung in kleinere Elemente zu modellieren, erscheint für die Praxis wenig nutzbringend. Die Kenntnis von netzbezogenen Qualitäts- und Leistungskenngrößen könnte vielleicht eine allgemeine Vorstellung vom System formen. Das Nachvollziehen der Ursachen und Quellen der Kenngrößen, wie beispielsweise die genaue Ortung der Engpässe oder ein Überblick über die Verteilung der Wartezeiten im Netz, dürfte aber eine äußerst schwierige Aufgabe sein. Selbst im Projekt PIN, welches das gesamte Eisenbahnnetz Deutschlands analysiert (siehe Abschnitt 2.3), wurde davon ausgegangen, dass eventuelle Engpässe im Netz entweder auf den Strecken (Netzkanten) oder in Knotenpunktbahnhöfen (Netzknoten) entstehen können. Dementsprechend hat man die Auslastung der Kanten und Knoten als unabhängiger Netzelemente berechnet und danach die Engpässe durch die globale Umleitung der Zugströme im Gesamtnetz aufgelöst.

3.2 Teilfahrstraßenknoten

Ein für analytische Leistungsuntersuchungen neuartiges Netzelement, das sich in der Eisenbahninfrastruktur ausgrenzen lässt und für die Anwendung der analytischen Modelle gut geeignet ist, hat SCHWANHÄUßER in [48] als Bestandteil eines Gesamt-

fahrstraßenknotens vorgeschlagen. Er betrachtet die bereits von POTTHOFF [41] eingeführte Verkettungszahl φ als Kehrwert der Anzahl der gleichzeitig nutzbaren Kanäle eines Bedienungssystems. Wenn $\varphi = 1$ ist, lässt sich ein solches System mit relativ einfachen mathematischen Mitteln modellieren. Die Bedingung $\varphi = 1$ bedeutet nichts anderes, als dass die entsprechende Gleisstruktur so aufgebaut ist, dass dort zu einem beliebigen Zeitpunkt nur eine Fahrt stattfinden kann. SCHWANHÄÜßER bezeichnet solche Strukturen als **Teilfahrstraßenknoten (TFK)**, jene Teile des Gesamtfahrstraßenknotens, in denen sich alle Fahrten gegenseitig ausschließen.

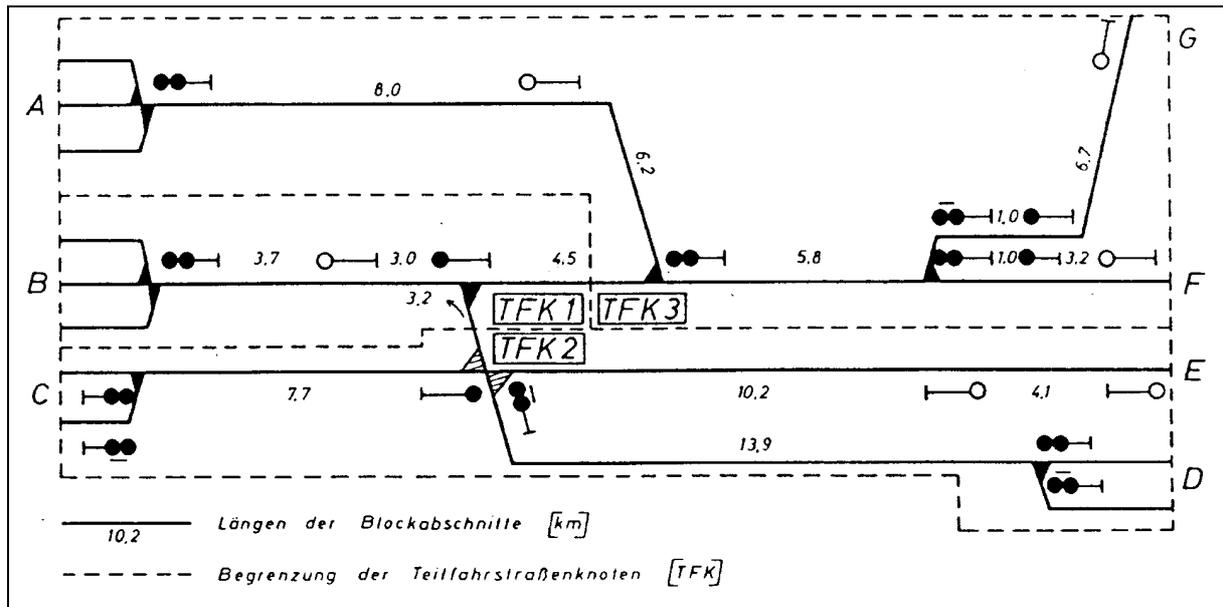


Abbildung 3-7: Unterteilung des Gleisplans in die Teilfahrstraßenknoten nach Schwanhäüßer [48]

Die Definition des TFK entspricht tatsächlich allen am Anfang des Kapitels gestellten Anforderungen an die zu untersuchenden Elemente der Eisenbahnanlagen: neben der bequemen theoretischen Handhabung in Form von einstelligen Bedienungssystemen lassen sich die TFK als Teile beliebiger Eisenbahnanlagen hervorheben, weisen bei Überlastung anschaulich auf Engpässe hin und können mit Hilfe des Graphen-Modells im SPURPLAN abgegrenzt werden. Die Flexibilität der TFK-Struktur und ihre Unempfindlichkeit gegenüber wenig bedeutsamen Änderungen im System sind von der Art und Weise abhängig, wie die TFK in der Eisenbahninfrastruktur abgegrenzt werden. Im Kapitel 5.1 wird auf die Algorithmen zur Abgrenzung von Teilfahrstraßenknoten detailliert eingegangen.

4 Analytische Modellierung

Eine Vielzahl der analytischen Modelle des Operations Research steht für eine praktische Implementierung zur Auswahl. Aber nur wenige von ihnen sind für die Kapazitätsberechnung von Eisenbahnanlagen aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften geeignet. In diesem Abschnitt werden die bekanntesten sowie die neuesten Ansätze der analytischen Modellierung aufgeführt und verglichen. Die ausführliche Wiedergabe der wichtigsten Formeln und Algorithmen ist hier für eine bessere Verständlichkeit der analytischen Modellierung sowie für die Nachvollziehung des Umganges mit dem EDV-System ANKE erforderlich.

Es kommen zwei Arten von analytischen Modellen für den Einsatz für die Untersuchung von Bahnanlagen in Frage:

1. Warteschlangentheoretische Modelle, die auf der Bedienungstheorie des Operations Research basieren und den Fahrplanerstellungsprozess nachbilden
2. Wahrscheinlichkeitstheoretische Modelle für die Beurteilung des Betriebsablaufs entwickelt werden

In seiner Behinderungstheorie [40] bezeichnet POTTHOFF die Situation bei der Trassenvergabe, in der sich die Fahrwege zweier Züge kreuzen oder die Züge in einen gemeinsamen Laufweg einfädeln, als eine **Behinderung**. Auch wenn diese Fälle in einem fertiggestellten „echten“ Fahrplan nicht vorkommen, können trotzdem in der Betriebsdurchführung Behinderungen entstehen, wenn z.B. durch Betriebsstörungen die notwendigen rangordnungsabhängigen Mindestzugfolgezeiten (von POTTHOFF als Vorsprungszeiten bezeichnet) nicht eingehalten werden. Ein stark gestörter Betrieb entspricht daher weitgehend den Randbedingungen stochastischer Systeme, weil bei großen Folgeverspätungen kein Fahrplan eingehalten werden kann und die Ankunftszeiten als zufällig betrachtet werden können.

POTTHOFF führt die Behinderungszeit als Größe ein, die, je nach Vorrangssituation, zwischen einander folgenden Zügen übertragen wird. Ausgehend von der Struktur der Betriebsanlage, den Wahrscheinlichkeiten für Behinderungen und der daraus ermittelten Gesamtzahl an Behinderungen ergibt sich die Behinderungszeitsumme $\sum t_p$, die, durch die Dauer der Betriebszeit T_z dividiert, als mittlere „Länge der Warteschlange“ bezeichnet wird. Näherungsweise kann dieser Ansatz bereits für die Bewertung der Betriebsqualität angewendet werden, dessen Aussagen sind jedoch zu optimistisch, weil in der Behinderungszeitsumme nur die Behinderungen ersten Grades enthalten sind⁷. Bei mehr als zwei Elementen im System treten aber weitere

⁷ $\sum t_p/T_z$ unterscheidet sich von Elw nach M/M/1 genau um den Faktor $\rho/(1-\rho)$

Zeitverluste bzw. Wartezeiten auf, die durch die Übertragung der Verspätungen verursacht werden.

Aus der Herleitung der Behinderungszeiten geht hervor, dass die Ankünfte der Fahrten als zufällig und damit innerhalb des Betrachtungszeitraums als unabhängig und gleichwahrscheinlich betrachtet werden. Ähnliche Voraussetzungen, sowie die Kenngröße Warteschlangenlänge, sind auch für die Wartemodelle des Operations Research typisch. In [42] beschreibt POTTHOFF diverse Anwendungen der Warteschlangenmodelle bei Stauerscheinungen im Eisenbahnbetrieb und weist darauf hin, dass diese Ansätze nicht direkt mit seiner Behinderungstheorie vergleichbar oder kombinierbar sind.

Tatsächlich sind für warteschlangentheoretische Modelle die Verteilungen der Ankünfte und der Bedienungszeiten im Wartesystem die wichtigsten Eingangsgrößen, während die Informationen über systematische Verschiebungen dieser Zeiten nicht unmittelbar berücksichtigt werden. Des Weiteren sind die Ankunftsabstände in den Formeln für die Folgeverspätungen nur indirekt in Form von Verteilungen der Einbruchsverspätungen und Pufferzeiten enthalten, bzw. die Ankünfte werden als gleichwahrscheinlich und absolut zufällig betrachtet.

SCHWANHÄÜßER berücksichtigt bei der Bemessung der Pufferzeiten in [47] nicht nur die Verspätungen höherer Grade, sondern berechnet auch die Auswirkungen der verschiedenen statistischen Verteilungen der Pufferzeiten, überprüft die Einflüsse der Rangordnungsunterschiede und findet Zusammenhänge mit der Warteschlangenentwicklung. Die Ableitung seiner Summe der Folgeverspätungen als Grundlage für die Implementierung im Netzuntersuchungsmodell wird im nächsten Abschnitt dargelegt.

In den Richtlinien der Deutschen Bahn [8] werden zwei eisenbahnbetriebliche Hauptprozesse unterschieden: der Zustand der Fahrplanbearbeitung und die Betriebsabwicklung mit Berücksichtigung des Fahrplans und der Verspätungsbildung.

Bei der Fahrplanerstellung wird versucht, ein marktgerechtes Angebot an Zugfahrten zu erstellen, mit anderen Worten einen Kompromiss zwischen Verkehrsnachfrage und den betrieblichen Möglichkeiten zu erzielen. Ausgangspunkte für die Fahrplanbearbeitung sind Zeit-Weg Linien der Züge bzw. ihre Sperrzeiten. Während der Fahrplanerstellung sind Zugfahrten, die sich aufgrund der bestellten Wunschlagen gegenseitig behindern würden, zeitlich in Abhängigkeit von der Rangordnung zu verschieben. Diese Verschiebungen erscheinen im Fahrplan als verlängerte oder zusätzliche Aufenthalte in Bahnhöfen oder als Verringerung der Geschwindigkeit in bestimmten Streckenabschnitten und führen zu einer Verzögerung des Zuglaufes, d.h. zu Beförderungszeitverlusten. Diese Verluste werden als **Wartezeiten im Fahrplan** bezeichnet und gelten als ein Maß für die Qualität des geplanten Eisenbahnbetriebes. Für die Ermittlung der planmäßigen Wartezeiten sind neben der

Simulation der Fahrplanerstellung die warteschlangentheoretischen Modelle geeignet, in denen die bestellten Trassen als Forderungenströme dargestellt werden, und die zeitliche Reihenfolge der Trassen gemäß ihren Wunschlagen die Verteilung der Ankunftsabstände bestimmt. Die Grundlagen der warteschlangentheoretischen Methoden, sowie die wichtigsten Näherungsansätze, die für die Netzkapazitätsermittlung am besten geeignet sind, werden im Abschnitt 4.2 behandelt.

Die **Wartezeiten im Betrieb** beurteilen die Qualität des Eisenbahnbetriebes bei seiner Durchführung, die sich durch das Auftreten von Störungen vom behinderungsfreien Fahrplan deutlich unterscheiden kann. Die aus verschiedenen Gründen entstehenden Verspätungen verursachen ebenfalls zeitliche Verschiebungen der Zugtrassen und durch Zugreihenfolgewechsel hervorgerufene Haltezeitverlängerungen oder zusätzliche Halte in Bahnhöfen. Wartezeiten im Betrieb werden analytisch mit Hilfe des wahrscheinlichkeitstheoretischen Ansatzes von SCHWANHÄÜBER quantifiziert. Eine Alternative zu diesem Ansatz bildet die Simulation des Eisenbahnbetriebes mit zufällig erzeugten Störungen, die exakt von dem vorliegenden Fahrplan ausgeht, aber nur mit hohem Zeitaufwand nach mehreren Durchläufen statistisch gesicherte Ergebnisse liefert.

4.1 Wartezeiten im Betrieb

Bei der Betrachtung verschiedener Zugfolgefälle werden die Grenzen für die Übertragung von Verspätungen festgelegt, die danach in einer Integralformel eingesetzt werden. Ausgangsgrößen für diese Überlegungen sind:

- zwei aufeinanderfolgende Zugfahrten, die nach dem Fahrplan erste Fahrt i und die zweite Fahrt j , welche je nach betrachtetem Prioritätsfall gleichrangig oder verschiedenrangig sind
- Mindestzugfolgezeiten $t_{Z_{ij}}$ für den Zugfolgefall „ j nach i “ und $t_{Z_{ji}}$ für den Zugfolgefall „ i nach j “, falls die Zugfolge wegen großer Verspätungen wechseln sollte; die Mindestzugfolgezeiten bleiben für einen gleichen Zugfolgefall immer konstant, da sie sich auf einen Punkt oder Abschnitt beziehen (siehe Kapitel 7)
- variable Pufferzeit $t_{P_{ij}}$
- Urverspätungen beider Züge t_{V_i} und t_{V_j} , die so variiert werden, dass damit alle möglichen Behinderungsfälle erfasst werden können.

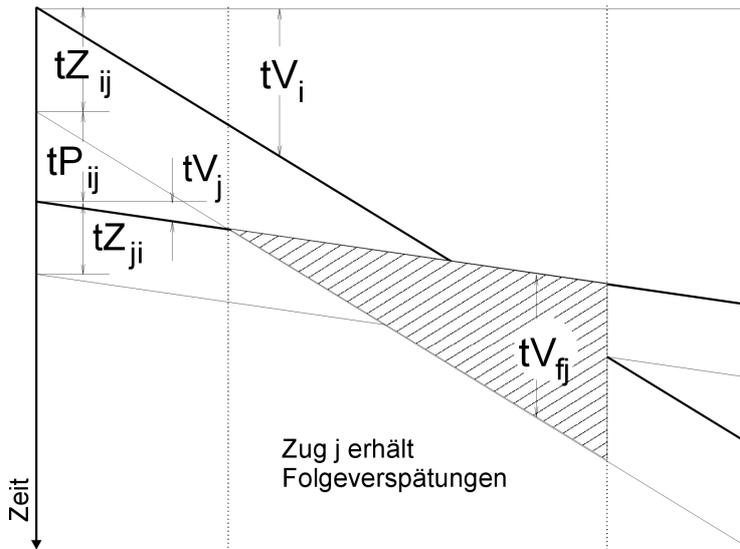


Abbildung 4-1: Verspätungsübertragung, Fall 1

Abbildung 4-1 stellt den ersten Fall der Verspätungsübertragung dar, bei dem der Zug i absoluten Vorrang gegenüber dem Zug j hat. Eine Folgeverspätung tV_{fj} entsteht für den Zug j dann, wenn er den vorrangigen Zug i in seiner Zeitlage behindern würde und dann verschoben wäre. Diese Folgeverspätung tritt in allen Fällen auf, die eine Behinderung aufweisen, und verschwindet, sobald die Zugreihenfolge vertauscht ist.

Aus den geometrischen Beziehungen ergibt sich die Folgeverspätung des zweiten Zuges:

$$tV_{fj} = tV_i - tP_{ij} - tV_j \quad (4-1)$$

Diese Verspätung tritt innerhalb der folgenden Grenzen auf:

$$tP_{ij} + tV_j < tV_i < tP_{ij} + tV_j + tZ_{ij} + tZ_{ji} \quad (4-2)$$

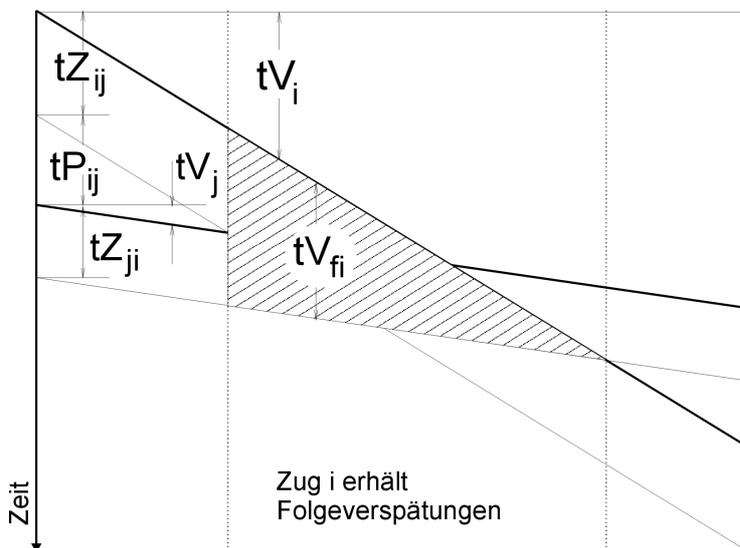


Abbildung 4-2: Verspätungsübertragung, Fall 2

Falls der Zug j gegenüber dem Zug i einen absoluten Vorrang besitzt, spricht man vom zweiten Fall, und es darf keine Verspätung vom Zug i auf den Zug j übertragen werden (siehe Abbildung 4-2).

Die Folgeverspätung, die der erste Zug i erhält, ist in diesem Fall

$$tV_{fi} = tZ_{ij} + tZ_{ji} + tP_{ij} + tV_j - tV_i \quad (4-3)$$

Die Folgeverspätung tV_{fi} gilt in den Grenzen

$$tP_{ij} + tV_j < tV_i < tZ_{ij} + tZ_{ji} + tP_{ij} + tV_j \quad (4-4)$$

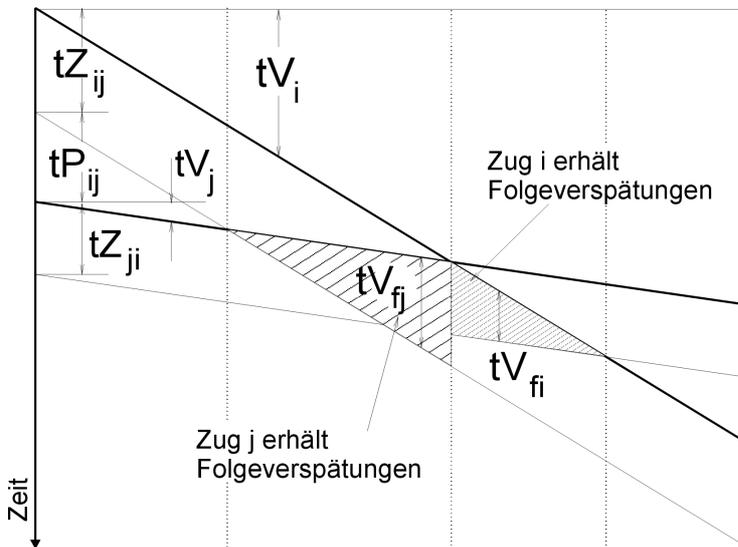


Abbildung 4-3: Verspätungsübertragung, Fall 3

Bei Gleichrang erhält derjenige Zug Vorfahrt, der die Bedienungsstelle als erster erreicht. Deshalb können in diesem Fall Folgeverspätungen für beide Züge entstehen (Fall 3). Falls der Zug i zuerst kommt, entsteht für den Zug j die gleiche Folgeverspätung wie im Nachrangfall (4-1), die Grenzen für die Verspätungsübertragung sind allerdings enger gesteckt (siehe Abbildung 4-3):

$$tP_{ij} + tV_j < tV_i < tP_{ij} + tV_j + tZ_{ij} \quad (4-5)$$

Falls eine Folgeverspätung für den ersten Zug i entsteht, ist sie analog zu (4-3) und gilt in folgenden Grenzen:

$$tP_{ij} + tV_j + tZ_{ij} < tV_i < tZ_{ij} + tZ_{ji} + tP_{ij} + tV_j \quad (4-6)$$

Wenn man für alle auftretenden Einbruchsverspätungen die daraus resultierenden Folgeverspätungen berechnet, diese dann mit den Häufigkeiten der Einbruchsverspätungen multipliziert, ergibt die Summe dieser Produkte die Gesamtmenge aller zwischen beiden Zügen übertragenen Folgeverspätungen, die je nach Rangordnungsverhältnissen unterschiedlich ausfallen.

4.1.1 Summarische Formel

SCHWANHÄUßER betrachtet in [47] konsequent alle drei beschriebenen Fälle, in denen eine Folgeverspätung entsteht. Für die Häufigkeiten der Einbruchsverspätungen setzt er die Verteilungsdichten $\varphi(tV_i)$ bzw. $\varphi(tV_j)$ ein und überprüft die Hypothese über die negativ-exponentielle Verteilung der Einbruchsverspätungen.

Die mittlere Folgeverspätung des zweiten Zuges beim Vorrang des ersten Zuges lässt sich aus (4-1) und (4-2) wie folgt errechnen:

$$tV_{mfjv} = \int_{tV_i=tP_{ij}+tV_j}^{tP_{ij}+tV_j+tZ_{ji}+tZ_{ji}} (tV_i - tP_{ij} - tV_j) \cdot \varphi(tV_i) \cdot dtV_i \quad (4-7)$$

Bei Gleichrang sind die Integrationsgrenzen nach der Formel (4-5) einzusetzen:

$$tV_{mfjg} = \int_{tV_i=tP_{ij}+tV_j}^{tP_{ij}+tV_j+tZ_{ji}} (tV_i - tP_{ij} - tV_j) \cdot \varphi(tV_i) \cdot dtV_i \quad (4-8)$$

Die mittlere Folgeverspätung des ersten Zuges wird ebenfalls nach zwei Fällen unterschieden:

1. Vorrang des zweiten Zuges:

$$tV_{mfiv} = \int_{tV_i=tP_{ij}+tV_j}^{tZ_{ji}+tZ_{ji}+tP_{ij}+tV_j} (tZ_{ji} + tZ_{ji} + tP_{ij} + tV_j - tV_i) \cdot \varphi(tV_i) \cdot dtV_i \quad (4-9)$$

2. Gleichrang:

$$tV_{mfjg} = \int_{tV_i=tP_{ij}+tV_j+tZ_{ji}}^{tZ_{ji}+tZ_{ji}+tP_{ij}+tV_j} (tZ_{ji} + tZ_{ji} + tP_{ij} + tV_j - tV_i) \cdot \varphi(tV_i) \cdot dtV_i \quad (4-10)$$

Danach werden die Integrale (4-7) - (4-10) gelöst und die Verspätungen für die Vorrang- und Gleichrangfälle jeweils zusammengefasst. Die mittlere Folgeverspätung bei der Mischung der Rangordnungsverhältnisse ergibt sich aus der Summe der Folgeverspätungen beim Vorrang und beim Gleichrang, gewichtet mit der Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines gleichrangigen bzw. eines nicht-gleichrangigen Zugfolgefalls (pV_g , bzw. $1-pV_g$). Dabei werden auch die mittleren Mindestzugfolgezeiten für vorrangige tZ_{mv} und gleichrangige tZ_{mg} Zugfolgefälle verwendet.

Unter Berücksichtigung der Verspätungsübertragung bei großen Einbruchsverspätungen und der damit verbundenen Folgeverspätungen in Warteschlangen entsteht schließlich die Formel für die Summe aller Folgeverspätungen $\sum tV_f$ im Untersuchungszeitraum tU :

$$\begin{aligned} \sum tV_f = & \left[pV_g \cdot \left(1 - e^{-\frac{tZ_{mg}}{tV_m}} \right)^2 + (1-pV_g) \cdot \left(1 - e^{-2\frac{tZ_{mv}}{tV_m}} \right) \cdot \frac{tZ_{mv}}{tV_m} + \left(1 - e^{-\frac{tZ_m}{tP_m}} \right)^2 \cdot \frac{tZ_m}{tP_m} \right] \\ & * \frac{tU \cdot tV_m \cdot \left(pV_e - \frac{pV_e^2}{2} \right)}{\left(tP_m + tZ_m \right) \cdot \left(\frac{tP_m}{tV_m} + 1 - e^{-\frac{tZ_m}{tV_m}} \right)} \end{aligned} \quad (4-11)$$

Unter Einführung der Qualitätskriterien für Folgeverspätungen (siehe Kapitel 9) ist die Formel (4-11) in dieser Form in das Programm STRELE der Programmfamilie SLS

[11] für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Streckenabschnitten eingegangen und wurde in zahlreichen Studien und Gutachten mit Erfolg eingesetzt. Durch eine Vielzahl von Annahmen (z.B. gemittelte Mindestzugfolgezeiten oder geschätzte Wahrscheinlichkeiten gleichrangiger Zugfolgefälle) ist eine gewisse Ungenauigkeit bei den Aussagen der Formel (4-11) zu erwarten. Diese Abweichungen von der Realität lassen sich teilweise durch eine genauere Betrachtung der Zugfolgefälle und durch die Berücksichtigung weiterer Faktoren mindern.

4.1.2 Zuggattungsscharfe Formel

In einer weiteren Studie von SCHWANHÄÜßER [55] werden die Rangordnungsunterschiede und individuelle Verspätungen in einzelnen Zugfolgefällen exakt berücksichtigt. Der Ausgangspunkt hierfür ist die These, dass die Bereichsgrenzen für die Übertragung von Verspätungen durch die Rangordnungsunterschiede verschoben werden. Diese Verschiebung wird für jeden Zugfolgefall „i vor j“ als Dispositionsbelegungszeit tD_{ij} bezeichnet.

Aus den Formeln (4-2) bis (4-6) folgt:

$$tD_{ij} = \begin{cases} tZ_{ji}, & \text{bei vollem Vorrang des Zuges i} \\ 0, & \text{bei Gleichrang} \\ -tZ_{ij}, & \text{bei vollem Nachrang des Zuges i} \end{cases} \quad (4-12)$$

Damit sind die Grenzen für Folgeverspätungen des zweiten Zuges j

$$tP_{ij} + tV_j < tV_j < tP_{ij} + tV_j + tZ_{ij} + tD_{ij} \quad (4-13)$$

und des ersten Zuges i

$$tP_{ij} + tV_j + tZ_{ij} + tD_{ij} < tV_i < tZ_{ij} + tZ_{ji} + tP_{ij} + tV_j \quad (4-14)$$

einheitlich festgelegt.

Der Erwartungswert der Folgeverspätung des Zuges j, entstanden durch einen möglichen Konflikt mit dem Zug i, nach Gleichung (4-1), wird durch Integration über die Verteilungsdichte der Einbruchsverspätung $\varphi(tV_i)$ des ersten Zuges, der Einbruchsverspätung des zweiten Zuges $\varphi(tV_j)$ und der Pufferzeiten $\varphi(tP_{ij})$ ermittelt:

$$E(tV_{fj}) = \int_{tP_{ij}=0}^{\infty} \left[\int_{tV_j=0}^{\infty} \left\{ \int_{tV_i=tP_{ij}+tV_j}^{tV_j+tP_{ij}+tZ_{ij}+tD_{ij}} (tV_i - tV_j - tP_{ij}) \cdot \varphi(tV_i) \cdot dtV_i \right\} \cdot \varphi(tV_j) \cdot dtV_j \right] \cdot \varphi(tP_{ij}) \cdot dtP_{ij} \quad (4-15)$$

Ähnlich ist die Integralformel für die Folgeverspätung des ersten Zuges infolge eines Konfliktes mit dem zweiten Zug ausgehend von Gleichung (4-3) aufgebaut:

$$E(tV_{fi}) = \int_{tP_{ij}=0}^{\infty} \left[\int_{tV_j=0}^{\infty} \left\{ \int_{tV_i=tV_j+tP_{ij}+tZ_{ij}+tD_{ij}}^{tV_j+tP_{ij}+tZ_{ij}} (tZ_{ij} + tZ_{ji} + tV_j - tV_i + tP_{ij}) \cdot \varphi(tV_i) \cdot d tV_i \right\} \cdot \varphi(tV_j) \cdot d tV_j \right] \cdot \varphi(tP_{ij}) \cdot d tP_{ij} \quad (4-16)$$

Die Integrale (4-15) und (4-16) lassen sich mit Hilfe der vorausgesetzten negativ-exponentiellen Verteilung der Einbruchsverspätungen und der Pufferzeiten lösen. Anschließend wird die Gesamtsumme der Folgeverspätungen für einen Zeitraum durch Berücksichtigung der Folgeverspätungen höherer gebildet.

Die resultierende zuggattungsscharfe Summe $\sum tV_f$ aller Folgeverspätungen über alle Zugfamilien ergibt sich aus der Gleichung

$$\sum tV_f = \left(1 + \frac{tZ_m}{tP_m} \right) \cdot \sum_{i=1}^m \frac{\sum_{j=1}^m F_{ij} \cdot h_{ij} \cdot [G_{ij} + G_{jij}]}{\frac{tP_m}{tV_{mi}} + 1 - e^{-\frac{tZ_m}{tV_{mi}}}} \quad (4-17)$$

$$\text{mit } F_{ij} = pV_{ei} \cdot \left(1 - pV_{ej} + \frac{pV_{ej}}{1 + \frac{tV_{mj}}{tV_{mi}}} \right) \quad (4-18)$$

Für die Folgeverspätungen des ersten Zuges i bzw. des zweiten Zuges j gilt

$$G_{ij} = tV_{mi} \cdot e^{-\frac{tZ_{ij}}{tV_{mi}}} \cdot \left[e^{-\frac{tZ_{ji}}{tV_{mi}}} - e^{-\frac{tD_{ij}}{tV_{mi}}} \cdot \left(1 + \frac{tD_{ij} - tZ_{ji}}{tV_{mi}} \right) \right] \quad (4-19)$$

$$G_{jij} = tV_{mi} \cdot \left[1 - \left(1 + \frac{tZ_{ij} + tD_{ij}}{tV_{mi}} \right) \cdot e^{-\frac{tZ_{ij} + tD_{ij}}{tV_{mi}}} \right] \quad (4-20)$$

Bei der Anwendung ist zu beachten, dass die Summen in der Formel (4-17) über alle Zugfolgefälle $i \rightarrow j$ und nicht mehr über die Mittelwerte der Mindestzugfolgezeiten gebildet werden müssen.

4.1.3 Vergleich der wahrscheinlichkeitstheoretischen Ansätze

Da die beiden Formeln für die Summe der Folgeverspätungen einen gemeinsamen Ursprung haben, soll man die eine aus der anderen ableiten können. Bei der Erstellung dieser Formeln in [47] und [55] treten zwei wesentliche Unterschiede auf:

1. Bei der Entwicklung der zuggattungsscharfen Formel findet kein Übergang zu mittleren Einbruchverspätungen und Mindestzugfolgezeiten statt, sondern es werden weiterhin spezifische Werte für einzelne Modellzüge verwendet.
2. Bei der Hochrechnung der Wartezeit, um die weitere Übertragung von Folgeverspätungen in Warteschlangen abschätzen zu können, geht man im ersten Ansatz davon aus, dass bei dieser Übertragung die Rangordnung der Züge nicht mehr beachtet werden kann. In der zuggattungsscharfen Formel werden dagegen die Prioritäten der einzelnen Züge auch bei der Staubildung berücksichtigt.

Der zweite Unterschied entsteht dadurch, dass in der summarischen Formel aufgrund der gleichrangigen Behandlung der Züge in den Warteschlangen die Gesamtsumme der Folgeverspätungen $\sum tV_f$ als Summe der Verspätungen ersten Grades $\sum tV_{f1}$ und höherer Grade $\sum tV_{fn}$ dargestellt wird:

$$\sum tV_f = \sum tV_{f1} + \sum tV_{fn} \quad (4-21)$$

$$\text{wobei } \sum tV_{fn} = \frac{tZ_m}{tP_m} \cdot \sum tV_{f1} \quad \text{für } pV_g = 1 \quad (4-22)$$

In dem zuggattungsscharfen Ansatz verwendet man dagegen einfach die Wahrscheinlichkeit ρ , dass ein bereits durch die Folgeverspätung verdrängter Zug seine neue Lage besetzt vorfindet. Dies verursacht eine Folgeverspätung zweiten Grades:

$$tV_{fm2} = tV_{fm1} \cdot \rho \quad (4-23)$$

Durch die Summierung der Folgeverspätungen aller Grade bis ∞ erhält man die mittlere Folgeverspätung tV_{fm} :

$$tV_{fm} = tV_{fm1} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \rho^n \quad (4-24)$$

und schließlich die Gesamtsumme

$$\sum tV_f = \left(1 + \frac{tZ_m}{tP_m} \right) \cdot \sum tV_{f1} \quad (4-25)$$

Wegen unterschiedlicher Hochrechnungsfaktoren bei der Berechnung der Folgeverspätungen höherer Grade ist es für einen Vergleich sinnvoll, die Hochrechnung in den beiden Formeln in umgekehrter Reihenfolge und nur die Folgeverspätungen ersten Grades direkt zu vergleichen.

Aus (4-11), (4-21) und (4-22) folgt:

$$\sum tV_{f1} = \left[pV_g \cdot \left(1 - e^{-\frac{tZ_{mg}}{tV_m}} \right)^2 + (1 - pV_g) \cdot \left(1 - e^{-2\frac{tZ_{mv}}{tV_m}} \right) \cdot \frac{tZ_{mv}}{tV_m} \right] \cdot \frac{tU \cdot tV_m \cdot \left(pV_e - \frac{pV_e^2}{2} \right)}{(tP_m + tZ_m) \cdot \left(\frac{tP_m}{tV_m} + 1 - e^{-\frac{tZ_m}{tV_m}} \right)} \quad (4-26)$$

Die Formeln (4-17) und (4-25) ergeben wiederum die zuggattungsscharfe Summe der Folgeverspätungen ersten Grades

$$\sum tV_{f1} = \sum_{i=1}^m \frac{\sum_{j=1}^m F_{ij} \cdot h_{ij} \cdot [G_{ij} + G_{jij}]}{\frac{tP_m}{tV_{mi}} + 1 - e^{-\frac{tZ_m}{tV_{mi}}}} \quad (4-27)$$

Um jetzt die Formeln (4-26) und (4-27) gegenüberstellen zu können, muss ein Übergang von den zugfallbezogenen Eingangsgrößen in der Formel (4-27) zu den mittleren Werten durchgeführt werden. Dabei werden folgende Annahmen getroffen:

- Die allgemeinen Mindestzugfolgezeiten tZ_{ij} müssen in zwei Gruppen eingeteilt werden, und zwar in die Gruppe tZ_{gm} , die alle gleichrangige Zugfolgefälle beinhaltet und in die Gruppe tZ_{vm} mit den ungleichrangigen Zugfolgefällen
- Die Einbruchsverspätungen und ihre Wahrscheinlichkeiten sind unabhängig vom Modellzug, d.h. $tV_{mi} = tV_m$ und $pV_{ei} = pV_e$ für alle i

Unter diesen Voraussetzungen gilt der Faktor F_{ij} (4-18) für alle Zugfolgefälle:

$$F_{ij} = pV_e \cdot \left(1 - pV_e + \frac{pV_e}{1 + \frac{tV_m}{tV_m}} \right) = pV_e - \frac{pV_e^2}{2} = F \quad (4-28)$$

Der Nenner in der Formel (4-27) wird zu

$$\frac{tP_m}{tV_{mi}} + 1 - e^{-\frac{tZ_m}{tV_{mi}}} = \frac{tP_m}{tV_m} + 1 - e^{-\frac{tZ_m}{tV_m}} \quad (4-29)$$

In der Summe (4-27) können drei Fälle mit verschiedenen Rangordnungen je Zugfolgefall auftreten:

1. Die Modellzüge i und j sind gleichrangig, d.h. $tD_{ij} = 0$:

$$\begin{aligned}
tV_{f1g} &= \frac{F \cdot [G_{ij} + G_{ji}]}{\frac{tP_m}{tV_m} + 1 - e^{-\frac{tZ_m}{tV_m}}} = \\
&= \frac{F \cdot \left[tV_m \cdot e^{-\frac{tZ_{mg}}{tV_m}} \cdot \left[e^{-\frac{tZ_{mg}}{tV_m}} - \left(1 - \frac{tZ_{mg}}{tV_m} \right) \right] + tV_m \cdot \left[1 - \left(1 + \frac{tZ_{mg}}{tV_m} \right) \cdot e^{-\frac{tZ_{mg}}{tV_m}} \right] \right]}{\frac{tP_m}{tV_m} + 1 - e^{-\frac{tZ_m}{tV_m}}} = \quad (4-30) \\
&= \frac{F \cdot tV_m \cdot \left[1 - 2e^{-\frac{tZ_{mg}}{tV_m}} + \left(e^{-\frac{tZ_{mg}}{tV_m}} \right)^2 \right]}{\frac{tP_m}{tV_m} + 1 - e^{-\frac{tZ_m}{tV_m}}} = \frac{F \cdot tV_m \cdot \left(1 - e^{-\frac{tZ_{mg}}{tV_m}} \right)^2}{\frac{tP_m}{tV_m} + 1 - e^{-\frac{tZ_m}{tV_m}}}
\end{aligned}$$

2. Der Modellzug i hat Vorrang vor dem Modellzug j, d.h. $tD_{ij} = tZ_{ij}$:

$$\begin{aligned}
tV_{f1vi} &= \frac{F \cdot \left[tV_m \cdot e^{-\frac{tZ_{mv}}{tV_m}} \cdot \left[e^{-\frac{tZ_{mv}}{tV_m}} - e^{-\frac{tZ_{mv}}{tV_m}} \right] + tV_m \cdot \left[1 - \left(1 + \frac{2 \cdot tZ_{mv}}{tV_m} \right) \cdot e^{-2 \frac{tZ_{mv}}{tV_m}} \right] \right]}{\frac{tP_m}{tV_m} + 1 - e^{-\frac{tZ_m}{tV_m}}} = \quad (4-31) \\
&= \frac{F \cdot tV_m \cdot \left[1 - \left(1 + 2 \frac{tZ_{mv}}{tV_m} \right) \cdot e^{-2 \frac{tZ_{mv}}{tV_m}} \right]}{\frac{tP_m}{tV_m} + 1 - e^{-\frac{tZ_m}{tV_m}}}
\end{aligned}$$

3. Der Modellzug i ist gegenüber dem Modellzug j nachrangig, d.h. $tD_{ij} = -tZ_{ij}$:

$$\begin{aligned}
tV_{f1vj} &= \frac{F \cdot \left[tV_m \cdot e^{-\frac{tZ_{mv}}{tV_m}} \cdot \left[e^{-\frac{tZ_{mv}}{tV_m}} - \left(1 + \frac{-2 \cdot tZ_{mv}}{tV_m} \right) \cdot e^{-\frac{tZ_{mv}}{tV_m}} \right] + tV_m \cdot [1 - 1] \right]}{\frac{tP_m}{tV_m} + 1 - e^{-\frac{tZ_m}{tV_m}}} = \\
&= \frac{F \cdot tV_m \cdot \left[\left(e^{-\frac{tZ_{mv}}{tV_m}} \right)^2 - \left(1 + \frac{-2 \cdot tZ_{mv}}{tV_m} \right) \cdot e^{-\frac{tZ_{mv}}{tV_m}} \cdot e^{-\frac{tZ_{mv}}{tV_m}} \right]}{\frac{tP_m}{tV_m} + 1 - e^{-\frac{tZ_m}{tV_m}}} = \frac{F \cdot tV_m \cdot \left[e^{-2 \frac{tZ_{mv}}{tV_m}} - 1 + 2 \frac{tZ_{mv}}{tV_m} \right]}{\frac{tP_m}{tV_m} + 1 - e^{-\frac{tZ_m}{tV_m}}} \quad (4-32)
\end{aligned}$$

Die Summe aller Folgeverspätungen ersten Grades $\sum tV_{f1}$ besteht aus drei Teilsummen für alle drei Zugfolgefälle, wobei der Vorrang des ersten Zuges i als gleichwahrscheinlich mit dem Vorrang des Zuges j angesehen wird:

$$\begin{aligned}
 \sum tV_{f1} &= N_g \cdot tV_{f1g} + \frac{1}{2} N_v \cdot tV_{f1vi} + \frac{1}{2} N_v \cdot tV_{f1vj} = N_g \cdot tV_{f1g} + \frac{1}{2} N_v \cdot (tV_{f1vi} + tV_{f1vj}) = \\
 &= \frac{F \cdot tV_m}{\frac{tP_m}{tV_m} + 1 - e^{-\frac{tZ_m}{tV_m}}} \cdot \left[N_g \cdot \left(1 - e^{-\frac{tZ_{mg}}{tV_m}} \right)^2 + \frac{1}{2} N_v \cdot \left(1 - \left(1 + 2 \frac{tZ_{mv}}{tV_m} \right) \cdot e^{-2 \frac{tZ_{mv}}{tV_m}} \right) + e^{-2 \frac{tZ_{mv}}{tV_m}} - 1 + 2 \frac{tZ_{mv}}{tV_m} \right] = \\
 &= \frac{F \cdot tV_m}{\frac{tP_m}{tV_m} + 1 - e^{-\frac{tZ_m}{tV_m}}} \cdot \left[N_g \cdot \left(1 - e^{-\frac{tZ_{mg}}{tV_m}} \right)^2 + N_v \cdot \frac{tZ_{mv}}{tV_m} \cdot \left(1 - e^{-2 \frac{tZ_{mv}}{tV_m}} \right) \right]
 \end{aligned}$$

(4-33)

Da die Anteile der Zugfolgefälle durch

$$\frac{N_g}{N} = pV_g \quad \text{und} \quad \frac{N_v}{N} = 1 - pV_g$$

ausgedrückt werden können und der Untersuchungszeitraum tU als

$$tU = N \cdot (tZ_m + tP_m)$$

darstellbar ist, wird die Summe (4-33) zu

$$\begin{aligned}
 \sum tV_{f1} &= N \cdot \frac{F \cdot tV_m}{\frac{tP_m}{tV_m} + 1 - e^{-\frac{tZ_m}{tV_m}}} \cdot \left[pV_g \cdot \left(1 - e^{-\frac{tZ_{mg}}{tV_m}} \right)^2 + (1 - pV_g) \cdot \frac{tZ_{mv}}{tV_m} \cdot \left(1 - e^{-2 \frac{tZ_{mv}}{tV_m}} \right) \right] = \\
 &= \frac{tU \cdot tV_m \cdot \left(pV_e - \frac{pV_e^2}{2} \right)}{(tZ_m + tP_m) \cdot \left(\frac{tP_m}{tV_m} + 1 - e^{-\frac{tZ_m}{tV_m}} \right)} \cdot \left[pV_g \cdot \left(1 - e^{-\frac{tZ_{mg}}{tV_m}} \right)^2 + (1 - pV_g) \cdot \frac{tZ_{mv}}{tV_m} \cdot \left(1 - e^{-2 \frac{tZ_{mv}}{tV_m}} \right) \right]
 \end{aligned}$$

(4-34)

Diese Summe ist nun mit der summarischen Formel (4-26) für die Folgeverspätungen ersten Grades identisch. Damit ist die Übereinstimmung beider Ansätze für die Berechnung der Wartezeiten im Betrieb bewiesen.

Ein numerischer Vergleich beider Verfahren anhand eines Beispiels ist in Anlage A enthalten.

4.2 Warteschlangentheoretische Ansätze

Bei der Erstellung des Fahrplans werden Zugfahrten, die sich aufgrund ihrer marktgerechten Wunschlage gegenseitig behindern würden, zeitlich verdrängt. Die dabei entstehenden planmäßigen Wartezeiten erscheinen im Fahrplan als verlängerte oder zusätzliche Aufenthalte und führen zu Verzögerungen des Zuglaufs. Da diese Wartezeiten nicht mehr eindeutig dem Fahrplan zu entnehmen sind, werden sie mit Hilfe des analytischen Verfahren rekonstruiert. Dieses Verfahren basiert auf den warteschlangentheoretischen Lösungen für einstellige Bedienungssysteme. Die Teilfahrstraßenknoten sollen bei der Implementierung der bedienungstheoretischen Modelle als einstellige Bedienungssysteme auftreten.

Die prinzipielle Struktur eines Bedienungssystems zeigt Abbildung 4-4. Die Bedienungswünsche sind **Forderungen**, die aus Forderungsquellen im Bedienungssystem ankommen. Die Abfolge der eintretenden Forderungen heißt **Forderungenstrom**.

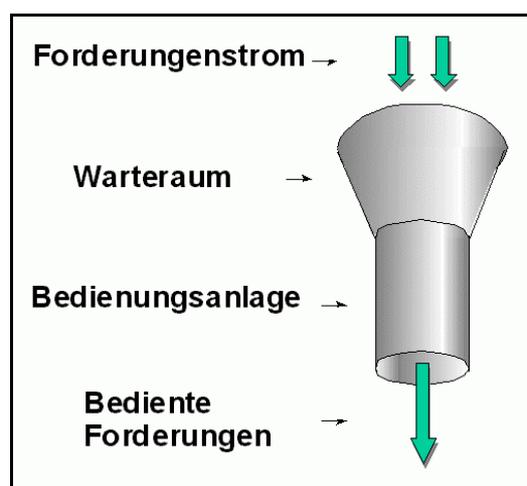


Abbildung 4-4: Schema eines Bedienungssystems

Forderungen werden in der **Bedienungsanlage** in einer bestimmten Reihenfolge bearbeitet. Falls eine Forderung die Bedienungsanlage besetzt vorfindet, muss sie in einem Speicher zwischen Forderungsquelle und Bedienungsknoten warten. Die Regelung der Einordnung und des Aufenthalts im **Warteraum** entscheidet über die Bedienungsreihenfolge der eingetroffenen Forderungen in den Bedienungskanälen.

Die wichtigste Kenngröße des Forderungsstromes ist der Ankunftsabstand t_A zwischen zwei beliebigen Bedienungswünschen. Ankunftsabstände können deterministisch oder zufällig, unabhängig oder abhängig voneinander oder vom Systemzustand sein. Ferner unterscheidet man das Prinzip, nach dem die Forderungen im System auftreten (einzeln oder im Pulk) und die Gleichartigkeit der Forderungen (homogener oder inhomogener Strom). Zufällige Ankunftsabstände werden mit Hilfe von Verteilungsfunktionen beschrieben. Als primäre Charakteristik der zufälligen Ankunftsabstände wird der mittlere Ankunftsabstand $E t_A$ bzw. sein Kehrwert, die Ankunftsrate λ , verwendet. Das zweite Moment der Zufallsgröße t_A , der **Variationskoeffizient der Ankunftsabstände** $V t_A$, ermöglicht weitere Aussagen über ihr Verhalten (siehe Tabelle 4-1).

Wert	Charakteristik	Verteilungsfunktionen
$Vt_A = 0$	konstant	-
$0 < Vt_A < 1$	unterzufällig	Normalverteilung, ERLANG-Verteilung, WEIBULL- oder GAMMA-Verteilung
$Vt_A = 1$	zufällig	Exponentialverteilung
$Vt_A > 1$	überzufällig	Hyperexponentialverteilung, WEIBULL- oder GAMMA-Verteilung

Tabelle 4-1: Aussagen des Variationskoeffizienten der Ankunftsabstände über das Verhalten der Zufallsgröße t_A

Die mittlere Bedienungszeit $E t_B$ bzw. die Bedienungsrate μ und der Variationskoeffizient $V t_B$ charakterisieren die zufällige Bedienungsdauer t_B in der Bedienungsanlage. Die Bedienungen können wiederum abhängig oder unabhängig sein und einzeln oder schubweise erfolgen. Außerdem unterscheidet man, je nachdem ob die Forderungen nacheinander oder parallel bearbeitet werden können, ein- oder mehrkanalige Bedienung.

Unter **Bedienungsdisziplin** versteht man Angaben, in welcher Reihenfolge eintreffende Forderungen in die Warteschlange eingeordnet und ankommende und wartende Forderungen in der Bedienungsanlage bedient werden. Die bekanntesten Bedienungsdisziplinen sind:

- FIFO (first in first out) – die Forderungen werden in der Reihenfolge ihres Eintreffens bedient
- LIFO (last in first out) – die zuletzt eingetroffene Forderung wird zuerst bedient
- SIRO (service in random order) – zufällige Reihenfolge

Ferner werden in Operations Research Bedienungssysteme mit absoluter oder relativer Priorität, mit seriellen oder parallelen Bedienungskanälen, Einphasen- oder Mehrphasensysteme sowie Bedienungssysteme mit Verlust behandelt.

Eine weitere wichtige primäre Kenngröße des Bedienungssystems ist die Verkehrsdichte $\rho = \lambda/\mu$, auch Verkehrswert bzw. in der Eisenbahnbetriebswissenschaft Belegungsgrad genannt. Für eine einkanalige Bedienung ohne Verlust soll ρ unter 1 liegen, sonst könnten nicht alle Forderungen bedient werden und die Warteschlange würde ins Unendliche wachsen.

Ausgehend von der Struktur und von den Charakteristika des Bedienungssystems erlauben es die meisten theoretischen Wartemodelle diverse sekundäre Kenngrößen des Systems, die den internen Zustand des Systems widerspiegeln, zu quantifizieren: Warte- und Verlustwahrscheinlichkeiten, Länge der Warteschlange, Warte- oder

Verweilzeiten, Anzahl der Forderungen im System, Anzahl der besetzten bzw. der freien Bedienungskanäle, Auslastungsgrad der Kanäle usw.

Für die Beschreibung des Bedienungssystems wird die sogenannte KENDALL-Symbolik $A/B/s/m$ verwendet.

Hierbei bedeuten:

- A Charakteristik des Forderungsstromes
- B Charakteristik der Bedienungszeiten
- s Anzahl der parallelen Bedienungskanäle
- m Anzahl der Wartepositionen

Die bekanntesten Typen der Ankunfts- und Bedienungsprozesse sind:

- M MARKOV - Prozess mit exponentiellverteilter Zufallsgröße
- D DIRAC- oder Deterministischer Prozess mit konstanten Zeiten
- Ek k-ERLANG verteilte Zufallsgröße
- H Hyperexponentielle Verteilung
- GI (General Independent) – Prozess ohne jegliche Abhängigkeiten
- G (General) – Prozess ohne Restriktionen für eine Zufallsgröße

Anhand eines einfachen Bedienungssystems ($M/M/1/\infty$) soll hier gezeigt werden, wie die Formeln für die Ermittlung sekundärer Kenngrößen für komplexere Systeme abgeleitet werden können (siehe auch. [39] und [42]). Es wird zunächst angenommen, dass in einem kurzen Zeitintervall Δt höchstens eine Ankunft erfolgen bzw. eine Bedienung beendet werden kann. Daraus ergeben sich folgende Hilfsgrößen:

n Zustand des Systems, bei dem n Forderungen im Bedienungssystem verweilen

$\lambda \Delta t$ Wahrscheinlichkeit, dass eine Forderung im Zeitintervall Δt kommt

$1 - \lambda \Delta t$ Wahrscheinlichkeit, dass keine Forderung im Zeitintervall Δt ankommt

$\mu \Delta t$ Wahrscheinlichkeit, dass eine Forderung im Zeitintervall Δt abgefertigt wird

$1 - \mu \Delta t$ Wahrscheinlichkeit, dass keine Forderung im Zeitintervall Δt abgefertigt wird

$P_n(t)$ Wahrscheinlichkeit, dass sich zum Zeitpunkt t genau n Forderungen im Bedienungssystem befinden

Mit der Intensität λ wechselt der Systemzustand n zum Zustand $n+1$, und mit der Intensität μ zum Zustand $n-1$. Die Reihenfolge diverser Zustände von 0 bis ∞ kann mit Hilfe eines Übergangsgraphen dargestellt werden (Abbildung 4-5).

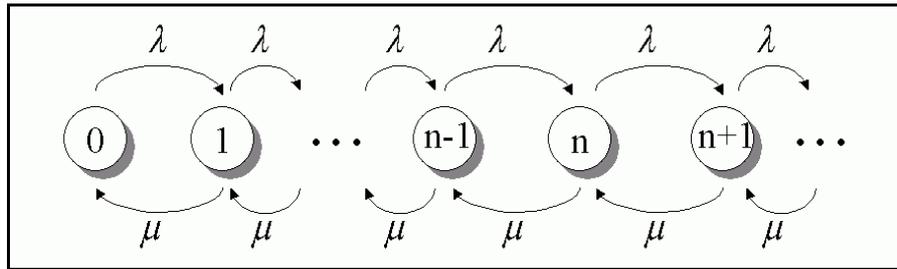


Abbildung 4-5: Graph der Systemzustände und -übergänge

Gesucht wird die Wahrscheinlichkeit $P_n(t+\Delta t)$, wobei davon ausgegangen wird, dass sich das System zum Zeitpunkt t in einem der Nachbarzustände $n-1$ oder $n+1$ oder im gleichen Zustand n befand. Es gibt insgesamt vier Möglichkeiten für einen Übergang in den Zustand n , bezogen auf ein Zeitintervall Δt :

1. Es kam keine Forderung und es erfolgte keine Abfertigung
2. Es kam keine Forderung und es erfolgte eine Abfertigung
3. Es kam eine Forderung und es erfolgte keine Abfertigung
4. Es kam eine Forderung und es erfolgte eine Abfertigung

Schematisch sind diese vier möglichen Zustandswechsel in Abbildung 4-6 dargestellt.

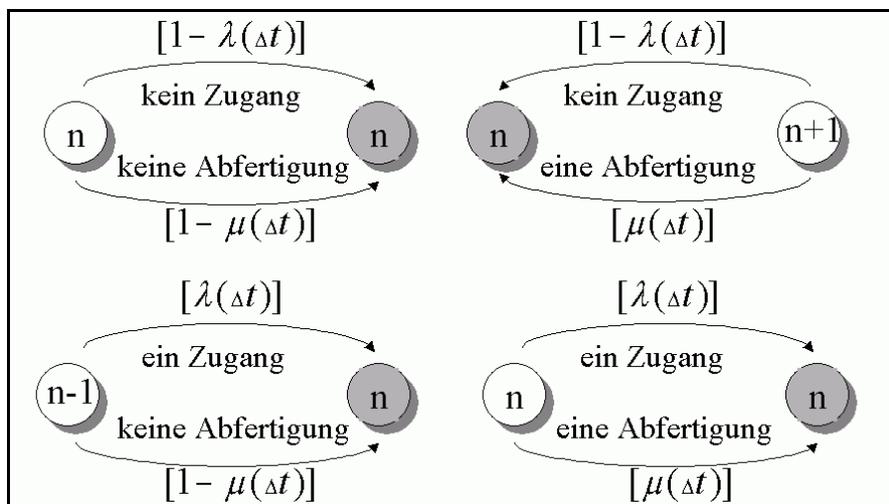


Abbildung 4-6: Zustandswechsel im Zeitintervall Δt

Formell errechnet sich die Wahrscheinlichkeit $P_n(t+\Delta t)$ von der Übergangsmöglichkeit 1 folgendermaßen:

$$P_n^{(1)}(t + \Delta t) = P_n(t) \cdot (1 - \lambda \Delta t)(1 - \mu \Delta t) \text{ oder}$$

$$P_n^{(1)}(t + \Delta t) = P_n(t) \cdot [1 - \lambda \Delta t - \mu \Delta t] + \lambda \mu \Delta t = P_n(t) \cdot [1 - \lambda \Delta t - \mu \Delta t] + o_1(\Delta t),$$

wobei $o_1(\Delta t)$ ein in zweiter Ordnung kleiner Summand ist, der später bei $\Delta t \rightarrow 0$ vernachlässigt werden soll. Die weiteren drei Übergangsmöglichkeiten werden ähnlich beschrieben:

$$P_n^{(2)}(t + \Delta t) = P_{n+1}(t) \cdot (1 - \lambda \Delta t) \cdot \mu \Delta t = P_{n+1}(t) \cdot \mu \Delta t + o_2(\Delta t),$$

$$P_n^{(3)}(t + \Delta t) = P_{n-1}(t) \cdot \lambda \Delta t \cdot (1 - \mu \Delta t) = P_{n-1}(t) \cdot \lambda \Delta t + o_3(\Delta t),$$

$$P_n^{(4)}(t + \Delta t) = P_n(t) \cdot \lambda \Delta t \cdot \mu \Delta t = o_4(\Delta t),$$

Nach dem Summieren von $P_n^{(1)}(t + \Delta t)$ bis $P_n^{(4)}(t + \Delta t)$ ergibt sich

$$P_n(t + \Delta t) = P_n(t) \cdot [1 - \lambda \Delta t - \mu \Delta t] + P_{n+1}(t) \cdot \mu \Delta t + P_{n-1}(t) \cdot \lambda \Delta t + o_1(\Delta t) + o_2(\Delta t) + o_3(\Delta t) + o_4(\Delta t)$$

und nach der Umformung

$$\frac{P_n(t + \Delta t) - P_n(t)}{\Delta t} = \lambda \cdot P_{n-1}(t) + \mu P_{n+1}(t) - (\lambda + \mu) P_n(t) + o(\Delta t)$$

Bei einem unendlich kleinen Zeitintervall Δt gilt:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_n(t + \Delta t) - P_n(t)}{\Delta t} = \lambda P_{n-1}(t) + \mu P_{n+1}(t) - (\lambda + \mu) P_n(t)$$

oder

$$\frac{dP_n(t)}{dt} = \lambda P_{n-1}(t) + \mu P_{n+1}(t) - (\lambda + \mu) P_n(t); \quad (n > 0) \quad (4-35)$$

Wenn man die Wahrscheinlichkeit $P_0(t + \Delta t)$ ermitteln will, sind im Zustandgraphen (siehe Abbildung 4-5) nur zwei Übergänge während des Zeitintervalls Δt möglich:

1. Es kam keine Forderung und es erfolgte keine Abfertigung
2. Es kam keine Forderung und es erfolgte eine Abfertigung

Mit einer ähnlichen Herleitung lässt sich die Differenzialgleichung für die Wahrscheinlichkeit des Anfangszustandes P_0 aufstellen:

$$\frac{dP_0(t)}{dt} = -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t); \quad (n = 0) \quad (4-36)$$

Die Differenzialgleichungen (4-35) und (4-36) dienen als Ausgangspunkt für die Ableitung der Kenngrößen für einstufige Bedienungssysteme mit beliebigen Charakteristika der Ankunfts- und Bedienungsprozesse. Im Falle des Markov-Prozesses (M/M/1) sind die Wahrscheinlichkeiten $P_0 \dots P_n$ stationär, d.h. unabhängig von der Zeit t . Die Gleichungen (4-35) und (4-36) werden somit vereinfacht zu:

$$\begin{aligned} \lambda P_{n-1} + \mu P_{n+1} - (\lambda + \mu) \cdot P_n &= 0, & (n > 0) \\ -\lambda P_0 + \mu P_1 &= 0, & (n = 0) \end{aligned} \quad (4-37)$$

Hieraus lassen sich alle Wahrscheinlichkeiten P_n in Abhängigkeit von P_0 ausdrücken:

$$P_n = \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n \cdot P_0$$

Aus der Bedingung $\sum_{i=0}^{\infty} P_i = 1$ und wenn $\lambda/\mu < 1$ ist (ein Bedienungskanal), folgt:

$$P_0 \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n = P_0 / [1 - \lambda/\mu] = 1$$

Infolgedessen gilt für stationäre Zustandswahrscheinlichkeiten des Systems M/M/1:

$$P_0 = 1 - \frac{\lambda}{\mu} \quad (4-38)$$

$$P_n = \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n \cdot \left(1 - \frac{\lambda}{\mu}\right) \quad (4-39)$$

Die mittlere Anzahl der Forderungen im System E_n wird ausgehend von der Wahrscheinlichkeit P_n (4-39) wie folgt ermittelt:

$$E_n = \sum_{n=0}^{\infty} n \cdot P_n = \sum_{n=0}^{\infty} n \cdot \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n \cdot \left(1 - \frac{\lambda}{\mu}\right) = \left(\frac{\lambda}{\mu}\right) \cdot \left(1 - \frac{\lambda}{\mu}\right) \cdot \left[1 + 2\left(\frac{\lambda}{\mu}\right) + 3\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^2 + \dots\right]$$

Da für einen beliebigen Wert $0 < x < 1$

$$1 + 2x + 3x^2 + \dots = \frac{1}{(1-x)^2} \text{ gilt, wird}$$

$$E_n = \frac{\lambda/\mu}{1 - \lambda/\mu} = \frac{\rho}{1 - \rho} \quad (4-40)$$

Eine weitere charakteristische Kenngröße – die mittlere Anzahl der im System wartenden Forderungen ELW (mittlere Warteschlangenlänge) – ergibt sich aus der Tatsache, dass sich im Zustand $n > 0$ genau $n - 1$ Forderungen in der Warteschlange befinden:

$$ELW = \sum_{n=1}^{\infty} (n-1) \cdot P_n = \left(1 - \frac{\lambda}{\mu}\right) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n - \left(1 - \frac{\lambda}{\mu}\right) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n = \frac{(\lambda/\mu)^2}{1 - \lambda/\mu} = \frac{\rho^2}{1 - \rho} \quad (4-41)$$

Die für den Markov-Prozess charakteristische exponentielle Verteilungsfunktion kann für die Ankunftsabstände mit Hilfe der Wahrscheinlichkeit $P(t)$, dass zu einem

Zeitpunkt t im System keine Ankunft erfolgte, nachgewiesen werden. Für die Wahrscheinlichkeit $P(t+\Delta t)$, dass sich auch zum Zeitpunkt $t+\Delta t$ keine Forderung im System befand, gilt

$$P(t+\Delta t) = P(t) \cdot (1 - \lambda \Delta t) \text{ oder } \frac{P(t+\Delta t) - P(t)}{\Delta t} = -\lambda P(t)$$

$$\lim_{t \rightarrow 0} \frac{P(t+\Delta t) - P(t)}{\Delta t} = \frac{dP(t)}{dt} = -\lambda P(t)$$

$$\text{Da } \frac{1}{P(t)} \frac{dP(t)}{dt} = \frac{d \ln P(t)}{dt}, \text{ ist } \int_{t=0}^{\infty} \frac{d}{dt} \ln P(t) = -\lambda$$

Die Lösung des Integrals lautet

$$\ln P(t) = -\lambda t + c \text{ oder } P(t) = e^{-\lambda t + c}$$

Aus der Eigenschaft $P(0)=1$ (d.h. am Anfang ist das System unbesetzt) folgt $c = 0$ und schließlich die Wahrscheinlichkeit $\hat{P}(t)$, dass zum Zeitpunkt t mindestens eine Forderung angekommen ist.

$$\hat{P}(t) = 1 - e^{-\lambda t} \tag{4-42}$$

Die Dichte der Exponentiellverteilung $p(t)$ ist:

$$p(t) = \frac{d\hat{P}(t)}{dt} = \lambda e^{-\lambda t} \tag{4-43}$$

Aus den Formeln (4-42) und (4-43) lassen sich weitere Kenngrößen ableiten, wie z.B. der mittlere Zeitabstand bis zur ersten Ankunft, die mittlere Wartezeit, oder die mittlere Verweilzeit im System.

In diesem Abschnitt wurde gezeigt, wie die wichtigsten Charakteristika eines einfachen Bedienungsmodells M/M/1 mit Hilfe der Beschreibung der Ankunftsströme und der Bedienungszeiten ermittelt werden können. In der Praxis kann man aber selten von den absolut zufälligen und unabhängigen Ankünften und Bedienungszeiten ausgehen. Deshalb versucht man, Näherungslösungen zu finden, die den Bedingungen und den Anforderungen eines realen Systems entsprechen und plausible Ergebnisse liefern können. Allein für das System Eisenbahn wurde seit POTTHOFF eine Reihe von universellen Wartemodellen entwickelt, die u.a. erfolgreich in EDV-Werkzeuge umgesetzt worden sind.

4.2.1 Näherungsansatz von Wakob

Eine Ableitung des generellen Wartemodells GI/GI/1⁸ hat WAKOB in [63] veröffentlicht. Nach einer Untersuchung der bekannten analytischen Wartemodelle zeigt er, dass eine algebraische Lösung für eine praktische Anwendung eines GI/GI/1 – Modells kaum durchführbar ist. Deswegen wurden folgende Voraussetzungen zur Erstellung und zur Kalibrierung eines Näherungsansatzes formuliert:

- Das generelle Wartemodell muss mit den speziellen Modellen M/G/1 und G/M/1 kompatibel sein
- Die Eingangsparameter müssen aus verfügbaren Unterlagen quantifizierbar sein
- Ein numerischer Algorithmus für die Berechnung der Wartezeiten in Teilfahrstraßenknoten muss nachvollziehbar sein
- Es muss eine Grundlage für die Dimensionierung des Stauraums des in Teilfahrstraßenknoten entstehenden Staus vorhanden sein

Für die Näherungslösung führt WAKOB eine Zusatzfunktion $f(VtA, VtB)$ als Variationsfaktor für das Modell M/G/1 ein, stellt mit Hilfe der Regressionsrechnung funktionale Zusammenhänge zwischen Wartezeiten aus verschiedenen Wartemodellen her und quantifiziert durch vier alternative Ansätze die Parameter der Schätzfunktionen.

$$EL_w^{G/G/1} = EL_w^{M/G/1} \cdot f(VtA^2, VtB^2) = \frac{\rho^2}{1-\rho} \cdot \frac{1+1/VtB^2}{2/VtB^2} \cdot f(VtA^2, VtB^2) \quad (4-44)$$

Die Endlösung für die Summe der Wartezeiten im Fahrplan nach WAKOB lautet:

$$\sum tW = \frac{\sum P_b \cdot f}{1-\rho} \quad (4-45)$$

wobei die Summe der Behinderungszeiten $\sum P_b$ definiert ist als:

$$\sum P_b = \sum n_{ij} \cdot (tZ_{ij} + tD_{ij})^2 \cdot N/2tU \quad (4-46)$$

Der Variationsfaktor f wird iterativ aus der folgenden Gleichung ermittelt:

$$f = \frac{v}{1-v} \cdot \frac{1-VtB^2}{2 \cdot \tau}$$

$$v_{n+1} = \left(1 + \frac{1-v_n}{kp_1} \right)^{-k}$$

⁸ Wakob bezeichnet sein Modell als G/G/1, streng genommen handelt es sich jedoch um GI/GI/1

$$p_1 = \frac{y_1 \cdot \tau^{y_2}}{y_1 \cdot \tau^{y_2} + 1}$$

$$\tau = \frac{\rho}{2 \cdot (1-\rho)} \cdot \left(1 + \frac{1}{l}\right)$$

mit den Parametern

$$y_1 = 1 - 0,806(1 - x_k) \cdot (1 - x_l) - 0,194(1 - x_k^{0,2924}) \cdot (1 - x_l^{0,2924})$$

$$y_2 = 1 - 0,1278((1 - x_k) \cdot (1 - x_l))^{1,1375}$$

$$k = \frac{1}{\sqrt{tA^2}}, \quad x_k = \frac{2}{k+1}$$

$$l = \frac{1}{\sqrt{tB^2}}, \quad x_l = \frac{2}{l+1}$$

Nach der Little-Relation $\lambda \cdot tU = N$ und $\lambda \cdot EtW = EL_w$ [1], [18] ergibt sich die mittlere Länge der Warteschlange aus EtW und tU:

$$EL_w = \frac{\sum tW}{tU} \tag{4-47}$$

Der WAKOB'sche Ansatz ist algorithmisch gut nachvollziehbar und im Programm ALFA der SLS - Programmfamilie für die Berechnung der Qualitäts- und Leistungs-kenngrößen der Teilfahrstraßenknoten implementiert. In diesem Verfahren lassen sich allerdings die Kenngrößen nur für unterzufällige bis zufällige Ankunftsabstände quantifizieren. Da im EDV-System ANKE eine direkte Ermittlung des Variationskoeffizienten der Ankunftsabstände VtA möglich sein soll, muss für $VtA > 1$ ein zusätzliches Warteschlangenmodell eingesetzt werden.

4.2.2 Wartezeiten bei $VtA > 1$

Für Fahrpläne mit starker Vertaktung (z.B. Mischung von Taktfahrplänen) oder Bündelung (z.B. beim integralen Taktfahrplan) wird der Variationskoeffizient der Ankunftsabstände VtA größer als 1. Die Lösung von WAKOB [63] macht in solchen Fällen keine genauen Aussagen, da dort für beliebige $VtA > 1$ als Ersatz $VtA = 1$ angenommen wird. Eine quasi exakte Lösung von HERTEL [25] für Wartesysteme der Form GI/GI/s liefert dagegen auch im Bereich $VtA > 1$ zuverlässige Ergebnisse.

Aus Vergleichen mit exakten Lösungen in [24] erstellte HERTEL mittels einer Regressions- und Korrelationsrechnung ein Näherungsverfahren für Wartesysteme GI/GI/1. Für $VtA > 1$ gelten in diesem Ansatz die folgenden Formeln:

Grenzwert für die Warteschlangenlänge:

$$EL_w \leq \frac{\rho^2}{2(1-\rho)} [VtA^2 + VtB^2]$$

Geschätzte mittlere Länge der Warteschlange:

$$EL_w \approx P_0 \cdot \rho \cdot G \frac{F}{(1-F)^2} \quad (4-48)$$

Faktor F: $F = \rho^G$

Wahrscheinlichkeit, dass die Bedienungsstelle (TFK) leer ist:

$$P_0 = \rho + \rho \cdot G \frac{F}{1-F}$$

$$\text{Hilfswert } G = \frac{2}{VtA^2 + VtB^2}$$

4.2.3 Erweiterte bedienungstheoretische Formel

WENDLER präsentiert in [66] ein prinzipiell neues Wartemodell zur Berechnung der planmäßigen Wartezeiten in einstelligen Bedienungssystemen (TFK) bei asynchroner Fahrplankonstruktion. Sein Verfahren, die sogenannte Light-Heavy-Traffic(LHT)-Approximation, führt zwei Ansätze zusammen: eine Light-Traffic(LT)-Approximation für niedrige Belegungsgrade und eine Heavy-Traffic(HT)-Approximation für höhere Belegungsgrade.

Im LT-Teil wird die Wartezeitfunktion $EtW(\lambda)$ an der Stelle $\lambda=0$ als TAYLOR-Approximation der zweiten Ordnung dargestellt:

$$EtW_{LT}(\lambda) = EtW(0) + \lambda \cdot EtW'(0) + \frac{\lambda^2}{2} \cdot EtW''(0) \quad (4-49)$$

$EtW(0)=0$ entspricht dem Trivialfall: wenn das System immer leer ist, entstehen auch keine Wartezeiten. Die Ableitungen $EtW'(0)$ und $EtW''(0)$ werden nach einem Verfahren von REIMAN/SIMON für beliebige Systeme M/G/1 ausgehend von den Ankunftszeitpunkten der Störforderungen a_1, a_2, \dots, a_n bestimmt. Durch die Einführung einer Hilfsgröße \hat{W} , die den bedingten Erwartungswert der Wartezeit einer Referenzforderung darstellt, unter der Voraussetzung, dass die Zeitpunkte a_1, a_2, \dots, a_n beliebig an der Zeitachse angeordnet sind, lassen sich die ersten zwei Ableitungen der Wartezeitfunktion wie folgt berechnen:

$$EtW'(0) = \int_{a_1=-\infty}^{\infty} \hat{W}(a_1) da_1 \quad (4-50)$$

$$\text{EtW}''(0) = \int_{a_1=-\infty}^{\infty} \int_{a_2=-\infty}^{\infty} [\hat{W}(a_1, a_2) - \hat{W}(a_1) - \hat{W}(a_2)] da_2 da_1 \quad (4-51)$$

In der ersten Ableitung (4-50) kommt nur eine Störforderung mit der Ankunftszeit a_1 vor. Deshalb wird das Wartemodell, das nur die erste Ableitung der Wartezeitfunktion berücksichtigt, als **Zwei-Zug-Modell** bezeichnet. Die Herleitung von $\text{EtW}'(0)$ beinhaltet zwei Zugfolgefälle, in denen der Störzug entweder als gleich-, oder als vorrangig behandelt wird, und führt im übrigen zum gleichen Ergebnis, das SCHWANHÄUßER in [48] für das System M/G/1 ermittelt hat:

$$\text{EtW}'(0) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m h_{ij} \cdot (tZ_{ij} + tD_{ij})^2 \quad (4-52)$$

Die zweite Ableitung der Wartezeitfunktion (4-51) enthält die Ankunftszeiten von zwei Störforderungen und setzt somit ein **Drei-Zug-Modell** voraus, dessen Komplexität beachtlich wächst, weil die Rangordnungen der Störzüge sowohl mit der Rangordnung des Referenzzuges, als auch untereinander verglichen werden müssen. Die Herleitung von $\text{EtW}''(0)$ erlaubt es jedoch, neben der Verbesserung der gesamten Wartezeitfunktion (4-49) auch weitere Probleme zu lösen, die mit dem Zwei-Zug-Modell nicht behandelt werden konnten. Dazu zählen:

- das **Zacken-Lücken-Problem** [48], welches in Teilfahrstraßenknoten wegen der dort zusammentreffenden unterschiedlichen Fahrstraßen auftreten kann,
- eine direkte und indirekte Verkettung von Teilfahrstraßenknoten in Gesamtfahrstraßenknoten (GFK),
- die Benutzung alternativer Fahrwege, um eventuelle Behinderungen der Züge zu vermeiden, und
- das Problem der **nicht nutzbaren Zeitlücken** bei der asynchronen Fahrplankonstruktion.

Formell lautet die Lösung für $\text{EtW}''(0)$:

$$\text{EtW}''(0) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m h_{ijk} \cdot W_{ijk}''(0), \quad (4-53)$$

wobei der Summand $W_{ijk}''(0)$ aus fünf verschiedenen Rangordnungsfällen berechnet wird, und zusätzlich innerhalb dieser Fälle noch sechs Fallunterscheidungen für das Zacken-Lücken-Problem vorhanden sind (siehe [66] mit einer detaillierten Beschreibung einzelner Fälle).

Da in der Formel (4-49) die Wartezeiten über alle Rangstufen enthalten sind, wird schließlich eine rangordnungsscharfe Zuordnung der Wartezeiten durchgeführt, um die mittleren Wartezeiten je Rangstufe berechnen zu können:

$$\text{Et}W_i'(0) = \frac{c_{(i)}^2 \cdot \text{Et}W_{(i)}'(0) - c_{(i-1)}^2 \cdot \text{Et}W_{(i-1)}'(0)}{c_i^2}$$

$$\text{Et}W_i''(0) = \frac{c_{(i)}^3 \cdot \text{Et}W_{(i)}''(0) - c_{(i-1)}^3 \cdot \text{Et}W_{(i-1)}''(0)}{c_i^3}$$

Hierbei sind

c_i der Anteil der i-ten Rangstufe am Gesamtbetriebsprogramm und

$c_{(i)}$ der Anteil der 1. bis i-ten Rangstufen am Gesamtbetriebsprogramm.

Die mittlere Wartezeit der i-ten Rangstufe lässt sich somit analog zu (4-49) angeben:

$$\text{Et}W_{\text{LT},i} = \lambda_i \cdot \text{Et}W_i'(0) + \frac{\lambda_i^2}{2} \cdot \text{Et}W_i''(0)$$

Da der Bereich hoher Belegungsgrade mit der Light-Traffic-Approximation nicht abgedeckt werden kann, greift WENDLER zusätzlich auf eine geschlossene Lösung für Bedienungssysteme mit PR(preemptive repeat)-Disziplin für das Modell M/GI/1 von GNEDENKO zurück (HT-Approximation). Diese Lösung eignet sich auch für die Modellierung der asynchronen Fahrplankonstruktion und berücksichtigt dabei die Auswirkungen von nicht nutzbaren Zeitlücken, wobei sie jedoch der asynchronen Philosophie bei höheren Rangklassen und kleineren Belegungsgraden widerspricht. Sie stellt aber immerhin eine bessere Alternative als die LT-Approximation im Heavy-Traffic-Bereich dar.

Die mittlere Wartezeit der i-ten Rangstufe für die Heavy-Traffic-Approximation wird wie folgt berechnet:

$$\text{Et}W_{\text{HT},i} = \frac{\lambda_i \cdot \text{EG}_i^2 (1 + \lambda_{(i-1)} \cdot \text{ES}_{(i-1)}) + \lambda_{(i-1)} \cdot \text{ES}_{(i-1)}^2 (1 - \lambda_i \cdot \text{EG}_i)}{2(1 - \lambda_i \cdot \text{EG}_i) \cdot (1 + \lambda_{(i-1)} \cdot \text{ES}_{(i-1)})} + \text{EG}_i - \text{EB}_i \quad (4-54)$$

mit

λ_i - Ankunftsintensität der i-ten Rangstufe

$\lambda_{(i-1)}$ - Ankunftsintensität des Summenstroms der ersten bis zur (i-1)-ten Rangstufe

$\text{EG}_i, \text{EG}_i^2$ - Momente der Gesamtbedienungszeit der Forderungen der i-ten Rangstufe

$\text{ES}_{(i-1)}, \text{ES}_{(i-1)}^2$ - Momente der zeitlichen „Dicke“ eines Trassenbündels der ersten bis zur (i-1)-ten Rangstufe

$\text{EB}_{(i-1)}, \text{EB}_{(i-1)}^2$ - Momente der Bedienungszeiten über alle Züge der ersten bis zur (i-1)-ten Rangstufe

Die Zusammenfassung der LT-Approximation mit der HT-Approximation wird nach dem Verfahren von REIMAN/SIMON durchgeführt. Die endgültige Formel der Wartezeitfunktion der k-ten Rangstufe der LHT-Approximation lautet

$$\text{Et}W_{\text{LHT},k} = \lambda_k \cdot \text{Et}W'_k(0) + \frac{\lambda_k^2}{2} \text{Et}W''_k(0) + \frac{\lambda_k^2}{\lambda_{\text{max},k}^2} \text{Et}W_{\text{HT},k},$$

mit $\lambda_{\text{max}} = \mu$.

4.3 Perspektiven der EDV-Umsetzung von analytischen Verfahren

Es stellt sich die Frage, welche von den in diesem Kapitel vorgestellten analytischen Verfahren für eine Realisierung im Programm ANKE zur Auswahl stehen. In beiden Fällen (Betrieb und Fahrplan) existieren zur Zeit verbesserte Alternativen zu den in STRELE bzw. ALFA verwendeten Ansätzen. Ob diese Alternativen an Stelle der u.a. von der DB AG anerkannten Verfahren ohne weiteres eingesetzt werden können, ist nicht leicht abzuschätzen.

Die rangordnungsscharfe Formel von SCHWANHÄÜßER für die Berechnung von Folgeverspätungen im Betrieb (Abschnitt 4.1.2) erweckt dabei am wenigsten Zweifel, weil ihre Kompatibilität zu der summarischen STRELE-Formel bewiesen worden ist. Zwar liefert das neue Verfahren etwas pessimistischere Aussagen (vgl. Anlage A), dies wird aber durch die Verwendung angepasster Qualitätsvorgaben kompensiert (siehe Abschnitt 9.1).

Was den Fahrplanzustand betrifft, eignet sich die quasi-exakte bedienungstheoretische GI/GI/1-Lösung von HERTEL (Abschnitt 4.2.2) im Gegenteil zum in ALFA verwendeten Näherungsverfahren von WAKOB (Abschnitt 4.2.1) nur für höhere Belegungsgrade. Dennoch ist das Verfahren von HERTEL im Bereich $VtA > 1$ der WAKOB'schen Lösung vorzuziehen, so dass es für solche Situationen als Ergänzung implementiert werden kann. Es ist dann mit einem Nebeneffekt, dem Sprung der Wartezeitfunktion in der Nähe von $VtA=1$, zu rechnen. Ob dieser Effekt zur falschen Interpretation der Wartezeiten führen kann, wird in Anlage C überprüft.

Die zuletzt vorgestellte LHT-Approximation der Wartezeitfunktion von WENDLER (Abschnitt 4.2.3) ist sehr innovativ. Sie bewältigt viele zuvor ungelöste Probleme der analytischen Modellierung und verspricht dadurch eine deutlich höhere Präzision bei Aussagen über die planmäßige Wartezeit. Das neue Verfahren enthält in Form der ersten Ableitung der Wartezeitfunktion die M/G/1-Lösung von SCHWANHÄÜßER [48] und ist dadurch erwartungsgemäß auch zu dem Näherungsverfahren von WAKOB kompatibel. Ein wesentlicher Unterschied dieses Modells ist die Auslegung des Ankunftsstromes. Hier wird nämlich vom rein MARKOV'schen Ankunftsprozess

ausgegangen, weswegen einige externe Einflussmöglichkeiten, wie Vorgabe des Variationskoeffizienten der Ankunftsabstände oder Berücksichtigung der Fahrtenfrequenzen, unwirksam werden. Das Verfahren geht von einer grundsätzlich zufälligen Nachfragestruktur aus. In der Realität ergeben sich jedoch Fahrplanstrukturen, die diese gewaltsam verändern und dadurch auf die Eisenbahnbetriebsanlagen doch andersartige Nachfrageströme zulaufen lassen, z.B. bei Integralelem Taktfahrplan oder der Mischung von Strömen nach vorgelagerten Engpässen, die eine Berücksichtigung von $VtA \neq 1$ erfordern.

Programmtechnische Umsetzung des WENDLER'schen Verfahrens könnte außerdem wegen seiner immensen Komplexität sehr aufwendig und fehleranfällig sein. In erster Linie erscheint eine zuverlässige Plausibilitätskontrolle von den unzähligen Komponenten dieses Verfahrens sehr umständlich. Außerdem erfolgte die Veröffentlichung der LHT-Approximation kurz vor der Fertigstellung von ANKE, so dass eine so gründliche und aufwendige Änderung des Programms nicht mehr in Frage kommen konnte.

4.4 Wartezeiten als Bestandteile der Beförderungszeiten

In diesem Kapitel sind Modelle und Algorithmen zur Ermittlung von Qualitäts- und Leistungskenngrößen im Eisenbahnbetrieb, insbesondere Wartezeiten, vorgestellt worden, die im EDV-System ANKE verwirklicht werden sollen.

Bevor die theoretischen und technischen Aspekte der Implementierung beschrieben werden, wird nun zunächst für eine bessere Verständlichkeit auf die Bedeutung von Wartezeiten als Beförderungszeitanteile eingegangen.

Bei der Planung und Durchführung des Eisenbahnbetriebes entstehen für jede Beförderungseinheit (Zugfahrt, Rangierfahrt, Lokleerfahrt) Beförderungszeitanteile, deren Struktur in Abbildung 4-7 dargestellt ist.

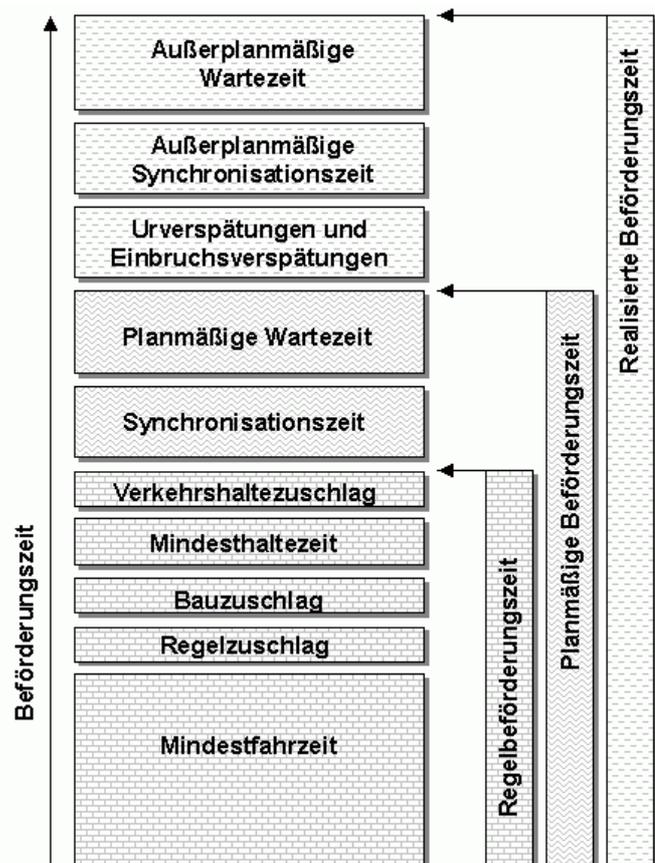


Abbildung 4-7: Anteile der realisierten Beförderungszeit

Sowohl im Planungsprozess als auch im Betriebsablauf setzen sich die benötigten Zeiten aus Anteilen für die Fahrzeit und die Haltezeit zusammen. Die **Regelbeförderungszeit** eines Zuges besteht aus:

- der **reinen Fahrzeit**, die unter Ausnutzung der Zugkraft und Beachtung der zulässigen Geschwindigkeiten und weiteren fahrdynamischen Bedingungen realisiert werden kann,
- dem prozentualen **Regelzuschlag**, der auf dem Konstruktionsabschnitt in Abhängigkeit von der Bespannung, der Anhängelast und der zulässigen Geschwindigkeit festgelegt wird und dem Ausgleich von unstabilen äußeren Einflüssen dient,
- dem **Bazuschlag**, der Fahrzeitverluste ausgleichen soll, die durch Maßnahmen zur Instandsetzung der Infrastruktur auftreten,
- der **Mindesthaltezeit**, die wiederum die **Verkehrshaltezeit** (im Personenverkehr für den Fahrgastwechsel bzw. im Güterverkehr zum Abkuppeln und Umsetzen von Wagengruppen erforderlich), die **Betriebshaltezeit** (für betriebliche Handlungen wie Triebfahrzeugwechsel) und die **Abfertigungszeit** des Zuges enthält, und
- dem **Verkehrshaltezeitzuschlag**, ebenfalls einer Art Toleranz für die äußeren Einflüsse.

Die planmäßige Beförderungszeit besteht zusätzlich aus:

- der planmäßigen **Synchronisationszeit**, welche zur verkehrlichen Abstimmung einer Zugfahrt auf eine oder mehrere Fahrten (z.B. zum Herstellen von Anschlüssen in Personenbahnhöfen oder zur Takteinhaltung) dient, und
- der planmäßigen Wartezeit. Hierunter versteht man eine Beförderungszeitverlängerung, die bei der Konstruktion eines Fahrplangefüges infolge von Behinderungen der betrachteten Zugtrasse durch andere Züge entsteht. Solche Behinderungen entstehen beim Einfädeln in ein Streckengleis in gleicher Richtung oder in ein Bahnhofsgleis, durch das Kreuzen auf eingleisiger Strecke, infolge von Überholungen, oder bei Behinderungen durch belegte Fahrstraßen („Stutzen“).

Die aus Behinderungen entstandenen Wartezeiten werden im Form von betrieblichen Haltezeitverlängerungen, Fahrzeitverlängerungen oder zusätzlichen Betriebshalten (nur bei Güterzügen) in den Fahrplan eingearbeitet. Die Summe der Wartezeiten, die in einem Fahrplan enthalten sind, ist daher als Folge der Dichte eines Fahrplans ein Maß für seine Flexibilität gegenüber Verkehrsschwankungen und -störungen. Die Wartezeiten im Fahrplan stehen bei der Betriebsabwicklung i.A. als Pufferzeiten zur Verfügung.

Bei der Realisierung eines Fahrplans entstehen im Betriebsablauf unterschiedliche Fahrplanabweichungen, die zur Verlängerung oder auch zur Verkürzung der planmäßigen Beförderungszeit führen:

- **Urverspätungen** als Überschreitungen der planmäßigen Beförderungszeiten, die infolge einer Störung von Anlagen, Betriebsmitteln bzw. wegen der von Menschen verursachten Störungen, oder sonstiger ungeplanter Ereignisse entstehen
- **Einbruchsverspätungen** sind Abweichungen vom Fahrplan, die bereits am Beginn eines Betrachtungsraums bestehen
- Die **außerplanmäßige Synchronisationszeit** ist die positive oder negative Abweichung von der planmäßigen Synchronisationszeit
- Die **außerplanmäßige Wartezeit** ist die Abweichung von der planmäßigen Beförderungszeit, die durch Behinderungen von Zugtrassen infolge der Ur-, Einbruchs- oder Folgeverspätungen entsteht

Analytische Modelle erlauben in erster Linie sowohl planmäßige als auch außerplanmäßige Wartezeiten zu quantifizieren. Im Betrieb können außerplanmäßige Wartezeiten wie bereits erwähnt durch die Wartezeiten im Fahrplan teilweise kompensiert werden, was jedoch nur eine Simulation mit genau vorgegebenen einzelnen Zugfahrten nachvollziehen kann. Die analytische Modellierung beschränkt sich auf eine getrennte Auswertung der Fahrplan- und Betriebslage. Die ermittelten Wartezeiten werden danach mit den Qualitätsvorgaben (siehe Kapitel 9) verglichen.

5 Teilfahrstraßenknoten

Die im vorigen Kapitel beschriebenen Algorithmen sollen nun für die Ermittlung der Qualitäts- und Leistungskenngrößen von Elementen der Eisenbahnanlagen, der Teilfahrstraßenknoten, implementiert werden. Nach SCHWANHÄÜBER [48] sind die Teilfahrstraßenknoten (TFK) jene Teile der Eisenbahnanlagen, in denen sich alle Fahrten gegenseitig ausschließen (vgl. Abschnitt 3.1). Um mit den Modellannahmen der Bedienungstheorie zu übereinstimmen, müssen TFK folgende Grundvoraussetzungen für einstellige Bedienungssysteme vom Typ GI/GI/1 bzw. M/G/1 erfüllen:

1. Bedienungsdiziplin FIFO setzt voraus, dass die im System in einer bestimmten Reihenfolge eintreffenden Forderungen in der gleichen Reihenfolge bedient werden.
2. Warteraum für die Forderungen muss immer verfügbar und in seiner Aufnahmekapazität unbegrenzt sein.
3. Es können keine zwei Forderungen im System gleichzeitig zur Bedienung zugelassen werden.
4. Bedienungszeiten müssen voneinander und vom Systemzustand unabhängig sein.
5. Keine im System eingetroffenen Forderungen dürfen verloren gehen. Sie müssen, ggf. auch bei einer unendlichen Warteschlangenlänge, alle bedient werden (verlustfreies Bedienungssystem).

Die Bedingung 1 kann nur dann erfüllt werden, wenn sich die Fahrtenreihenfolge nicht ändern lässt, sobald die Fahrten im System eingetroffen sind. Demzufolge sollen die Überholungsmöglichkeiten außerhalb des Bedienungssystems liegen. Es ist in der Tat so, dass bei Belegung des Weichenbereiches im TFK keine andere Fahrt eintreffen darf. Eine Ausnahme besteht dann, wenn die zweite Fahrt in einem größeren Zeitabstand als der Mindestzugfolgezeit eintrifft. Dann gilt die Bedienung der ersten Fahrt als abgeschlossen und die FIFO-Disziplin wird auf jeden Fall beibehalten. Auf der anderen Seite finden die Reihenfolgewechsel in Bahnhöfen auf Wartepositionen statt, die laut Definition des Bedienungssystems als Warteräume die Bestandteile der Bedienungssysteme sind. Der vermeintliche Widerspruch gilt nicht für die exakte analytische Lösung von WENDLER, da dort eine asynchrone Fahrplan-konstruktion modelliert wird, in deren einzelnen Rechnungsphasen nur gleichrangige Fahrten ohne Reihenfolgewechsel einbezogen werden. Für die Verfahren von SCHWANHÄÜBER, WAKOB und HERTEL lässt sich eine Erklärung des FIFO-Paradoxons formulieren, die hier im Abschnitt 5.2 im Zusammenhang mit dem abstrakten Ankunftsprozess gegeben wird.

Die Bedingung 2 enthält die Forderung, dass alle Bahnhöfe auf ihren Wartepositionen unendlich viel Züge aufnehmen können. In der Realität lässt sich diese Forderung natürlich nicht erfüllen, aber unter der Voraussetzung, dass im Betriebsablauf die Fahrtenausschlüsse und nicht die Bahnhofsgleise mit Wartepositionen eventuelle Engpässe darstellen, lässt sich annehmen, dass die Gleiskapazität für die Warteschlangenbildungen unter allen Umständen ausreichend ist. In der Praxis, wenn der zur Verfügung stehende Warteraum überschritten wird, entsteht ein Rückstau in rückliegende Bahnhöfe. Das Leistungsverhalten des Bedienungskanals wird dadurch nicht verändert. Mit anderen Worten ist die Unbegrenztheit des Warteraums die Folge eines in einem theoretisch unendlich großen Netz unbegrenzten möglichen Staus. In fraglichen Situationen ist zu empfehlen, andere Wartemodelle explizit zur Bestimmung der erforderlichen Gleisanzahl einzusetzen.

Zur Erfüllung der dritten Bedingung ist eine besondere Vorgehensweise bei der Abgrenzung von Teilfahrstraßenknoten erforderlich, um alle Möglichkeiten für Parallelfahrten auszuschließen. Ein graphentheoretischer Ansatz zur Lösung dieses Problems wird im nächsten Abschnitt ausgearbeitet.

Die Bedienungszeiten (Bedingung 4) werden generell durch die Mindestzugfolgezeiten bestimmt und können näherungsweise als unabhängig voneinander betrachtet werden. Dabei gilt die folgende Regel: Je homogener die Ankunftsströme sind, desto gleichmäßiger sind die Mindestzugfolgezeiten, und die Unterschiede zwischen ihnen können als rein zufällig und folglich als unabhängig behandelt werden. Die Homogenität der Ankunftsströme wird durch Einteilung des Untersuchungszeitraums im allgemeinen in zwei Phasen mit möglichst einheitlichen Forderungsarten erreicht (siehe Abschnitt 10.4) Ferner sollen die Teilfahrstraßenknoten nach ihrer Abgrenzung keine gemeinsamen Elemente besitzen, um die Unabhängigkeit der Wartesysteme voneinander zu gewährleisten.

Die Verlustfreiheit (Bedingung 5) ist eine natürliche Eigenschaft von Eisenbahntriebssystemen. Im Gegensatz zum klassischen Bedienungssystem, einer automatischen Gesprächsvermittlungsanlage, in der die Gesprächswünsche bei der besetzten Leitung abgewiesen werden, können die Züge vor belegten Gleisbereichen nicht aus dem System entfernt werden. Bei der asynchronen Fahrplankonstruktion bzw. -simulation können dennoch bestellte Trassen, für die keine akzeptablen Konfliktlösungen ohne wesentliche Beförderungszeitverluste zu finden sind, gestrichen werden. Dieser Effekt trifft bei der analytischen Modellierung aber nicht zu: Erstens wird jede (auch sehr große) zeitliche Verschiebung der Zugtrassen zugelassen und als Wartezeit im Fahrplan interpretiert. Zweitens lässt die angenommene theoretische Unbegrenztheit der Warteräume (Bedingung 2) die Aufnahme beliebig vieler Züge in der Eisenbahnanlage zu.

5.1 Algorithmen zur Abgrenzung von TFK

Laut Definition des Teilfahrstraßenknotens müssen sich alle Fahrten in einem TFK ausschließen. Der Wartevorgang findet schon im Bedienungssystem selbst, aber noch vor der Bedienungsstelle statt (vgl. Abbildung 5-19). Die Bedienungszeiten sind wiederum von den an den Punkten, wo sich die Fahrten treffen, gemessenen Mindestzugfolgezeiten⁹, abhängig. Daher ist es sinnvoll, die Gleisbereiche, in denen sich die Fahrten behindern, als **Bedienungsstellen** oder **Bedienungskanäle** zu bezeichnen. Diese Bereiche werden durch die Abzweigstellen der Gleisanlagen, d.h. durch Weichen und Kreuzungen begrenzt. Ein TFK-Bedienungskanal ist demzufolge eine Menge von Weichen und Kreuzungen, in der es keine parallelen Fahrten oder Fahrtmöglichkeiten gibt und wo kein Reihenfolgewechsel durch einen Wartevorgang (Überholung) möglich ist.

In Abbildung 5-1 ist ein TFK x für drei Fahrten als grauer Bereich dargestellt¹⁰. Wenn eine der Fahrten mindestens eine der Weichen des TFK belegt, schließt sie automatisch alle anderen Fahrten aus. Die Haltepositionen, die die Züge nutzen können, bis die Einfahrt in die Bedienungsstelle TFK freigegeben wird, liegen außerhalb des Bedienungskanals.

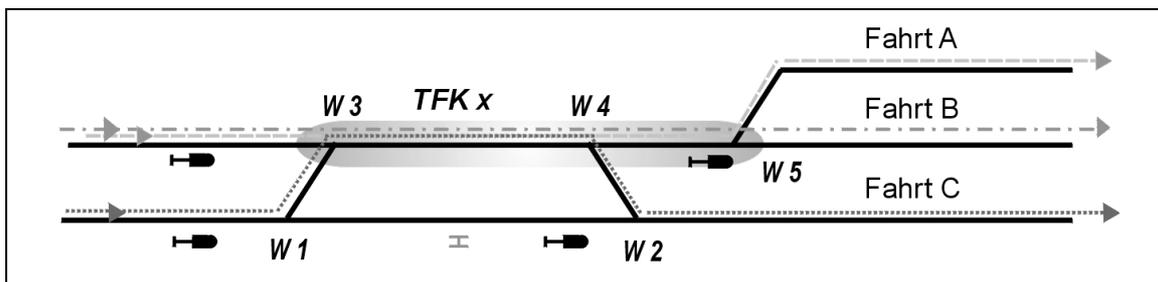


Abbildung 5-1: TFK als Ausschlussbereich für drei Fahrten

Prinzipiell repräsentiert eine einzige Weiche bzw. Kreuzung einen elementaren Teilfahrstraßenknoten. Um jedoch möglichst viele Fahrten in das Bedienungssystem einzubeziehen und somit die Systemvorgänge vollständig abzubilden, müssen einzelne Weichenelemente in größeren TFK nach bestimmten Kriterien zusammengefasst werden. Wenn z.B. die Weiche W5 (Abbildung 5-1) als ein unabhängiger TFK betrachtet wird, wird die Fahrt C im System nicht erfasst, was zur Unterschätzung der Systembelastung führt. Allerdings ist aus dem Gleisplan gut zu erkennen, dass alle Fahrten, die die Weiche W5 belegen, auch zwei weitere Weichen, nämlich W3 und W4, belegen. Hieraus lassen sich einige einfache Regeln für eine logische **infrastrukturbezogene** TFK - Abgrenzung erarbeiten und algorithmisch beschrei-

⁹ Eine exakte Definition der Mindestzugfolgezeit wird im Kapitel 7 gegeben

¹⁰ Es sind eventuell auch weitere TFK in diesem Beispiel vorhanden

ben. Diese Regeln sind im EDV-System ALFA implementiert und werden hier ausgehend von der Analyse der Graphenstruktur der Eisenbahnanlagen formuliert und erweitert.

5.1.1 Laufwegbezogene TFK-Abgrenzung

Im vorgestellten Beispiel (Abbildung 5-1) erscheint es sinnvoll, auch die beiden Weichen W_1 und W_2 des unteren Gleises dem TFK x zuzuordnen, weil sie durch die Fahrt C mit allen weiteren Weichen der dargestellten Gleisanlage verbunden sind. Eine solche logische Überlegung bildet die Grundlage für eine alternative Art der TFK-Abgrenzung – die laufwegbezogene Abgrenzung.

Bei der laufwegbezogenen TFK-Abgrenzung alle Weichen und Kreuzungen, die von sich gegenseitig ausschließenden Fahrten belegt werden, einem TFK zugeteilt. Die Weichenelemente, die ohnehin nicht befahren werden, lassen sich einfach aus den Systemen und entsprechend aus den Berechnungen ausschließen. Ein Algorithmus für die laufwegbezogene TFK- Abgrenzung lässt sich wie folgt beschreiben:

1. Es wird eine beliebige Weiche genommen und in der Menge W gespeichert. Alle Fahrten, die diese Weiche belegen, werden in einer Menge F vermerkt.
2. Eine Fahrt wird der Menge F entnommen und eine andere Weiche W_i , die diese Fahrt belegt, wird ausgesucht
3. Es werden alle Fahrten gesammelt, die diese Weiche W_i belegen, aber nicht in der Menge F enthalten sind
4. Falls sich alle diese Fahrten paarweise mit allen Fahrten der Menge F im Überholungsabschnitt, in dem die Weichen der Menge W liegen, ausschließen, werden alle im Schritt 3 ermittelten Fahrten auch in der Menge F gespeichert. Die Menge W um die Weiche W_i erweitert.
5. Schritte 1 bis 4 werden für alle Fahrten der Menge F und alle Weichen, die durch diese Fahrten in dem aktuellen Überholungsabschnitt belegt werden, wiederholt.

Am Ende enthält die Menge W alle Weichen, die zu einem TFK gehören. Andere Weichen des Überholungsabschnittes müssen in anderen Teilfahrstraßenknoten zusammengefasst werden

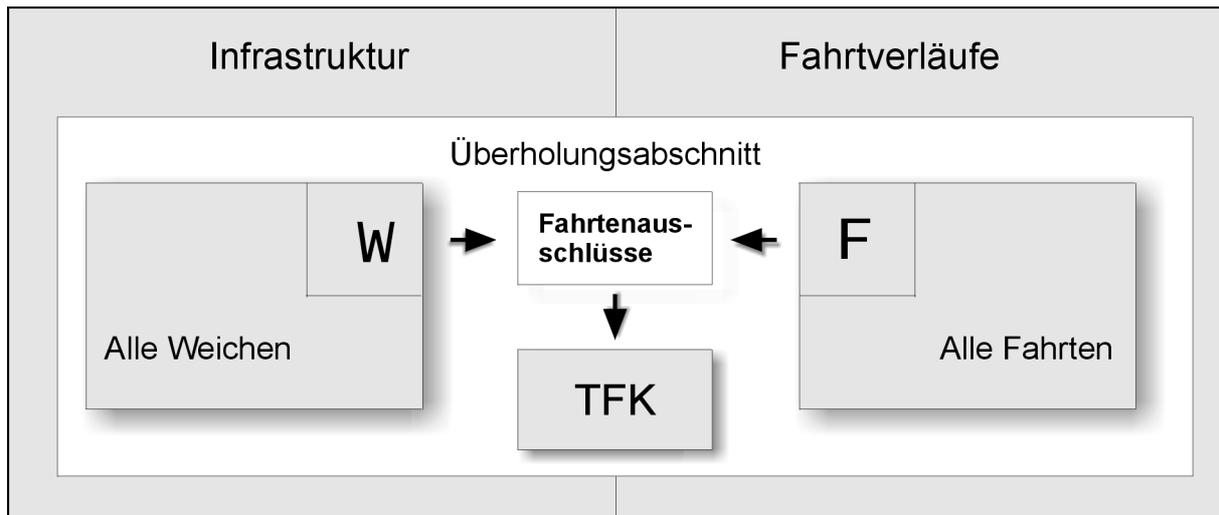


Abbildung 5-2: Abhängigkeiten bei der laufwegbezogenen TFK-Abgrenzung

Zu den Vorteilen dieses Verfahrens zählen:

- die vollständige Einbeziehung aller Ausschlussbereiche in die Teilfahrstraßenknoten, abhängig vom jeweiligen Betriebsprogramm. Dies erlaubt eine maximal mögliche genaue Übertragung der Grundsätze der Warteschlangentheorie auf das Bedienungssystem TFK
- ein schneller und einfacher Aufbau der Matrizen mit Fahrtenausschlüssen und Mindestzugfolgezeiten nach der Abgrenzung, weil die Zugmengen in den TFK bereits bekannt sind

Es existieren dennoch bedeutende Nachteile gegenüber dem infrastrukturbezogenen Verfahren:

- Komplexität, die durch die Einbeziehung verschiedener Überholungsabschnitte entsteht, und eine dadurch verursachte lange Rechenzeit
- nicht eindeutige Struktur der TFK, die immer abhängig von der Wahl der ersten Weiche und des ersten Zuges ist
- Notwendigkeit, nach jeder Änderung der Zuglaufwege, die Teilfahrstraßenknoten neu abzugrenzen
- erschwelter Variantenvergleich durch eine sich ständig ändernde TFK-Struktur

Als besonders schwerwiegend erweist sich der letzte Punkt, da bei einer automatischen Abgrenzung in größeren Teilen des Eisenbahnnetzes Tausende von Teilfahrstraßenknoten entstehen können. Jedem von ihnen wird eine Identifikationsnummer oder -bezeichnung gegeben, wobei diese sich bei jeder Änderung der TFK-Struktur, auch gleichzeitig ändern. Anhand der in den TFK enthaltenen Weichen lassen sich die ursprünglichen Knoten zwar wieder identifizieren, aber die Anzahl der Weichen kann ebenfalls variieren, so dass ein Vergleichsprozess unübersichtlich wird. Dies ist einer der Hauptgründe, warum in dieser Arbeit nach einigen experimen-

tellen Versuchen auf die laufwegbezogene TFK-Abgrenzung verzichtet wurde. Die gesamte Aufmerksamkeit wird auf eine graphentheoretische Lösung für die infrastrukturbezogene Abgrenzung gelegt.

5.1.2 Fahrstraßenabhängige TFK-Abgrenzung

Es käme noch eine Lösung für die Suche nach Infrastrukturbereichen mit vollständigen Fahrtenausschlüssen in Frage – eine fahrstraßenabhängige TFK-Abgrenzung. Dafür werden die Weichengruppen zusammengefasst, die aufgrund der im Stellwerk einstellbaren Fahrstraßen nicht von zwei Zügen gleichzeitig befahren werden können. Abbildung 5-3 zeigt ein einfaches Beispiel für die Fahrstraßenverläufe in einem Stellwerk mit vier sich unterschiedlich ausschließenden Fahrstraßen.

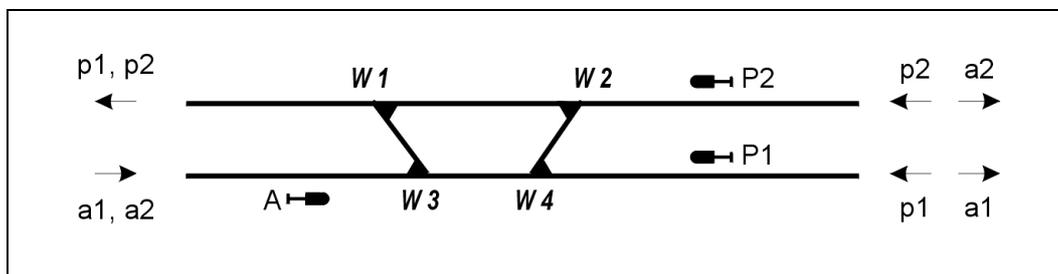


Abbildung 5-3: Fahrstraßentopologie eines Stellwerks

Analog zu dem Verschlussplan im Stellwerk kann für dieses Beispiel eine Fahrstraßenmatrix aufgebaut werden, in der die Fahrstraßenausschlüsse und die belegten Weichen gekennzeichnet werden (Tabelle 5-1).

		Fahrstraßen				Weichen			
		a1	a2	p1	p2	W1	W2	W3	W4
Fahrstraßen	a1	X	X	X				X	X
	a2	X	X	X	X		X	X	X
	p1	X	X	X	X	X		X	X
	p2		X	X	X	X	X		

Tabelle 5-1: Fahrstraßenausschlussmatrix

In der Fahrstraßenausschlussmatrix müssen zunächst alle Teilmatrizen gefunden werden, in denen sich alle Fahrstraßen gegenseitig ausschließen. Der graue schattierte Bereich a1-a2-p1 in Tabelle 5-1 entspricht einer der zwei möglichen Teilmatrizen für das Beispielstellwerk. Falls es Weichen gibt, die von allen Fahrstraßen der Teilmatrix benutzt werden, gehören sie eindeutig zu einem TFK (hier sind es die Weichen W3 und W4). Der zweiten Teilmatrix a2-p1-p2 kann dagegen keine vollständige Weichengruppe zugeordnet werden, deshalb werden die Weichen W1 und W2 als eigenständige Teilfahrstraßenknoten betrachtet.

Formell ist die fahrstraßenbezogene Abgrenzung von TFK wie folgt zu interpretieren: F sei die Menge aller Fahrstraßen des TFK und f_x bzw. f_y zwei beliebige Fahrstraßen. Dann bedeutet $f_x \wedge f_y$, dass sich die Fahrstraßen x und y ausschließen. Für einen TFK gilt:

$$\forall f_x, f_y \in F, f_x \wedge f_y \quad (5-1)$$

Zusätzlich dürfen die mit Hilfe von Fahrstraßen abgegrenzten TFK keine Wartepositionen enthalten.

Die fahrstraßenabhängige TFK-Abgrenzung verspricht zwar mehr Stabilität als die laufwegbezogene, weil die Topologie der Fahrstraßen im Stellwerk wesentlich seltener als die Fahrtenverläufe geändert wird. Dennoch würde eine Reihe von SPURPLAN-Systemeigenschaften die Realisierung des beschriebenen Algorithmus deutlich erschweren: Die Fahrwege in SPURPLAN entsprechen in der Regel nicht den Stellwerkfahrstraße. Wenn die Fahrwege in Höhe der Haltepositionen in Fahrstraßen eingeteilt werden, könnten für zwei Fahrwege mit dem gleichen Verlauf verschiedene Haltepunkte vorgegeben werden. In diesem Fall wäre die Teilung und folglich die TFK-Abgrenzung nicht eindeutig. Ferner müssten die angrenzenden Fahrwege an den Betriebsstellengrenzen kombiniert werden, was die Struktur der Fahrstraßenausschlussmatrix viel komplexer machen würde.

Vor allem aber liefert der fahrstraßenabhängige Algorithmus alleine noch keine optimale TFK-Struktur. Im vorgeführten Beispiel können z.B. die Weichen $W1$ und $W2$ als ein Teilfahrstraßenknoten interpretiert werden, weil alle möglichen Fahrten im System entweder über diese beiden Weichen führen oder sich im Bereich zwischen den Weichen $W3$ und $W4$ ausschließen. Solche „Trapezstrukturen“ müssten auf jeden Fall extra anhand der Weichenlagen, also infrastrukturbezogen analysiert werden.

5.1.3 Infrastrukturbezogene TFK-Abgrenzung

Im SPURPLAN-Graphen besteht jede Weiche aus drei und jede Kreuzungsweiche und Kreuzung aus vier Knoten, wobei die Fahrtmöglichkeiten in Kreuzungsweichen durch zusätzliche Kantenverbindungen dargestellt werden (siehe Abbildung 5-4). Da in einer Kreuzungsweiche keine Parallelfahrten zwischen den Punkten A-C und B-D durchführbar sind, ist für die TFK-Abgrenzung die Einführung einer Ersatzkreuzung für alle Kreuzungsarten mit einem Zusatzknoten in der Mitte sinnvoll. Die Ersatzkreuzung ist im Grunde eine doppelte Kreuzungsweiche und stellt alle denkbaren Verbindungen zwischen den Knotenpaaren A, B und C, D. Da alle Kreuzungsknoten aus dieser Sicht wie einfache Weichenknoten behandelt werden können, werden sie hier einheitlich als Weichenelemente oder Weichenknoten bezeichnet.

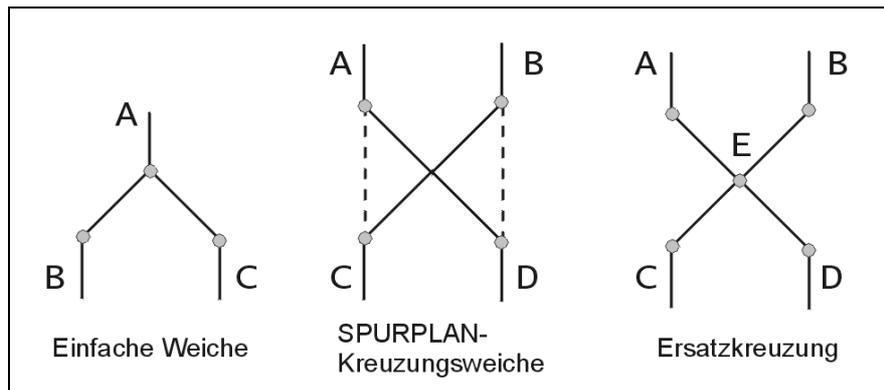


Abbildung 5-4: Graphendarstellung von Weichen und Kreuzungsweichen

Die Aufgabe für die infrastrukturbezogene TFK-Abgrenzung lautet: möglichst viele Weichenknoten so zusammenzufassen, dass innerhalb solcher Teilgraphen keine parallelen Fahrmöglichkeiten existieren und keine Zugreihenfolgewechsel stattfinden können. Dabei entspricht eine Fahrmöglichkeit nicht immer einem möglichen Weg im Graphen, obwohl der Infrastruktur-Graph in Hinblick auf die Zugfahrten ein doppeltgerichteter Graph ist, d.h. falls eine Fahrmöglichkeit von einem Punkt A zu einem benachbarten Punkt B besteht, dann ist der Punkt A genauso vom Punkt B aus erreichbar. In der einfachen Weiche (Abbildung 5-4 links) existieren beispielsweise die Fahrmöglichkeiten B-A und A-C. Die Kantenreihenfolge B-A-C entspricht dann einem möglichen theoretischen Weg im Graphen, aber nicht einer vorhandenen Fahrmöglichkeit (Es sei denn, ein Zug hält hinter dem Punkt A und fährt dann rückwärts über den Punkt C. Ein solcher Richtungswechsel mit Doppelbelegungen ist aber in SPURPLAN ausgeschlossen. Hierfür müssen zwei unabhängige Zugfahrten definiert werden.)

Um das Erkennen von Fahrmöglichkeiten im Infrastrukturgraphen zu ermöglichen, wird der gerichtete Graph der Gleisverbindungen zusätzlich in besondere **Schichten** geteilt, wobei benachbarte Weichenknoten immer in verschiedenen Schichten liegen, und die Fahrmöglichkeiten aus den Sequenzen der Übergänge nur in einer Richtung bestehen. Wenn man von den oben angesprochenen Wendemöglichkeiten und den geschlossenen Zyklen absieht (azyklischer Graph), kann eine Zugfahrt die Schichten des Teilgraphen ausschließlich in der aufsteigenden oder in der absteigenden Reihenfolge passieren. Zur weiteren Vereinfachung werden hier nur die Fahrmöglichkeiten einer Richtung betrachtet, die den Graphen in aufsteigender Schichtenreihenfolge durchlaufen (Mögliche Fahrten der anderen Richtung sind zu den betrachteten symmetrisch und verursachen gleiche Ausschlüsse). Ferner werden alle Knoten, die keine Nachbarn in der niedrigeren Schicht haben, als **Quellen** oder Eingänge ins System bezeichnet. Entsprechend sind die Weichenknoten ohne Nachbarn in der nächsthöheren Schicht als **Senken** (Ausgänge) zu interpretieren. Da die Haltepositionen vorab aus dem Teilfahrstraßenknoten-System

herausgenommen werden, fängt eine beliebige Fahrt immer an einer Quelle des Teilgraphen an und endet entsprechend immer an einer Senke.

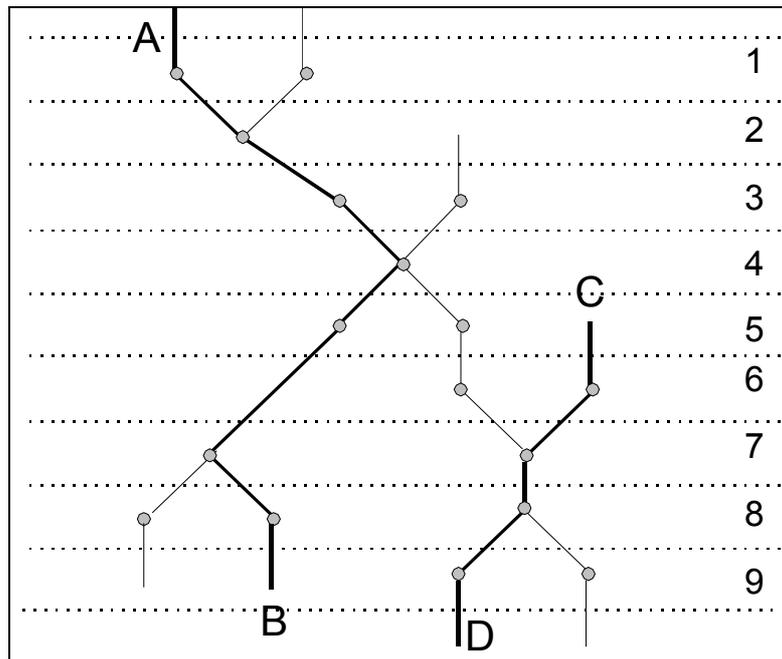


Abbildung 5-5: Schichtendarstellung des Infrastrukturgraphen

Abbildung 5-5 veranschaulicht die Konzeption des in Schichten unterteilten Infrastrukturgraphen. Das dargestellte System besitzt vier Quellen, vier Senken und ist in neun durchnummerierte Schichten aufgeteilt. Zwei Fahrtmöglichkeiten sind im dargestellten Teilgraphen hervorgehoben: eine von der Quelle A bis zur Senke B und andere von der Quelle C bis zur Senke D. Da sich diese zwei Fahrten nicht ausschließen, ist das abgebildete System der Gleisverbindungen kein TFK.

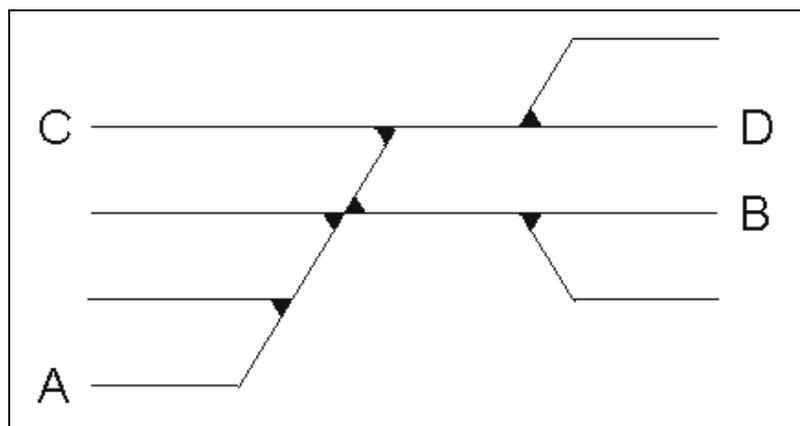


Abbildung 5-6: Spurplan des Teilgraphen aus Abbildung 5-5

Für die bessere Übersichtlichkeit zeigt Abbildung 5-6 einen Spurplan-Ausschnitt, welcher dem Graphen aus Abbildung 5-5 entspricht.

Übertragen auf das Graphenmodell der Infrastruktur lässt sich die Definition von Teilfahrstraßenknoten wie folgt formulieren: TFK ist ein Teilgraph, in dem alle Paare von Routen über mindestens einen gemeinsamen Knoten verlaufen.

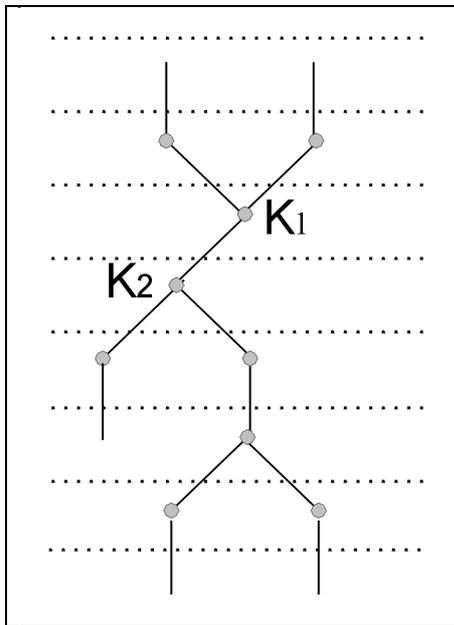


Abbildung 5-7: Ein Mindest-TFK

Eine ausreichende Bedingung für die Existenz eines TFK: **Mindest-TFK** ist ein Teilgraph, dessen alle Quellen vor einem bestimmten Knoten K und alle Senken hinter diesem Knoten liegen.

Beweis: Da alle Routen im Graphen (Fahrmöglichkeiten) genau eine Quelle und eine Senke durchlaufen, passieren sie alle auf ihrem Weg durch den Graphen den Knoten K und schließen sich dort gegenseitig aus.

Der Knoten K , den alle Routen eines Mindest-TFK durchlaufen, wird hier als **Primärknoten** bezeichnet. Abbildung 5-7 zeigt, dass ein Mindest-TFK auch mehrere Primärknoten besitzen kann.

Ausgehend von der Existenz mindestens eines Primärknotens lassen sich einfache Regeln zur Bildung von TFK formulieren, die schon intuitiv verständlich sind und bereits in ALFA angewendet wurden. Etwas komplizierter und bisher nicht theoretisch untersucht ist die Analyse der sogenannten Trapezstrukturen bei der Zusammenfassung von Teilfahrstraßenknoten.

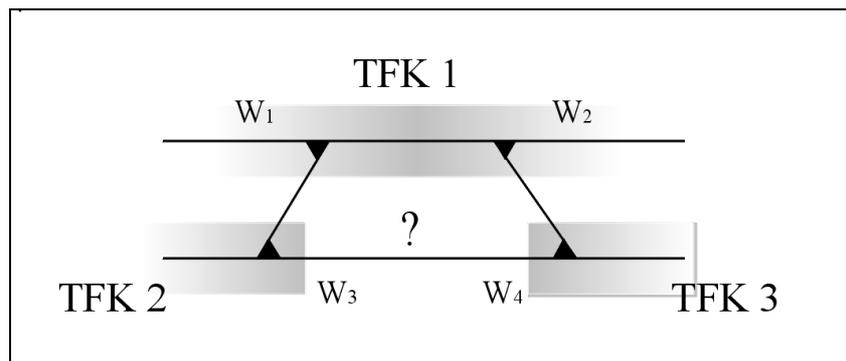


Abbildung 5-8: Trapezstruktur

Eine typische Trapezstruktur, bestehend aus zwei Verbindungen über vier Weichen zwischen zwei Gleisen, ist in Abbildung 5-8 dargestellt. Die Weichen W_1 und W_2 gehören zu dem TFK 1. Alle Fahrten, die die Weichen W_3 und W_4 belegen, schließen sich in diesen Weichen oder in den Weichen W_1 und W_2 aus. Die Frage ist, ob die Weichen W_3 und W_4 auch zu einem TFK zusammengefasst werden können und der TFK 2 so mit dem TFK 3 vereinigt werden kann.

Für eine Vereinigung müssen sich alle Fahrten des TFK 2 mit allen Fahrten des TFK 3 ausschließen. Der Ausschluss findet entweder an den beiden Weichen W_3 und W_4 oder im TFK 1 statt (Im zweiten Fall spricht man von einem **indirekten** Ausschluss).

Aus theoretischer Sicht müssen alle Routen des vereinigten TFK-Teilgraphen weiterhin paarweise über mindestens einen gemeinsamen Knoten verlaufen. Mit anderen Worten müssen alle aus dem ersten Mindest-TFK hinausführende Routen mit allen in den zweiten Mindest-TFK hineinführenden Routen verkettet sein. Solche Verkettungen sind entweder in den Primärknoten beider Mindest-TFK oder auch in Primärknoten anderer Mindest-TFK möglich.

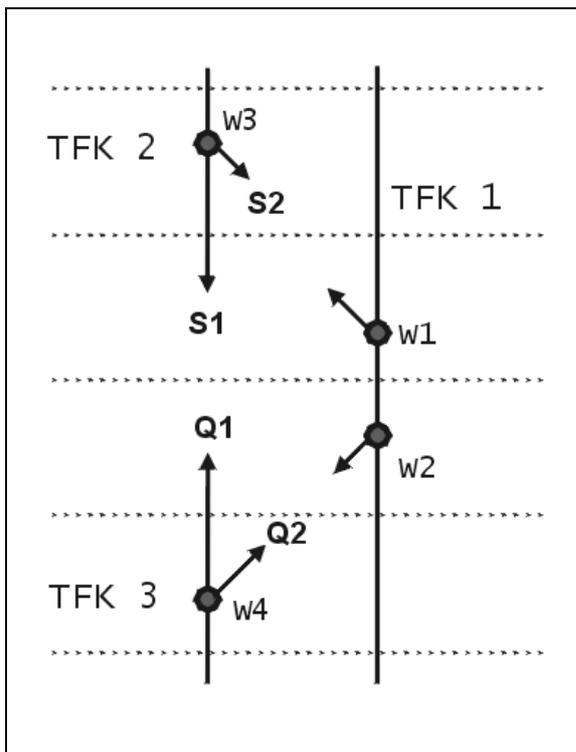


Abbildung 5-9: Graphenmodell der Trapezstruktur aus Abbildung 5-8

In Abbildung 5-9 ist vergleichsweise leicht zu erkennen, dass die Mindest-TFK 2 und 3 der betrachteten Trapezstruktur zu einem Teilfahrstraßenknoten vereinigt werden können. TFK-2 besitzt hier zwei Senken S_1 und S_2 , wobei sich alle über S_1 hinausführende Routen mit allen Routen des TFK 3 im Primärknoten W_4 ausschließen. S_2 führt dagegen in den Mindest-TFK 1. Wenn man die Quellen des TFK 3 analog analysiert, bleibt nur für die Quelle Q_2 die Frage offen, ob alle dorthin hineinführende Routen mit allen Routen des Mindest-TFK 2 verkettet sind. Diese Quelle ist aber genauso wie die Senke S_2 mit dem Mindest-TFK 1 verbunden, d.h. der Ausschluss der restlichen Routen von TFK 2 und 3 findet im Mindest-TFK 1 statt.

Trapezstrukturen wie in Abbildung 5-8, in denen Mindest-TFK mit einem Primärknoten vereinigt werden, lassen sich in der Regel auch ohne formelle Graphendarstellung im Gleisbild erkennen. Anders ist bei komplexeren Gleisverbindungen: Indirekte Ausschlüsse können dann auf mehrere TFK verteilt sein, so dass die Zusammengehörigkeit einzelner Mindest-TFK erst nach einer ausführlichen Analyse der Routen im Infrastrukturgraphen festgestellt werden kann.

Abbildung 5-10 zeigt z.B. einen Ausschnitt eines Fahrstraßenknotens, der bereits in Teilfahrstraßenknoten nach ALFA-Regeln unterteilt worden ist. Es handelt sich um ein aus mehreren Veröffentlichungen bekanntes Originalbild von WAKOB (u.a. [63] und [65]). Abgegrenzte TFK sind hier durchnummeriert.

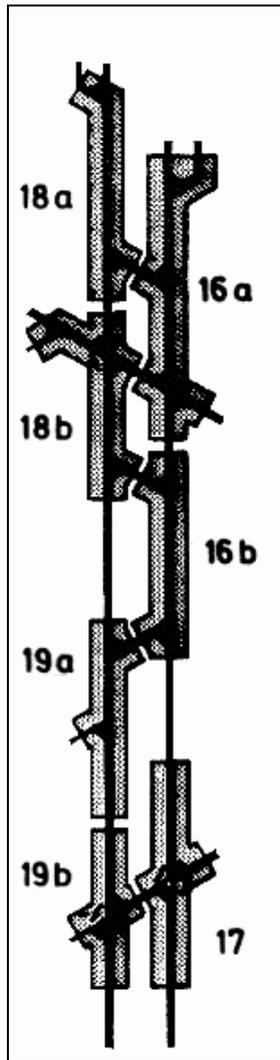


Abbildung 5-10: Gleisbereich mit TFK

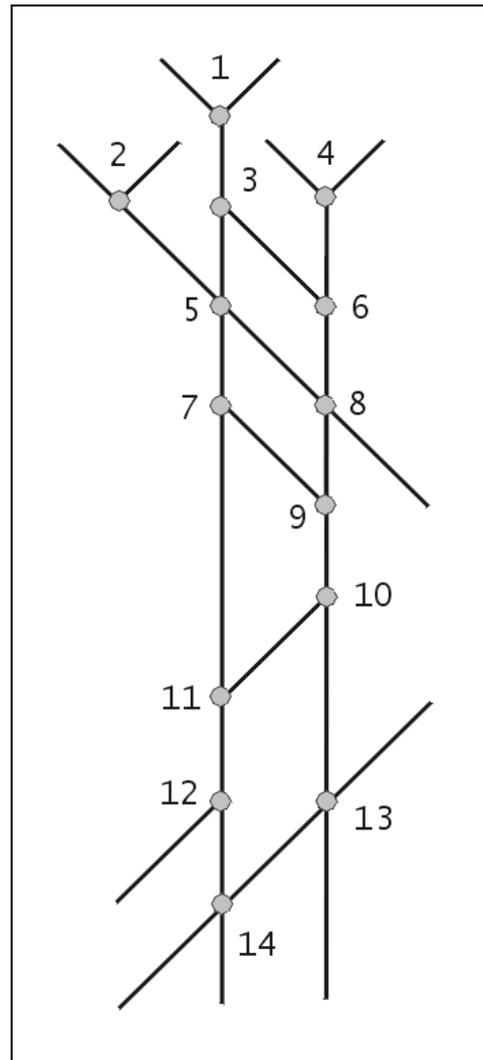
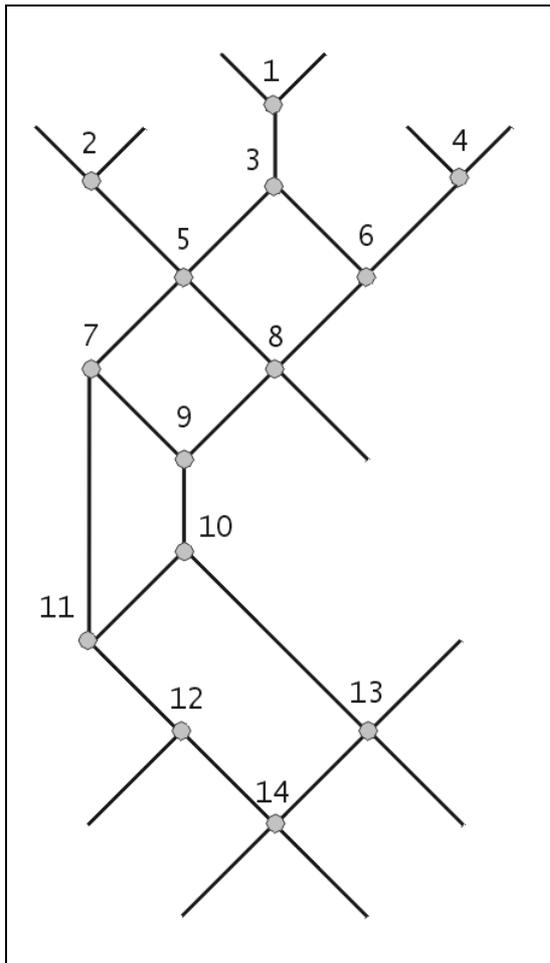


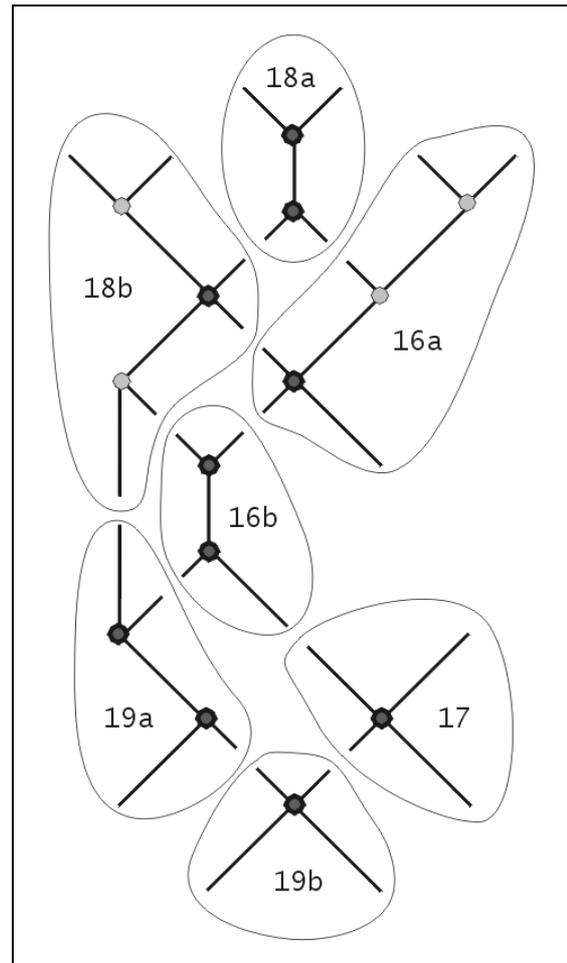
Abbildung 5-11: Graphenmodell des Gleisbereichs

Die Unterteilung in Teilfahrstraßenknoten soll nun mit Hilfe des gerichteten Infrastrukturgraphen nachvollzogen und erweitert werden. In Abbildung 5-11 ist das Graphenmodell des untersuchten Gleisbereiches dargestellt. Die Weichen sind in diesem Modell mit Nummern versehen, damit die Zusammenhänge zu einer weiteren formelleren Darstellung des Graphen in Abbildung 5-12 erkannt werden können.

Zuerst wird jeder Knoten des Graphen als ein TFK betrachtet. Knoten, die einfache Weichen darstellen, besitzen zwei Quellen und eine Senke (z.B. Knoten 1) bzw. eine Quelle und zwei Senken (z.B. Knoten 12). Kreuzungsweichen weisen zwei Quellen und zwei Senken auf (Knoten 5, 8 usw.) Danach werden benachbarte TFK paarweise zusammengefasst, solange sie die Definition des Mindest-TFK erfüllen, d.h. alle Quellen jedes TFK-Teilgraphen vor seinen Senken liegen.



**Abbildung 5-12: Graphenmodell
(alternative Darstellung)**



**Abbildung 5-13: Unterteilung in
Mindest-TFK**

Nach der zweiten Stufe der TFK-Abgrenzung entsteht eine Menge von Mindest-TFK, welche in Abbildung 5-13 aus dem Gesamtgraphen herausgeschnitten dargestellt sind. Primärknoten sind in dieser Darstellung fett umrandet. Die Mindest-TFK stimmen mit den Wakob'schen TFK aus Abbildung 5-10 bereits vollständig überein. Dennoch ist die Abgrenzung damit noch nicht beendet: Es kann nachgewiesen werden, dass die Mindest-TFK 18b und 19a zu einem TFK gehören.

In Abbildung 5-14 sind die Senken des Mindest-TFK 18b als S1, S2 und S3 bezeichnet. Die Quellen des Mindest-TFK 19a sind Q1 und Q2. Die Vereinigung beider Mindest-TFK setzt die Existenz von gemeinsamen Knoten im Gesamtgraphen für alle möglichen Routen, welche durch die genannten Quellen und Senken verlaufen, voraus. S1 und Q1 sind Trivialfälle, weil diese Kanten ineinander übergehen und alle entsprechenden Routen somit durch die Primärknoten beider TFK verlaufen. Es sind also noch die Verkettungen von Routen $S2 \rightarrow Q2$ und $S3 \rightarrow Q2$ nachzuweisen.

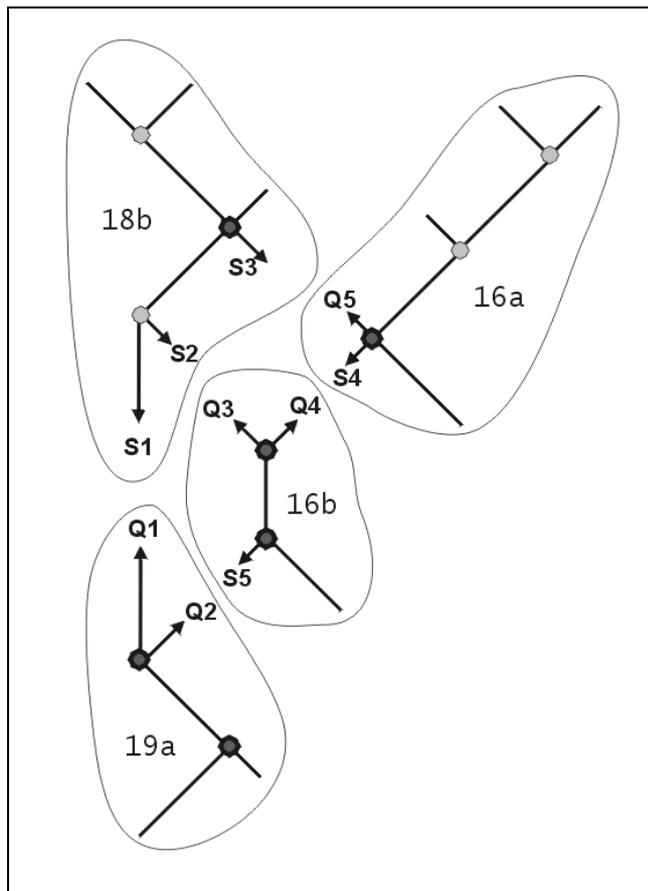


Abbildung 5-14: Analyse der Mindest-TFK

Alle Routen, die durch die Quelle Q2 verlaufen, verteilen sich im TFK 16b auf die Quellen Q3 und Q4. Deswegen kann die gestellte Aufgabe wie folgt umformuliert werden: Für die Vereinigung der Mindest-TFK 18b und 19a müssen alle möglichen Routen über $S2 \rightarrow Q3$, $S2 \rightarrow Q4$, $S3 \rightarrow Q3$ und $S3 \rightarrow Q4$ verkettet sein. S2 und Q3 gehören genauso wie S1 und Q1 zu einer Kante, d.h. die Routen $S2 \rightarrow Q3$, $S2 \rightarrow Q4$ und $S3 \rightarrow Q3$ schließen sich in Primärknoten der Mindest-TFK 18b und 16b aus. Die letzte noch nicht zugeordnete Senke S3 mündet genauso wie die letzte Quelle Q4 in einen weiteren Mindest-TFK 16a. Dadurch schließen sich auch alle Routen, die über S3 und Q4 verlaufen, im Primärknoten dieses TFK aus.

Die beschriebene Vorgehensweise kann auch für weitere TFK-Vereinigungen angewendet werden. Dabei müssen bereits vereinigte TFK für die Analyse wieder als Mindest-TFK dargestellt werden, um indirekte Ausschlüsse in ihren Primärknoten zu gewährleisten. In der Praxis wie z.B. im Wakob'schen Beispiel kommen komplexere Verbindungen jedoch selten vor.

Ein weiterer Schwerpunkt bei der Teilfahrstraßenknoten-Abgrenzung ist die Behandlung von Haltepositionen. Soll ein auf der Infrastruktur vorgesehener Halteplatz den Verlauf eines TFK unterbrechen? Normalerweise stellen die Haltepositionen tatsächlich die Warteräume dar, die außerhalb der Bedienungskanäle (TFK) liegen. Ausnahmen bilden Halteplätze auf freier Strecke (siehe Abbildung 5-15), die nicht als Warteraum gelten können, weil dort keine Überholungsmöglichkeit besteht und somit kein Reihenfolgewechsel möglich ist.

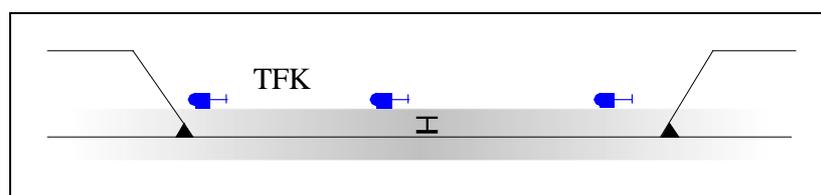


Abbildung 5-15: Haltepunkt auf freier Strecke

So gehen die Haltezeiten auf freier Strecke vollständig in die Mindestzugfolgezeiten (Bedienungszeiten) ein, und die Haltepositionen können sich daher innerhalb eines Bedienungskanals befinden. Deshalb werden die Teilfahrstraßenknoten nur dann an einem Halteplatz unterbrochen, wenn dort eine Möglichkeit der Parallelfahrt besteht.

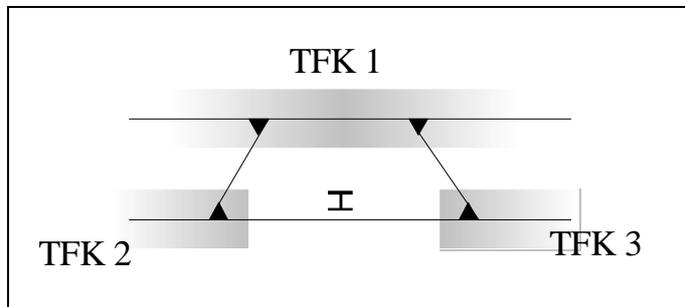


Abbildung 5-16: Haltepunkt in einer Trapezstruktur

Bei der Betrachtung der Trapezstrukturen genügt alleine die Existenz eines Haltepunktes zwischen den untersuchten Mindest-TFK, um eine TFK-Vereinigung abzulehnen, weil in jeder Trapezstruktur immer mindestens eine Möglichkeit zum Parallelfahren besteht (Beispiel Abbildung 5-16)

Nun lassen sich folgende Regeln und der Algorithmusablauf für eine exakte infrastrukturbezogene TFK-Abgrenzung zusammenstellen:

1. Alle Weichen, Kreuzungsweichen und Kreuzungen werden anfangs als einzelne TFK betrachtet.
2. Nach folgenden Regeln werden diese elementaren TFK so in größere zusammengefasst, dass am Ende dieses Schrittes Mindest-TFK mit jeweils mindestens einem Primärknoten entstehen:
 - a) Zwei mit spitzen Enden zueinanderliegende Weichen gehören zu einem TFK, wenn es dazwischen keine Halteposition mit einer Parallelfahrtmöglichkeit gibt
 - b) Die Reihenfolge „spitzes Ende – stumpfes Ende“ (und umgekehrt) muss zu einem TFK zusammengefasst werden, falls zwischen den Weichenknoten ebenfalls kein Halt mit Parallelfahren möglich ist
3. Benachbarte TFK werden iterativ paarweise und unter Berücksichtigung der Haltemöglichkeiten wie oben gezeigt analysiert und, falls möglich, vereinigt.

Der Algorithmus wird unterbrochen, wenn nach einem kompletten Durchlauf über alle TFK kein Paar vereinigt worden ist. Damit gilt die infrastrukturbezogene Abgrenzung der Teilfahrstraßenknoten als abgeschlossen.

Für eine effiziente Realisierung des Algorithmus verfügt das SPURPLAN-Konzept über alle notwendigen Voraussetzungen. Im einzelnen erlaubt die Aufteilung der Infrastruktur in Zwischenweichenabschnitte eine eindeutige Identifizierung der Weichenknoten und einen schnellen Zugriff auf die angrenzenden Weichenelemente. Anhand des Graphenaufbaus kann festgestellt werden, wie die benachbarten Weichen zueinander liegen und ob dazwischen Haltepositionen vorhanden sind. Des Weiteren lassen sich auch die Trapezstrukturen als Zyklen im Graphen ermitteln.

5.2 Dimensionierung des Bedienungssystems TFK

Für die Berechnung von Bedienungszeiten muss das Bedienungssystem TFK eindeutig lokalisiert werden. Die allgemein gebräuchliche Vorstellung von einem Bedienungssystem mit der Reihenfolge Eingang – Warteraum(Trichter) – Bedienungskanal(Rohr) – Ausgang entspricht dem Teilfahrstraßenknoten nur bedingt, denn dieser besitzt normalerweise mehrere Ein- bzw. Ausgänge. Einige von ihnen können dabei, abhängig von der Fahrtrichtung, gleichzeitig beide Funktionen erfüllen, z.B. bei Fahrtenausschlüssen in Knoten oder auf eingleisigen Strecken (siehe Abbildung 5-17).

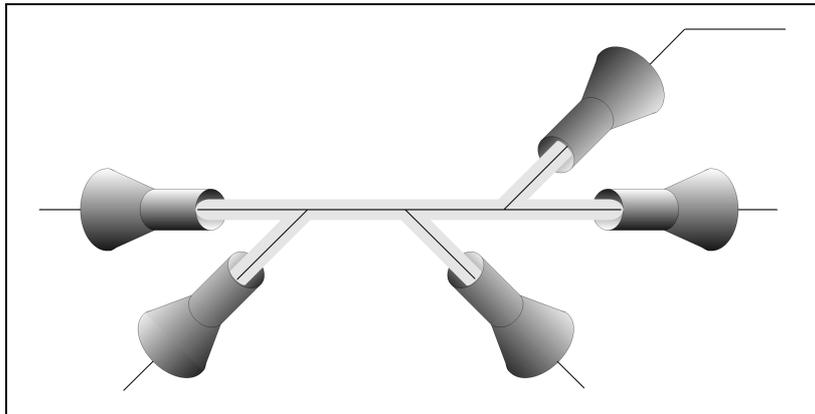


Abbildung 5-17: Zugänge zum Bedienungskanal des Teilfahrstraßenknotens

Die Wartevorgänge finden laut Definition des Bedienungssystems auf den am nächsten zurückliegenden Wartepositionen statt. Die Wartezeit auf eine Bedienung ist außerdem immer vom Zugfolgefall abhängig. Der Bedienungskanal beginnt stets an der Stelle, an der sich die Fahrten zuerst ausschließen. Dieser Punkt ist aber ebenso vom Zugfolgefall abhängig und kann weit vor den eigentlichen Weichen, die einem TFK zugeteilt sind, liegen.

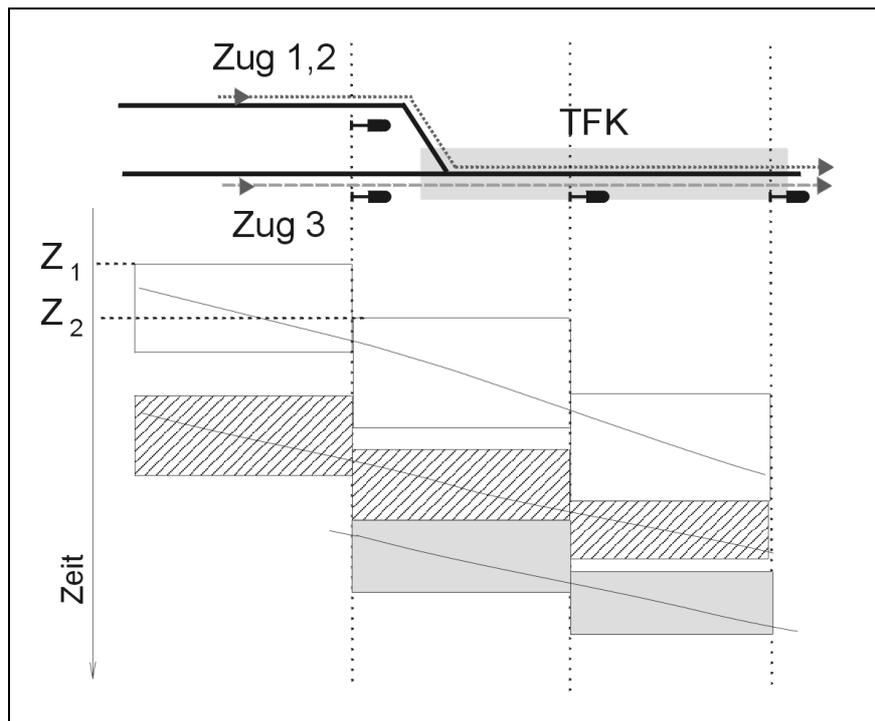


Abbildung 5-18: Ankunftszeitpunkte im TFK

So fängt der Ausschluss zwischen den Fahrten 1 und 2 im Beispiel Abbildung 5-18 bereits zum Zeitpunkt Z_1 an. Deshalb könnte die Ankunft des zweiten Zuges im Bedienungssystem TFK zu dieser Zeit registriert werden. Unter anderen Umständen, wie beim Zugfolgefall „2-3“, stellt man fest, dass dieselbe Fahrt 2 im gleichen Bedienungssystem zu einem anderen Zeitpunkt Z_2 ankommen kann. Noch gravierender ist dieser Widerspruch bei den kreuzenden Fahrten, die sich lediglich in der Mitte des Bedienungskanals an einer Kreuzung ausschließen.

Bei bekannten Verkehrszeiten aller Züge und ihrer voraussichtlichen Reihenfolge könnte der Variationskoeffizient der Ankunftsabstände prinzipiell ausgehend von den zugfolgefallbedingten Ankunftszeiten bemessen werden. Aber für die analytische Modellierung, welche im Prinzip keine konkreten Fälle behandelt, wären solche Schätzungen des Variationskoeffizienten bei Änderung der Zugfolge jedoch wenig zuverlässig. Im Drei-Zug-Modell führt eine zugfolgeabhängige Fixierung der Ankunftszeitpunkte sogar zu einer paradoxen Situation, die WENDLER [66] mit Hilfe der Dreiecksgleichung beschrieben hat. Bei einer ähnlichen Konstellation wie in Abbildung 5-18 sind gleichzeitig drei mögliche Zugfolgen „1-2-3“, „2-3-1“ und „3-1-2“ zu erkennen.

Die Ankunftsreihenfolge der Fahrten und die Ankunftsabstände können also wegen der Unterwegseinfädungen nicht eindeutig festgelegt werden. Bei der Fahrplankonstruktion spielt dies keine entscheidende Rolle, weil dort die kompletten Zugtrassen einheitlich betrachtet werden und sich deren eindeutige zeitliche Reihenfolge anhand der Trassenfixpunkte am Anfang des Zuglaufs im Betrachtungsbereich bestimmen

lässt. Für die analytischen Ansätze würde eine Einführung der Trassenfixpunkte die Entstehung von unzulässigen negativen Mindestzugfolgezeiten bedeuten. Auf der anderen Seite sind für die bedienungstheoretischen Modelle einige wenige charakteristische Angaben zu dem Ankunftsprozess anstelle von genauen Ankunftszeiten durchaus ausreichend (siehe [48], [63]). Man geht hier von einem „abstrakten“ Ankunftsprozess aus, ohne explizite Definition des topologischen Bezugspunktes. Im Programm ALFA ist aus diesem Grunde eine Angabe des Variationskoeffizienten der Ankunftsabstände VtA für die Beschreibung des Ankunftsprozesses vorgesehen.

Umso sinnvoller ist die Einführung eines abstrakten Ankunftsprozesses, weil sich der Ankunftszeitpunkt in einem klassischen Bedienungssystem auf die Anmeldung der Forderungen in der Warteschlange bezieht. In Abbildung 5-18 bezeichnen die Zeiten Z_1 und Z_2 dagegen den Anfang der Bedienung im Bedienungskanal nach dem schon eventuell stattgefundenen Wartevorgang im System.

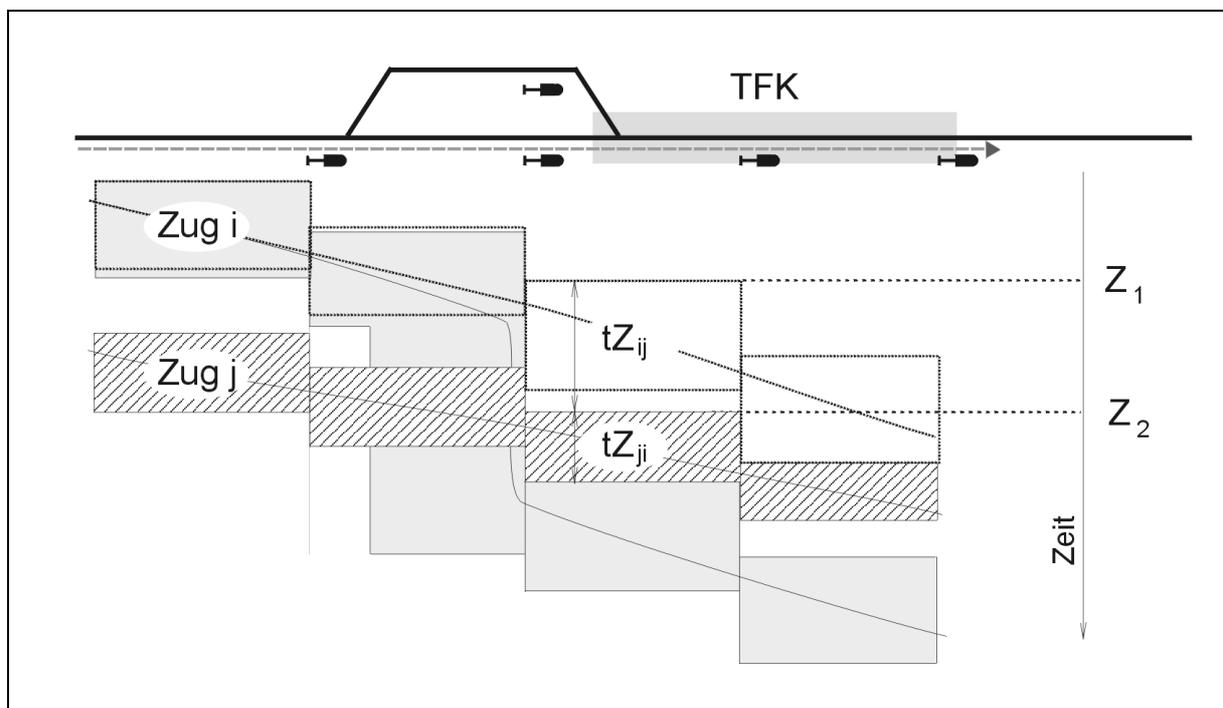


Abbildung 5-19: Eintreffen im Bedienungssystem TFK

So lässt sich im übrigen auch der am Anfang dieses Kapitels erwähnte angebliche FIFO-Widerspruch erklären, wenn man den Zeitpunkt des Eintreffens einer Forderung im System mit Hilfe der Abstände der Mindestzugfolgezeiten korrigiert. Abbildung 5-19 veranschaulicht diese Auslegung anhand der Sperrzeitentrepfen eines Zugfolgefalles. Die Fahrt i ist hier gegenüber der Fahrt j nachrangig. Das Bedienungssystem TFK fängt für beide Fahrten an der Warteposition im Bahnhof an, die eigentliche Bedienung findet aber erst an dem Vereinigungspunkt beider Zuglaufwege statt, weil sich die Fahrten erst an diesem Ort ausschließen. Der Zug i soll an der Grenze des Systems voraussichtlich zum Zeitpunkt Z_1 eintreffen

(transparente Sperrzeitentreppe), der vorrangige Zug j zu einem späteren Zeitpunkt Z_2 . Falls der Zeitunterschied am Ausschlusspunkt S weniger als die Mindestzugfolgezeit $t_{Z_{ij}}$ beträgt, wird der erste Zug zu einer Überholung gezwungen, um eine Fahrzeitverlängerung des höherrangigen zweiten Zuges zu vermeiden (graue Sperrzeitentreppe). Der Überholungshalt dauert dann solange, bis der Zug i ohne Behinderung des Zuges j die Warteposition im Bahnhof wieder verlassen kann. Die frühzeitige Erkennung einer Überholungsnotwendigkeit bedeutet aber nichts anderes als, dass zum Zeitpunkt Z_1 die Information über den noch nicht eingetroffenen Zug j schon vorliegt, bzw. dass sich der Zug j im Bedienungssystem bereits angemeldet hat, ohne sich jedoch dort zu befinden. So verschiebt sich die virtuelle Ankunftszeit im System von Zugfolgefall zu Zugfolgefall und unterscheidet sich von der realen Ankunftszeit an der Warteposition. Die Bedienungsdziplin „first in – first out“ wird durch solche virtuellen Ankunftszeiten auch bei Fahrten unterschiedlicher Rangordnung gewährleistet und die Forderungen werden im Bedienungssystem dank dieser Zeitverschiebung weiterhin gleich behandelt.

Eine eindeutige Festlegung des Ankunftszeitpunktes im vollständigen Bedienungssystem Teilfahrstraßenknoten ist für praktische Zwecke jedoch indiskutabel: Für einen variablen Konfliktpunkt ist in der Regel unmöglich, vorab zu bestimmen, wann ein Zug den Streckenabschnitt für sich beansprucht. In der Fahrplankonstruktion und bei der Light-Heavy-Traffic-Approximation tritt dieses Problem wegen der vollständig asynchronen Vorgehensweise nicht auf. Im Betrieb erhält man in den Zugmeldestellen regelmäßig die Vorausmeldungen von Zügen, oder die Informationen fließen kontinuierlich über die Linienzugbeeinflussungssysteme. Für eine asynchrone Disposition ist der Störungszeitpunkt ausschlaggebend, ab dem praktisch ein neuer Fahrplan für die aktuelle Lage im beobachteten Netzbereich erstellt wird. Synchronen Simulationsmodelle erkennen dagegen eine Konfliktsituation im allgemeinen zu spät, was zu Behinderungen höherangiger Züge oder zu Systemblockaden (deadlocks) führen kann. In der Regel bedienen sich deshalb die gängigen synchronen Simulationswerkzeuge einer speziellen Technik, um künftige Konflikte möglichst früh zu erkennen.

Universelle analytische Modelle sind auf jeden Fall nicht in der Lage und auch nicht dazu bestimmt, jede einzelne Zugtrasse zu analysieren oder konkrete Trassenkonflikte zu erkennen. Deswegen ist die Verwendung des abstrakten Ankunftsprozesses für analytische Leistungsuntersuchungen von Eisenbahnanlagen nicht nur sinnvoll, sondern auch die einzig korrekte Vorgehensweise.

6 Modellfahrten

Während die Bedienungskanäle-Teilfahrstraßenknoten in der analytischen Modellierung als feste statische Strukturen der Eisenbahnbetriebsanlagen vereinbart werden, stellen die Zugfahrten dynamische Forderungenströme dar. Theoretisch könnte jede einzelne Zugfahrt, so wie sie im Fahrplan vorgesehen wird, als eine einmalige Forderung mit entsprechend geringer Auftrittswahrscheinlichkeit im Modell berücksichtigt werden. Da charakteristisch gleiche oder ähnliche Züge oft auch dieselben Laufwege benutzen (z.B. Taktzüge), macht es Sinn, sie in Zugfamilien (Modellzügen) zusammenzufassen. Für die Modellhandhabung bringt dies wesentliche Vorteile: Erstens sinkt die Dimension von Eingangsdaten und deren Redundanz deutlich, und zweitens erfüllen die Zugfamilien die von den Forderungenströmen zu erwartende Funktion der Massenerscheinung. Außerdem steht bei der Infrastrukturplanung in der Regel kein exaktes Betriebsprogramm zur Verfügung, oft sind lediglich die Zugzahlen für bestimmte Zugklassen sowie Start-, Halte- und Zielbetriebsstellen bekannt. Solche unvollständigen Informationen eignen sich am besten für die Bildung von Zugfamilien.

6.1 Fahrten als Forderungenströme

Die Charakteristika von Modellfahrten und die Eigenschaften ihrer zeitlichen Reihenfolge müssen die Modellierungsvoraussetzungen möglichst präzise erfüllen. Jedoch scheint allein die Annahme über die zufälligen Ankunftszeitpunkte der Züge dem Grundsatz des Fahrplankonzepts zu widersprechen. Trotzdem können die Ankunftsabstände von Zügen in Wirklichkeit als Zufallsgrößen mit bestimmten Verteilungsgesetzen modelliert werden. So hat u.a. POTTHOFF [41] mehrere Fälle mit zufälligen Ankünften im Verkehrswesen analysiert und festgestellt, dass es sich dabei in der Regel um die Exponentialverteilung (POISSONScher Forderungenstrom) oder um ihre Variationen (z.B. k-Erlang oder Hyperexponentialverteilung) handelt. Die im Kapitel 4 vorgestellten analytischen Ansätze gehen ebenfalls von einer Exponentialverteilung der Ankunftsabstände aus (Verfahren von SCHWANHÄÜBER und WENDLER) oder sie sehen den Ankunftsprozess, der kein eindeutiges Verhalten aufweist, als vollständig unabhängig an (GI/GI/1-Modelle von WAKOB und HERTEL).

Die zweite charakteristische Annahme von Warteschlangenmodellen ist die Homogenität des Forderungenstromes. Anders als in der klassischen Bedienungstheorie hat man bei in der Praxis selten homogene Forderungenströme die aus gleichartigen Elementen bestehen. Auf Eisenbahnanlagen verkehren schnell- und langsamfahrende Züge, deren Mindestzugfolgezeiten (die aus theoretischer Sicht die Bedienungszeiten bestimmen) sich voneinander aufgrund der Geschwindigkeitsdifferenzen und ungleicher Abfertigungs- bzw. Übergangsdauer oft deutlich

unterscheiden. In den meisten bedienungstheoretischen Modellen wird die Streuung der Bedienungszeiten mit Hilfe der Verteilungsfunktion der Bedienungszeiten, insbesondere durch den Variationskoeffizienten V_{tB} , zumindest teilweise berücksichtigt. Einige Eisenbahnsysteme mit entmischem Verkehr, wie z.B. S-Bahnen oder neue Hochgeschwindigkeitsstrecken weisen tatsächlich einen größtenteils homogenen Forderungenstrom auf. Ansonsten empfiehlt es sich, bei Kapazitätsberechnungen von Bahnanlagen mit stark gemischtem Verkehr, die Untersuchungszeiträume in homogene Tagesabschnitte zu unterteilen. Phasen mit einem hohen Anteil an Güterzügen erfordern andere Qualitätsvorgaben als Phasen mit vorwiegend Reisezügen. Da beide Verkehrsarten für unterschiedliche Märkte bestimmt sind, können sich unterschiedliche Kapazitätsreserven in den beiden Phasen ergeben. Bahnvorschriften [12] verwenden die mittlere Rangziffer als Kriterium der Homogenität des Tagesabschnittes. Einzelheiten dieses Verfahrens sind im Kapitel 10 beschrieben.

Eine weitere wichtige Voraussetzung der zu implementierenden bedienungstheoretischen Modelle ist die Unabhängigkeit der Forderungen untereinander und vom Systemzustand. In der Praxis ist oft genau das Gegenteil zu beobachten. In Abbildung 6-1 stellt z.B. das Bedienungssystem A einen Systemengpass dar, der den Forderungenstrom aufhält und dann in weniger streuenden Zeitintervallen an das Bedienungssystem B weitergibt.

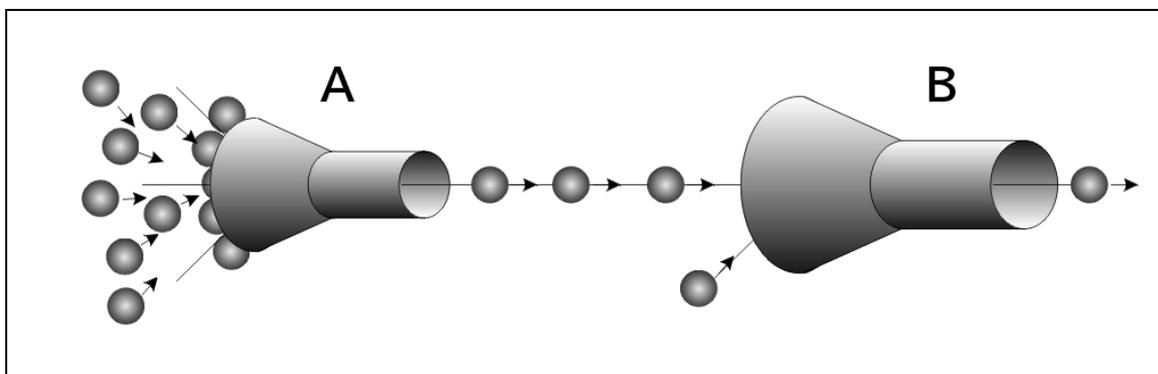


Abbildung 6-1: Einfluss eines Engpasses auf nachfolgende Bedienungssysteme

Eine ähnliche Situation tritt oft in Rangierbahnhöfen auf, wenn die Bedienungswünsche in der Ausfahrtgruppe durch die Auslastung der Richtungsgleise beeinflusst werden. Systematischer Fehler, der durch solche Abhängigkeiten entsteht und in den gängigen Modellen nicht berücksichtigt wird, ist dennoch nicht von großer Bedeutung für die Eisenbahnsysteme: Erstens sind lange Warteschlangen und hohe Belegungsgrade in der Praxis äußerst selten, und zweitens ist im Falle eines Engpasses, dieser für die Systemqualität ausschlaggebend (und nicht etwa die nachfolgenden Bedienungskanäle). Ferner existieren in Operations Research spezielle Methoden, mit denen gegenseitige Einflüsse der zusammenwirkenden Bedienungssysteme eingeschätzt werden können.

Formell wird für die Berechnung der Wartezeiten im Betrieb der Forderungenstrom von Zug- bzw. Rangierfahrten genutzt. In der Fahrplankonstruktion hingegen spielt die Gesamtheit der bestellten Wunsch-Fahrplantrassen in ihrer zeitlichen Reihenfolge für den Fahrplankonstrukteur diese Rolle [63]. Modellzüge beinhalten für beide Arten der Forderungsströme sowohl gemeinsame als auch spezifische charakteristische Eigenschaften, die je nach Aufgabenstellung genutzt werden. Für die Beschreibung des Betriebszustandes müssen die Verspätungen nach der Häufigkeit ihres Auftretens und nach ihrer Größe ausgewertet werden. Dazu enthalten die Modellzugdaten besondere Angaben zum Verspätungsverhalten der Züge. Für die Fahrplankonstruktion haben diese keine Bedeutung, während das Wissen über die Reihenfolge der bestellten Trassen geradezu unerlässlich ist.

6.2 Festlegen von Modellzügen

Jede Modellfahrt wird durch folgende Gruppen von Eigenschaften charakterisiert:

- Physikalische Charakteristik
- Laufweg als Reihenfolge der Fahrwege in den Betriebsstellen
- Beziehung zu anderen Fahrten (Rangziffer- und situationsbezogene Dispositionsregeln bei Behinderungen, Abhängigkeiten zwischen Anschlusszügen)

In den folgenden Abschnitten werden kurz alle Eigenschaften von Zugfahrten vorgestellt, die aus eisenbahntechnischer Sicht für die Fahrdynamik und somit für die Bedienungszeiten der analytischen Modelle von Bedeutung sind. Die meisten von diesen Eigenschaften sind in der Konzeption für eine Feinfahrplankonstruktion von BRÜNGER [6] beschrieben und bereits im System RUT-0 implementiert worden.

6.2.1 Zugcharakteristik

Die charakteristischen Daten eines Modellzuges erfassen:

1. die Daten zur Identifikation des Zuges:
 - eindeutige Identifizierung durch eine Zugnummer
 - Zuggattung (z.B. „ICE“, „IC“, „D“, „RB“, „Üg“, „Sg“) zum Unterscheiden von Reise- und Güterzügen sowie einzelnen Lokomotiven und von Fern- und Nahverkehrszügen
 - Zugklasse (von „Lokzug“ bis „Fernreisezug“) für die Fahrwegauswahl
2. fahrdynamische Daten:
 - Triebfahrzeugbaureihe, eventuell mit einer Zusatz- oder Schiebelokomotive
 - Angaben zur Länge, Masse und zur Wagenanzahl

- Geschwindigkeitsregelungen
 - Bremsvermögen
3. Eingangsdaten für die analytische Modellierung:
- Rangziffern für die Trassenvergabe und für den Betriebsablauf
 - Verspätungsniveau des Zuges
 - Verkehrszeiten des Modellzuges als einer Massenerscheinung
 - Anzahl der Fahrten, die der Modellzug repräsentiert

Die Rangordnungen für den Planungsprozess werden von nationalen Bahngesellschaften unterschiedlich festgelegt [12]. Bei der Deutschen Bahn sind primäre Informationen über die Rangordnung in den Zuggattungen in Form von Zuggattungshauptnummern enthalten. Für eine präzisere Modellierung hat SCHULTZE [11] spezielle Rangziffern eingeführt, die allen Zügen gemäß ihrer Einstufung für die Betriebsplanung und -durchführung vergeben werden. Dabei gilt: je niedriger die Rangziffer eines Zuges, desto höherer ist die Priorität dieses Zuges im Fahrplan bzw. in Betrieb. Ein schneller Reisezug „IC“ hat beispielsweise die Rangziffer „4“, ein Nahverkehrszug „RB“ dagegen nur „6“. Die Unterscheidung zwischen Fahrplanzustand und Betriebsablauf ist besonders für Zuggruppen wie S-Bahnen erforderlich, weil das Einlegen eines Taktes für die S-Bahn bei der Fahrplankonstruktion wichtiger ist, als seine genaue Einhaltung im Betriebsgeschehen.

6.2.2 Laufweg

Der Laufweg eines Modellzuges wird, bedingt durch den Infrastrukturaufbau und analog zu den Zugfahrten von RUT-0, aus einzelnen Fahrwegen in den Betriebsstellen zusammengestellt. Bei der Festlegung des Laufweges sind deswegen zwei Phasen zu unterscheiden:

1. Eingabe der Betriebsstellen- und Haltreihung (Standard-Laufweg)
2. Auswahl der erforderlichen Fahrwege in einzelnen Betriebsstellen

Eine ausführliche Beschreibung des Fahrtverlaufes ist im Zusammenhang mit der detaillierten Infrastruktur eine wichtige Voraussetzung für eine exakte Fahrzeitrechnung. Sie enthält daher neben dem Start- und Zielpunkt des Zuges mit allen Zwischenabzweigstellen alle verkehrsbedingten Mindesthaltezeiten und zu benutzenden Fahrwege innerhalb von Betriebsstellen.

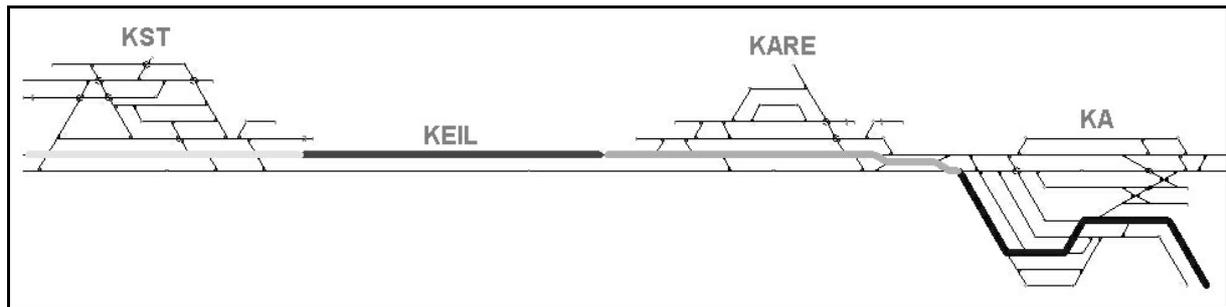


Abbildung 6-2: Laufweg des Zuges als Reihenfolge von Betriebsstellenfahrwegen

Da für die analytische Modellierung lediglich die Fahrzeiten bzw. die Belegungszeiten der Züge von Bedeutung sind, werden für die Modellzüge keine für die Fahrplankonstruktion notwendigen Wunschbetriebsstellen und keine Wunschabfahrts- und Ankunftszeiten vorgegeben.

Falls eine Zugfahrt außerhalb des Untersuchungsbereichs anfängt oder am Ende über dessen Grenzen hinausgeht, wird sie als einbrechender bzw. als ausbrechender Zug bezeichnet.

6.2.3 Abhängigkeiten zwischen Modellfahrten

Die Zugfahrten werden bei der Fahrplankonstruktion in RUT-0 oft zeitlich und örtlich miteinander „verknüpft“. Solche Verknüpfungen erlauben in erster Linie lückenlose Fortsetzungen der ein- oder ausbrechenden Züge in anderen Teilnetz-Projekten. Außerdem dienen Anschlussverknüpfungen dazu, den Übergang von Reisenden oder Ladung zu ermöglichen. Der Takt kann dazu benutzt werden, damit Züge in regelmäßigen zeitlichen Abständen voneinander verkehren. Ferner können im Fahrplan die Abhängigkeiten zwischen den Zügen für die Triebfahrzeugübergabe und für die Verkehrstageanbindung, sowie zusätzliche Wunschankunfts- und Abfahrtszeiten für Betriebsstellen festgelegt werden.

Im Gegensatz zu den Konstruktionszügen besitzen Modellfahrten den Modellierungsbedingungen entsprechend keinerlei Anbindungen. In der Warteschlangentheorie müssen die Forderungen weitgehend unabhängig voneinander und zu zufälligen Zeitpunkten im Bedienungssystem auftreten. Jede Abhängigkeit zwischen den Zügen untereinander und jede Anbindung an bestimmte Zeitpunkte würde die Aussagekraft der analytischen Modelle beeinträchtigen. Selbstverständlich gehen bei Aufgabe der Verknüpfungen einige wichtige Systeminformationen verloren, aber analytische Modelle sind ohnehin nicht in der Lage, konkrete Situationen im Fahrplan darzustellen oder Trassenkonflikte zu lösen. Die Aufgabe der analytischen Netzuntersuchung ist vielmehr eine ausgewogene Abschätzung der durchschnittlich zu erwartenden Belastung von Eisenbahnanlagen.

Bei der Erstellung konfliktfreier Fahrpläne können die realen Wartezeiten im Fahrplan wegen der zeitlichen und örtlichen Verbindungen zwischen den Zügen (Anschlüsse, Durchbindungen, Umläufe usw.) größer als bei der analytischen Berechnung ausfallen. Andererseits werden die „ungünstigen“ Zugfolgefälle wegen der Taktzeiten und dank der Entmischung des Verkehrs im Fahrplan vermieden, wodurch die Streckenkapazität faktisch höher sein kann, als von den analytischen Methoden eingeschätzt wird. Die Wartezeiten im Prozess der Trassenvergabe unterscheiden sich u.a. infolge der willkürlichen Wahl der Pufferzeiten von Wartezeiten im Fahrplan aus Simulationsergebnissen und je nach dem Grad der Abweichung des mathematischen Modells von der Wirklichkeit von analytisch ermittelten Wartezeiten. Pauschal lässt sich die Qualität des Betriebsprogramms nur mit analytischen Verfahren bewerten. Anlage C enthält eine Gegenüberstellung der Wartezeiten aus der asynchronen Simulation der Fahrplanerstellung und den Ergebnissen der Wartezeitrechnung durch ANKE.

Die Fortsetzung der Züge in anderen RUT-0-Netzteil-Projekten darf dennoch für eine korrekte Ermittlung von Mindestzugfolgezeiten nicht vernachlässigt werden. Dafür sollten die Züge gemeinsam mit der Infrastruktur des betrachteten Netzteils vervollständigt werden, d.h. der zu untersuchende Infrastrukturbereich muss in allen Richtungen mindestens bis zum nächsten Haltepunkt der Züge der höchsten Rangstufe ausgedehnt werden. Dabei entsteht eine sternförmige Struktur, die im Abschnitt 7.6.4 noch aufgeführt wird.

Hierarchische Beziehungen zwischen den Modellzügen in Form von Rangziffern sind im engeren Sinne keine Abhängigkeiten der Forderungenströme voneinander und vom Systemzustand, weil sie näherungsweise mit Hilfe von Dispositionsbelegungszeiten kompensiert werden (vgl. Formel (4-12) im Abschnitt 4.1.2).

Selbstverständlich muss auch die Anbindung des Betriebsprogramms an bestimmte Verkehrstage für analytische Berechnungen in Anspruch genommen werden. Man kann beispielsweise nicht alle Züge aus dem Wochenbetriebsprogramm in einem 24-Stunden-Zeitabschnitt zusammensetzen und so die Tageskapazität berechnen. Falls ein ausführliches Betriebsprogramm für eine Fahrplanperiode bereits vorliegt, muss ein repräsentativer Tag ausgewählt werden, und nur dessen Züge werden bei der analytischen Kapazitätsrechnung berücksichtigt. Die Regeln und Algorithmen für die Übernahme der RUT-0-Fahrpläne für analytische Berechnungen in ANKE werden in diesem Kapitel verfasst.

6.3 Fahrzeitrechnung

Die Fahrzeiten der Modellzüge werden nach dem Delta-V-Schritt-Näherungsverfahren (numerische Integration in Geschwindigkeitsschritten) ermittelt, da dieses am besten mit der theoretischen Berechnung der reinen Fahrzeit

übereinstimmt. Als rein werden diejenigen Fahrzeiten bezeichnet, die sich aus der vollen Ausnutzung des Beschleunigungs- und Bremsvermögens der Züge sowie der für Fahrweg oder Zug gültigen Höchstgeschwindigkeiten ergeben. Bei der Bildung der Fahrzeitkurve müssen alle auftretende Kräfte im Gleichgewicht bleiben:

- Laufwiderstände, bezogen auf eine horizontale krümmungsfreie Strecke
- Streckenwiderstände, bestehend aus den Bogen-, Neigungs- und Tunnelwiderständen
- Zugkräfte bei der Beschleunigung und der konstanten Fahrt
- Bremskräfte des Zuges beim Bremsen

Die Fahrzeitrechnung selbst gliedert sich durch die vorgegebenen Halte und Geschwindigkeiten in folgende Phasen:

- Beschleunigung: Diese wird in Delta-V-Schritten von 5 km/h durchgeführt, um die von der Geschwindigkeit abhängigen Größen der Zugkraft und der Beschleunigungs-, Strecken- und Laufwiderstände hinreichend genau berücksichtigen zu können
- Beharrungsfahrt: Ist die zulässige Geschwindigkeit erreicht, wird sie beibehalten. Hierbei wird ständig überprüft, ob die Zugkraft zum Halten der Geschwindigkeit ausreicht
- Das Absinken der Geschwindigkeit bei geringer Zugkraft oder unzureichendem Bremsvermögen
- Verzögerung: Bremsvorgänge treten entweder durch verminderte Streckengeschwindigkeiten oder beim Anhalten auf. Die Berechnung der Bremskurven geht von einer konstanten Bremsverzögerung aus. Mit einer ausreichenden Genauigkeit werden für unterschiedliche Zugklassen bestimmte Werte festgelegt
- Halt

Alle Phasen der Fahrzeitrechnung sind in Abbildung 6-3 in Form eines Geschwindigkeitsdiagramms und der entsprechenden Zeit-Weg-Linie dargestellt.

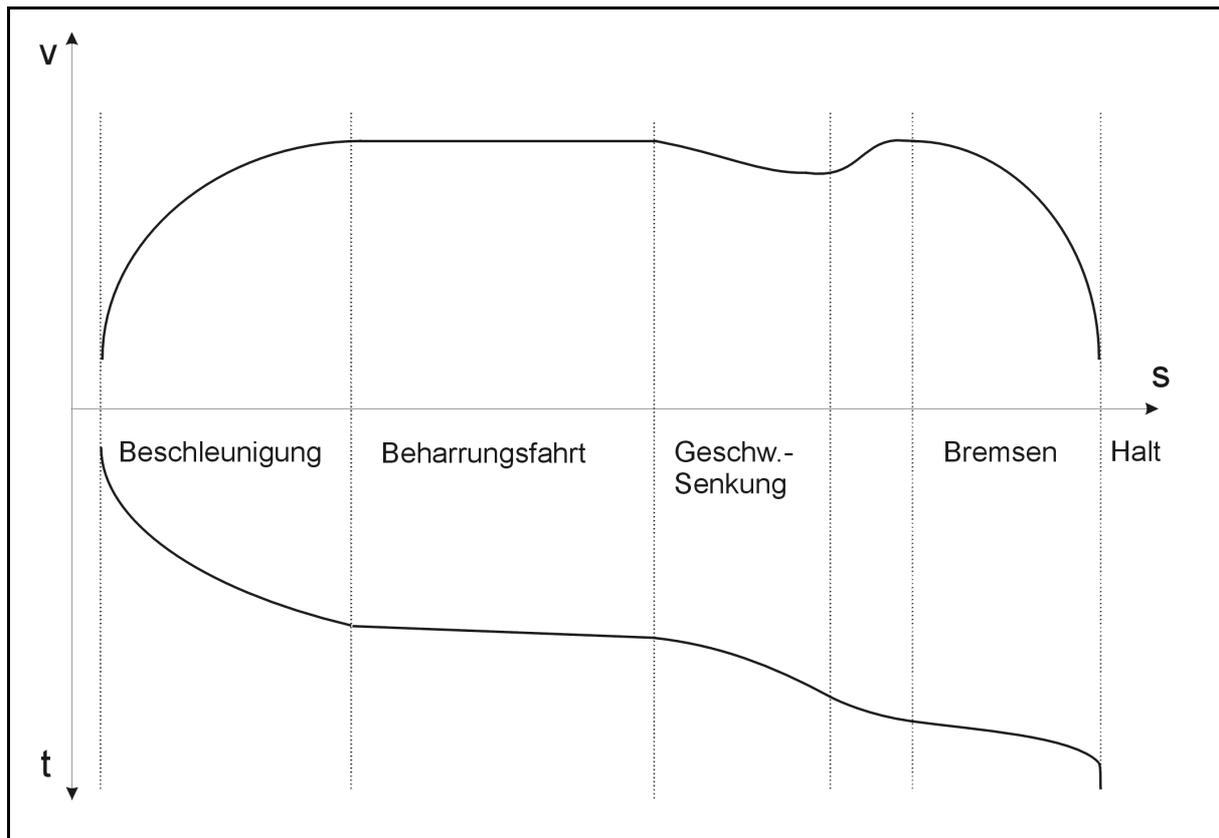


Abbildung 6-3: Phasen der Fahrzeitrechnung

Wegen abweichender fahrzeugtechnischer Daten, schwankender Auslastung und unterschiedlicher Verhaltensweisen der Triebfahrzeugführer werden die reinen Fahrzeiten um Regelzuschläge erhöht, die in Abhängigkeit von der Zugart und bei Reisezügen zusätzlich von der Art der Traktion (Diesel oder elektrisch), der Höchstgeschwindigkeit und der Masse als prozentuale Zuschläge zur reinen Fahrzeit festgelegt sind.

Weitere Beförderungszeitanteile – planmäßige und außerplanmäßige Wartezeiten, Ur- und Einbruchsverspätungen (vgl. Abbildung 4-7 auf Seite 76) – werden erst bei der Kapazitätsberechnung mit Hilfe von analytischen Verfahren ausgewertet und sind daher für die primäre Fahrzeitermittlung irrelevant. Die Anschluss- und Synchronisationszeiten werden bei der analytischen Modellierung wie bereits angesprochen ausgenommen.

Eine detaillierte Beschreibung des Delta-V-Verfahrens ist u.a. in [46] und [11] enthalten. Die Regeln für die Bildung von Belegungszeiten ausgehend von den Zeit-Weg-Diagrammen in bezug auf die Blockabschnitte werden im nächsten Kapitel erläutert.

6.4 Analyse von Fahrplanstrukturen

Bei der Analyse von Fahrplanstrukturen spielt es keine Rolle, ob der Fahrplan bereits konfliktfrei konstruiert ist, oder nur ein Wunschtrassenprogramm zur Verfügung steht. Am wichtigsten ist, dass aus den realen Zugfahrten des Fahrplans die Modellfahrten mit entsprechenden Charakteristika direkt abgeleitet werden können.

Die Anzahl der Zugfahrten im Fahrplan richtet sich nach der Verkehrsnachfrage, die verschiedenen Rhythmen unterworfen ist: wöchentliche und jahreszeitliche Schwankungen bei Reisezügen und der Rhythmus der Wirtschaftsprozesse bei Güterzügen. Diesbezüglich wird zwischen folgenden drei Zuggruppen unterschieden:

- Regelzüge, die regelmäßig verkehren und für die eine Fahrplantrasse existiert
- Bedarfszüge, deren Fahrplantrassen nur bei Bedarf genutzt werden
- Sonderzüge, für die im Jahresfahrplan keine Trassen definiert sind; ein individueller Fahrplan kann jedoch für Sonderzüge bei Bedarf erstellt werden

Theoretisch könnten alle Fahrten eines kompletten Fahrplans durch die Modellzüge mit entsprechenden Charakteristika und Laufwegen repräsentiert werden. Die Standard-Fahrplanperiode umfasst in RUT-0 jedoch ein Jahr, während sich der Bezugszeitraum der analytischen Verfahren in der Regel auf 24 Stunden beschränkt. Aus diesem Grunde soll nur ein bestimmter Fahrplantage als Grundlage für die Modellzugbildung einer Leistungsuntersuchung verwendet werden. Als Kriterium für die Auswahl eines maßgeblichen Tages eignet sich die Fahrtenanzahl. Es wird ein Tag für die Untersuchung gewählt, dessen Zugzahl repräsentativ für einen Zeitraum mit starkem Verkehr ist, erfahrungsgemäß eine Zugzahl, die an etwa 10% der Tage der Fahrplanperiode überschritten wird. Angesichts der Elastizität des Leistungsverhaltens der Bahnanlagen können die Überschreitungen hingenommen werden und sind in der Wahl der Qualitätsgrenzen (Kapitel 9) auch enthalten. Eine Bemessung der Betriebsanlagen auf größere Pegel wäre dagegen unwirtschaftlich.

Nach der Auswahl eines charakteristischen Plantages werden alle Fahrten, die an diesem Tag verkehren, nach ihren spezifischen Eigenschaften wie Zugklasse, Rangziffer und Fahrtverlauf gruppiert. Aus diesen Gruppen werden unter bestimmten Voraussetzungen Modellzüge erstellt. Je nach Untersuchungsfall können diese nach strengeren oder schwächeren Kriterien gebildet werden. Ein Modellzug kann beispielsweise die Fahrten repräsentieren, die eine genau gleiche Abfolge von Betriebsstellenfahrwegen benutzen. Alternativ wäre für eine vorläufige Infrastrukturuntersuchung einfach die gleiche Betriebsstellenreihenfolge zufriedenstellend. Genauso könnten nur Zugfahrten mit exakt übereinstimmenden Rangziffern durch einen Modellzug repräsentiert werden, oder es wäre eine bestimmte Toleranz für die Rangunterschiede akzeptabel.

Tabelle 6-1 veranschaulicht die beschriebene Vorgehensweise an einem Beispiel mit vier Zugfahrten aus dem Fahrplan, die die zwei Betriebsstellen „A“ und „B“ ihrer Laufwege in einer identischen Reihenfolge befahren.

Zugfahrten aus Fahrplan	Rangziffer	Reihenfolge der Fahrwege	Anzahl der entstandenen Modellzüge			
			Kriterium für den Laufwegvergleich			
			gleiche Fahrwege		Betriebsstellenreihenfolge	
			Rangziffertoleranz		Rangziffertoleranz	
Keine	± 2	keine	± 2			
ICE	2	A1-B1				
ECE	2	A2-B2				
EC	4	A1-B2	4	3	2	1
IC	4	A2-B2				

Tabelle 6-1: Beispiel für die Modellzugbildung aus dem vorgegebenen Fahrplan

Nach diesen Regeln gruppierte Züge können immer noch bedeutende Unterschiede in ihren fahrdynamischen Eigenschaften aufweisen und müssen gegebenenfalls weiter in mehrere Modellzüge mit ähnlicher Fahrdynamik unterteilt werden. Ausschlaggebend für die Unterteilung ist die Zugmasse als wichtigster Einflussfaktor auf das Beschleunigungsverhalten des Zuges. Aus den Zügen mit unterschiedlicher Masse werden mit Vorgabe des zulässigen Massenunterschiedes sogenannte Cluster gebildet, in denen jeweils ein repräsentativer Zug als Vorlage für einen Modellzug dient. Tabelle 6-2 zeigt einen Cluster von vier Zügen, aus dem ein Modellzug entsteht, der alle charakteristische Daten des Zuges 1 übernimmt.

Züge im Cluster	Masse [t]	Mittlere Masse [t]	Repräsentativer Zug
Zug 1	430	422,5	Zug 1
Zug 2	410		
Zug 3	400		
Zug 4	450		

Tabelle 6-2: Beispiel für die Cluster-Analyse mit einem zulässigen Massenunterschied von 30 t

In der Praxis kommen allerdings Züge mit gleichen Laufwegen und Rangordnungen aber unterschiedlichen Massen relativ selten vor. Am häufigsten werden die Zugfahrten aus einem Takt in einem Modellzug vereinigt. Für weniger komplexe Untersuchungsbereiche mit wenigen Betriebsstellen ist es ebenfalls zweckmäßig, größere Teile des Güter-, Nah- und Fernverkehrs in jeweils einzelnen Modellzügen zusammenzufassen.

Für die Berechnung von außerplanmäßigen Wartezeiten ist die Vorgabe des Verspätungsniveaus für jeden Modellzug notwendig. Dafür wird eine Stichprobe aus tatsächlich aufgetretenen Verspätungen ausgewertet. Diese werden näherungsweise als negativ exponentiell verteilt betrachtet. So ermittelt man zwei Parameter der Verteilung für jeden Modellzug i : die Wahrscheinlichkeit pV_{ei} für das Auftreten irgendeiner Einbruchsverspätung und die mittlere Einbruchsverspätung tV_{mi} . In [12] werden zwei Methoden zur Erfassung der Einbruchsverspätungen vorgeschlagen: Das verfeinerte Verfahren, in dem die Verspätungsparameter für einzelne Zuggattungen getrennt berechnet werden, und das Standardverfahren, welches einen allgemeinen Verspätungspegel ohne Unterscheidung zwischen einzelnen Modellzuggruppen besitzt.

Falls ein Fahrplan als Grundlage für die Erstellung der Modellzüge dienen soll, sind dort keinerlei Informationen über das Verhalten der Züge im Betriebsgeschehen enthalten. Vielmehr handelt es sich oft dabei um ein noch nicht realisiertes Betriebsprogramm, so dass keine Verspätungsstatistik zur Auswertung der Verspätungsparameter zur Verfügung steht. In solchen Fällen, insbesondere bei der Fahrplanübernahme, sind ersatzweise Erfahrungswerte von Einbruchsverspätungen je Zuggattung aus Tabelle 6-3 zu verwenden.

Zuggattung	ICE, ECE, IC, EC	IR, D, FD	RSB, E	S	Sg, Dg, GaG, SgK	Ng, Üg, Lz
pV_e	0,2 – 0,3	0,45 – 0,7	0,5 – 0,6	0,2 – 0,25	0,4 – 0,6	0,5 – 0,8
tV_m [min]	3,0 – 4,0	3,5 – 4,5	2,0 – 3,0	1,3 – 2,0	25 – 40	20 – 45

Tabelle 6-3: Erfahrungswerte für das Verspätungsniveau einiger Zuggattungen

6.5 Fahrtenfolgefälle

In allen analytischen Verfahren, die im Kapitel 4 aufgeführt wurden, spielt die Wahrscheinlichkeit h_{ij} des Auftretens des Zugfolgefalles „Modellzug i vor Modellzug j “ im Bezugszeitraum tU eine wichtige Rolle. Diese Wahrscheinlichkeit bzw. die mittlere Anzahl n_{ij} der Zugfolgefälle „ i vor j “ kann ausgehend vom Betriebsprogramm mit drei unterschiedlichen Methoden ermittelt werden.

Als Illustration für alle drei Verfahren wird ein überschaubares Beispiel mit drei Modellzügen A, B und C und einem Bezugszeitraum von 5 Stunden gewählt. Die Verteilung der Fahrten in diesem Zeitraum ist in Tabelle 6-4 schematisch dargestellt.

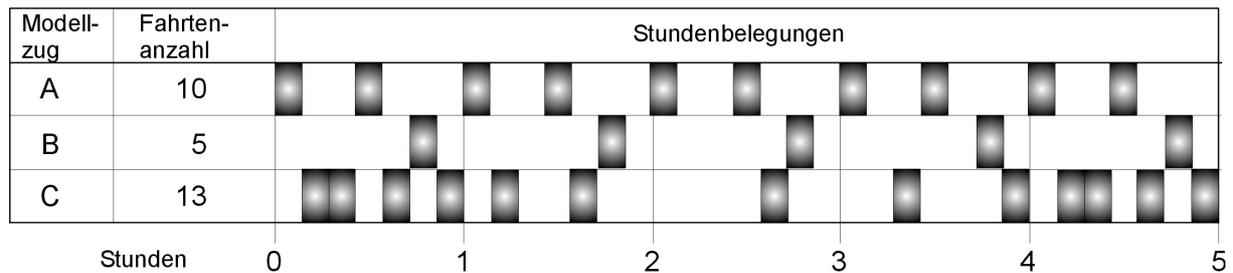


Tabelle 6-4: Beispiel für die Fahrtenreihenfolge mit drei Modellzügen

6.5.1 Fahrplanunabhängiges Standardverfahren

Beim fahrplanunabhängigen Standardverfahren wird ein zufälliges Auftreten der einzelnen Zugfolgefälle über die Dauer des Bezugszeitraums vorausgesetzt, so dass die Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten der Zugfolgefälle zu jedem beliebigen Zeitpunkt gleich sind. Diese Annahme ist für hochbelastete Strecken mit stark gestörtem Betrieb durchaus realitätsnah. Außerdem eignet sich das fahrplanunabhängige Verfahren für die Infrastrukturplanung, wenn das Betriebsprogramm nur in Form eines Entwurfs vorliegt und noch keine festen Trassierungen festgelegt sind.

Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Zugfolgefalls i vor j ergibt sich dann aus den Fahrtenzahlen n_i und n_j , die die Modellzüge i und j jeweils repräsentieren:

$$h_{ij} = \frac{n_i \cdot n_j}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m n_i \cdot n_j} = \frac{n_i \cdot n_j}{N^2} \tag{6-1}$$

Hierbei ist m die Anzahl der Modellzüge und N die Gesamtzahl der Fahrten im Bezugszeitraum. Für die mittlere Anzahl der Zugfolgefälle i vor j gilt entsprechend

$$n_{ij} = \frac{n_i \cdot n_j}{\sum_{i=1}^m n_i} = \frac{n_i \cdot n_j}{N} \tag{6-2}$$

Für das Beispiel aus der Tabelle 6-4 ergeben sich für n_{ij} folgende Werte:

Modellzug	A	B	C	Σ
A	3,57	1,79	4,64	10
B	1,79	0,89	2,32	5
C	4,64	2,32	6,04	13
Σ	10	5	13	28

Tabelle 6-5: Anzahl der Zugfolgefälle n_{ij} für Beispiel Tabelle 6-4 (fahrplanunabhängig)

Im Drei-Zug-Modell von WENDLER werden die Wahrscheinlichkeiten h_{ijk} für das Auftreten der Zugfolge $i \rightarrow j \rightarrow k$ verwendet. Sie lassen sich analog zu der Formel (6-1) berechnen:

$$h_{ijk} = \frac{n_i \cdot n_j \cdot n_k}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m n_i \cdot n_j \cdot n_k} = \frac{n_i \cdot n_j \cdot n_k}{N^3} \quad (6-3)$$

Im übrigen basiert die WENDLER'sche Light-Heavy-Traffic Approximation auf M/G/1-Bedienungssystem, d.h. es wird in jedem Fall von einer zufälligen Verteilung der Zugankünfte ausgegangen. Aus diesem Grunde sind andere Verfahren für die Abschätzung der Zugfolgefälle der Light-Heavy-Traffic Approximation grundsätzlich ungeeignet.

6.5.2 Fahrplanabhängiges Verfahren

Für das fahrplanabhängige Verfahren muss ein exaktes Abbild der Fahrplanstruktur vorliegen, aus dem die Häufigkeiten der Zugfolgefälle direkt abgezählt werden können. Die Stundenbelegungen aus Tabelle 6-4 entsprechen folgender Fahrtenreihenfolge: A→C→C→A→C→B→C→...→A→C→B→C. Die resultierende Matrix der aus dieser Fahrtenreihenfolge ausgezählten Zugfolgefälle ist in Tabelle 6-6 enthalten.

Modellzug	A	B	C	Σ
A	1	1	8	10
B	2	0	3	5
C	7	4	2	13
Σ	10	5	13	28

Tabelle 6-6: Anzahl der Zugfolgefälle n_{ij} für Beispiel Tabelle 6-4 (fahrplanabhängig)

Damit die letzte Fahrt C der Reihenfolge auch berücksichtigt wird und die Summen mit den tatsächlichen Fahrtenanzahlen übereinstimmen, wird der Zugfolgefall „letzter→erster“ (hier C→A) bei der Auszählung mitberücksichtigt.

Im Vergleich zum fahrplanunabhängigen Verfahren wird hier einigen Zugfolgefällen weniger Gewicht und damit geringere Bedeutung zugesprochen, weil sie im vorgesehenen Fahrplan seltener oder gar nicht auftreten. Umgekehrt spielen in diesem Verfahren mehrfach vorkommende Zugfolgefälle eine wichtigere Rolle. So kommt die Zugfolge A→A im Fahrplan nur einmal vor, und der Fall B→B tritt wegen des starren Taktes des Zuges B von 60 min überhaupt nicht auf. Dafür kommen die Zugfolgefälle A→C und C→A viel häufiger zustande, als dies mit den gleichen Wahrscheinlichkeiten geschätzt wurde.

6.5.3 Stundenganglinienverfahren

Während das fahrplanabhängige Verfahren zur Ermittlung der Fahrtenfolgehäufigkeiten realitätsnäher als das fahrplanunabhängige zu sein scheint, ist der Betriebsablauf mit häufigen und starken Verspätungen gewissermaßen einem Zufallsgeschehen ähnlich. Hier liefert auch das Auszählen der Zugfolgefälle aus dem Fahrplan ungenaue Ergebnisse. Ein Kompromiss in solchen Situationen ist die Wahl des Stundenganglinienverfahrens, bei dem innerhalb jeder Stunde eine Zufälligkeit der Zugfolgefälle unterstellt wird.

Ausgangspunkt für diese Methode ist die Stundenganglinie, die stundenweise Zugzahlen enthält. Der Tabelle 6-4 ist z.B. zu entnehmen, dass in der ersten Stunde zwei Fahrten vom Typ A, eine vom Typ B und vier vom Typ C verkehren. Analog zum fahrplanunabhängigen Verfahren lässt sich die wahrscheinliche Häufigkeit der Zugfolgefälle innerhalb dieser Stunde nach Formel (6-1) berechnen.

Über alle Stunden des Bezugszeitraums summiert, ergibt sich die Fahrtenfolgehäufigkeit h_{ij}

$$h_{ij} = \sum_{s=1}^h \frac{N_s}{N} \cdot \frac{n_{is} \cdot n_{js}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m n_{is} \cdot n_{js}} = \sum_{s=1}^h \frac{N_s}{N} \cdot \frac{n_{is} \cdot n_{js}}{N_s^2} = \sum_{s=1}^h \frac{n_{is} \cdot n_{js}}{N \cdot N_s} \quad (6-4)$$

und die entsprechende Anzahl der Fahrtenfolgefälle n_{ij}

$$n_{ij} = \sum_{s=1}^h \frac{n_{is} \cdot n_{js}}{\sum_{i=1}^m n_{is}} = \sum_{s=1}^h \frac{n_{is} \cdot n_{js}}{N_s} \quad (6-5)$$

Hierin bedeuten

- s Laufindex für die Stunden
- h Anzahl der Stunden im Bezugszeitraum
- n_{is}, n_{js} Anzahl der Züge vom Typ i bzw j in der Stunde S
- N_s Anzahl aller Züge in der Stunde S

Die Matrix der Zugfolgefälle für das aufgeführte Beispiel nimmt gemäß dem Stundenganglinienverfahren folgende Werte an:

Modellzug	A	B	C	Σ
A	3,74	1,88	4,38	10
B	1,88	0,93	2,19	5
C	4,38	2,19	6,43	13
Σ	10	5	13	28

**Tabelle 6-7: Anzahl der Zugfolgefälle n_{ij} für Beispiel Tabelle 6-4
(Stundenganglinienverfahren)**

Hier gewinnt z.B. der Zugfolgefall C→C wieder an Bedeutung, weil die meisten Fahrten vom Typ C in der ersten und der letzten Stunde stattfinden und dieser Fall schon bei wenigen Reihenfolgewechseln wahrscheinlicher wird.

6.5.4 Zusammenfassung

Die Wahl eines der aufgeführten Verfahren für die Kapazitätsberechnung ist vor allem von der Zielstellung der Untersuchung abhängig. Handelt es sich um eine reine Infrastrukturplanung ohne nähere Information über die Fahrplanstruktur, ist das fahrplanunabhängige Verfahren zu verwenden. Bei Leistungsuntersuchungen auf der Basis der vorhandenen Fahrpläne kann die fahrplanabhängige Methode eingesetzt werden, besonders wenn der zu untersuchende Fahrplan keine Zwängungen enthält. In allen anderen Fällen, u.a. wenn die betriebliche Stabilität einer vorgegebenen Fahrplanstruktur betrachtet werden soll, wird das Stundenganglinienverfahren empfohlen. Bei seltenen und kleinen Verspätungen verursacht das Ganglinienverfahren jedoch zu starke Abweichungen von den planmäßigen Zugfolgefällen und sollte durch das fahrplanabhängige Verfahren ersetzt werden.

Bei der Wahl soll man auf jeden Fall bedenken, dass jedem Zugfolgefall eine spezifische Mindestzugfolgezeit entspricht, die das wichtigste Element für die analytische Modellierung darstellt. Die Mindestzugfolgezeit enthält alle wesentlichen Informationen zu den Geschwindigkeitsunterschieden, zu den Rangbeziehungen und zu den Überholungsmöglichkeiten des Zugfolgefalles. Durch die geschätzte Anzahl der Fahrtenfolgefälle wird festgelegt, wie oft eine Bedienung mit ihrer Bedienungszeit, die unmittelbar von der Mindestzugfolgezeit abhängig ist, im System vorkommt. Deswegen spielt die zu berücksichtigende Fahrtenfolgehäufigkeit für die Kapazitätsberechnung eine überaus bedeutende Rolle.

7 Ermittlung von Mindestzugfolgezeiten

Alle Elemente des Bedienungssystems (vgl. Abschnitt 4.2) sind für die Modellierung in den letzten Kapiteln analysiert: Teilfahrstraßenknoten als Bedienungsanlagen, Bahnhöfe mit Haltepositionen als Warteräume, Modellzüge als Forderungenströme mit zufälligen Ankunftszeiten. Es bleibt noch festzustellen, durch welche Einflussgrößen die Bedienungsdauer im Bedienungskanal bestimmt wird. Jeder auftretende Wert dieser Zufallsgröße ist offenbar davon abhängig, welcher Zug sich in der Bedienungsanlage befindet und welcher auf die Bedienung wartet. Anhand eines Zugfolgefalles lässt sich der Superiorwert der entsprechenden Bedienungzeit abschätzen. Auch im wahrscheinlichkeitstheoretischen Modell (Abschnitt 4.1) ist die maximale Folgeverspätung, die durch die Behinderung zweier Fahrten entstehen kann, maßgebend.

Der für analytische Modelle und auch für die Fahrplankonstruktion zentrale Begriff „Mindestzugfolgezeit“ wurde zuerst von HAPPEL [20] bei einer Analyse des Fahrplanaufbaus eingeführt. Ausgangspunkt hierfür war die Berücksichtigung des Fahrens im festen Raumabstand bei der Fahrplankonstruktion, die einen an die Leistungsfähigkeit angrenzenden fehlerlosen Fahrplan als Ziel hatte.

7.1 Sperrzeiten und Sperrzeitentrepfen

Beim Fahren im festen Raumabstand wird die Strecke durch Hauptsignale in Blockabschnitte eingeteilt, die jeweils nur durch eine Zugfahrt belegt werden können.

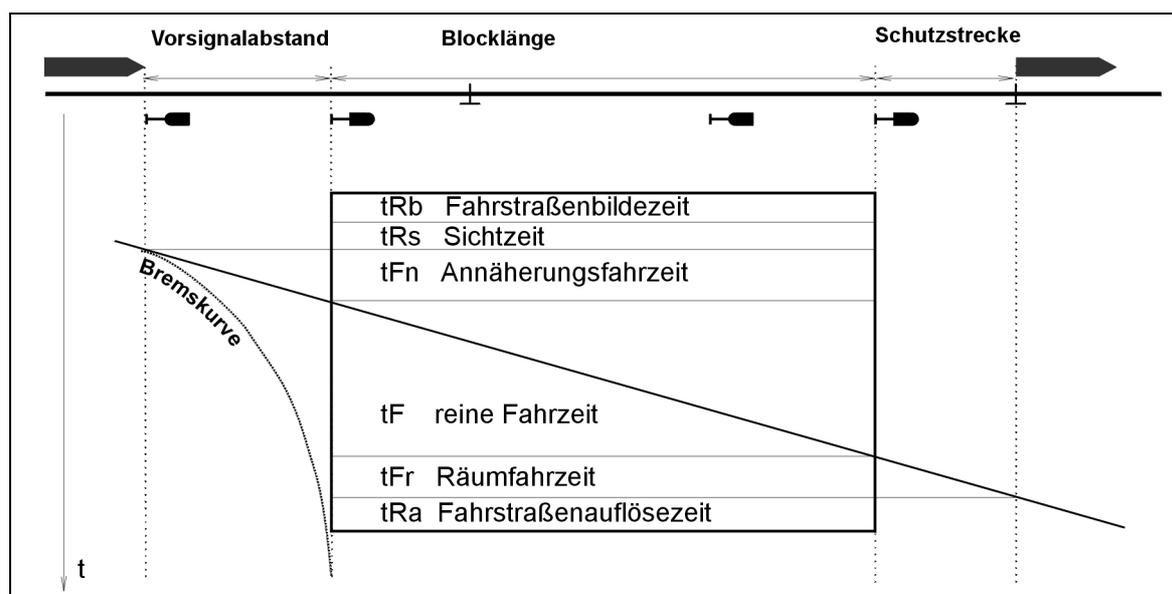


Abbildung 7-1: Aufbau einer Sperrzeit in einem Blockabschnitt

Dabei wird die Zeit, während der ein Blockabschnitt durch einen Zug betrieblich beansprucht ist, als **Sperrzeit** bezeichnet. Sie besteht aus der reinen Fahrzeit t_F und

weiteren systembedingten Zeitanteilen: Fahrstraßenbildezeit t_{Rb} , Sichtzeit t_{Rs} , Annäherungsfahrzeit t_{Fn} , Räumfahrzeit t_{Fr} und Fahrstraßenauflösezeit t_{Ra} (siehe Abbildung 7-1). Die Sperrzeitanteile sind außer von der Fahrgeschwindigkeit von vielen Faktoren abhängig, wie dem Vorsignalabstand, der Länge der Schutzstrecke, der Stellwerkstechnik, der Zuglänge usw. (näheres dazu u.a. in [6], [38], [63]). In Bahnhöfen können außerdem die belegten Blockabschnitte an den Fahrstraßenzugschlussstellen hinter den Weichen teilweise aufgelöst werden.

HAPPEL erkannte, dass der theoretisch kleinst mögliche Mindestzeitabstand zweier Züge von ihren jeweiligen Sperrzeiten beeinflusst wird, und bezeichnete ihn als Mindest-Zugfolgezeit. Diese Zeit bezog HAPPEL immer auf die Betriebsstellenmitte, sie galt nur bis zum nächsten Hauptsignal (vgl. Abbildung 7-2).

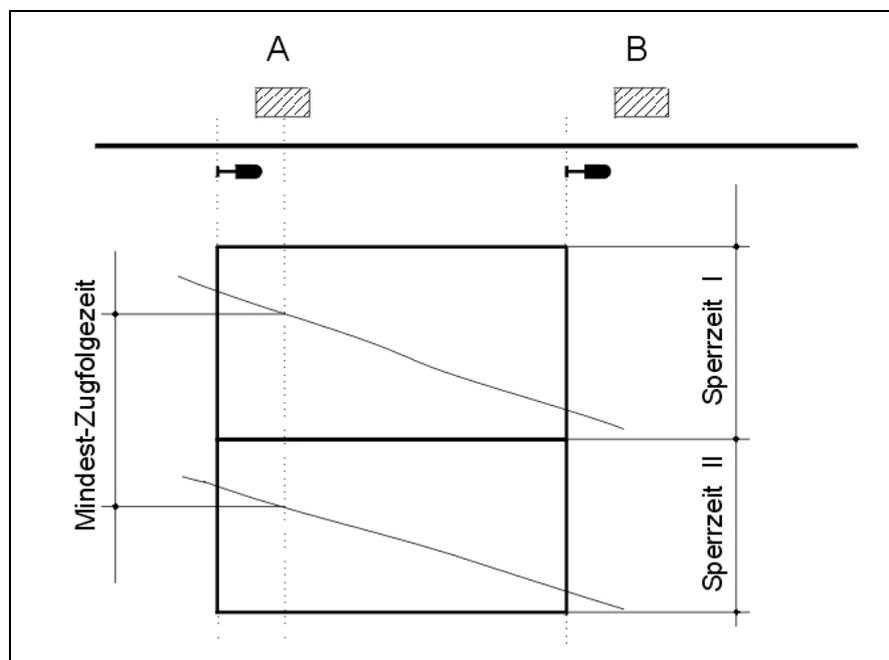


Abbildung 7-2: Mindest-Zugfolgezeit in der Betriebsstelle „A“ nach HAPPEL

Da sich das Netz eines Fahrplanes über mehrere Betriebsstellen erstreckt, hatte HAPPEL für jede Zugfolge eine ungünstigste Mindest-Zugfolgezeit als maßgebend für die Fahrplankonstruktion angenommen und damit den Begriff **Sperrzeitentreppe** als Reihenfolge der nebeneinanderliegenden Sperrzeiten zumindest indirekt eingeführt. Das Prinzip der maßgebenden Mindest-Zugfolgezeit ist jedoch nur für Zugfolgen mit gleich schnellen Zügen und somit mit identischen Sperrzeiten anwendbar. In anderen Fällen ist die Betrachtung der Sperrzeitentreppe als einer Einheit erforderlich, um die Mindest-Zugfolgezeiten in allen Betriebsstellen korrekt ermitteln zu können. In Abbildung 7-3 ist im Zugfolgefall „Zug 1 → Zug 2“ die größte Sperrzeit in der Betriebsstelle „B“ tatsächlich für den gesamten betrachteten Streckenabschnitt maßgebend, weil es sich dabei um gleiche Züge handelt. Die Mindest-Zugfolgezeit zwischen den Punkten b_1 und b_2 gilt dann für alle übrigen Betriebsstellen, d.h. $b_1 b_2 = a_1 a_2 = c_1 c_2$.

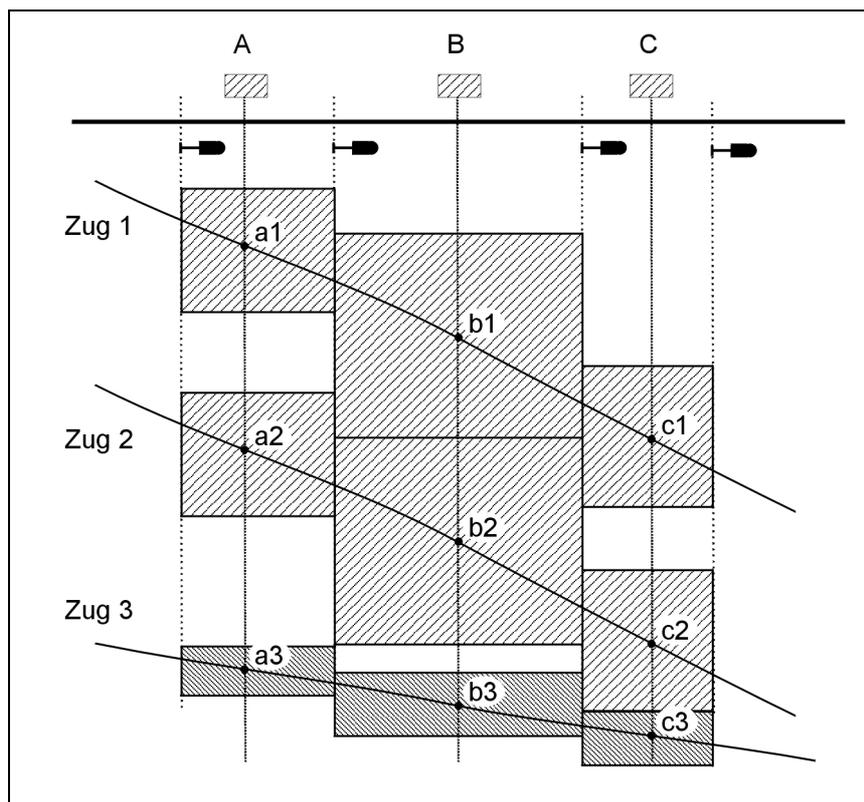


Abbildung 7-3: Einheitliche Sperrzeitentreppen

Im zweiten Fall kann der schnellere Zug 3 in der Betriebsstelle „B“ auf den Zug 2 jedoch nicht im Sperrzeitabstand folgen, weil er vor dem nächsten Hauptsignal auf die Freigabe des Blockabschnittes „C“ warten müsste. Bei „ungleichen“ Zugfolgefällen existiert außerdem keine maßgebliche Mindest-Zugfolgezeit, die für alle Betriebsstellenmitten als identische Größe feststeht. Für das aufgeführte Beispiel gilt: $a_2 a_3 > b_2 b_3 > c_2 c_3$.

Auch die Wahl des Bezugspunktes der Mindest-Zugfolgezeit auf der Zeit-Weg-Linie wirkt oft irritierend. Dieser Nachteil ist besonders ausgeprägt bei der HAPPEL'schen Mindest-Zugfolgezeit für Zugkreuzungen auf eingleisigen Strecken. In einem weiteren Beispiel Abbildung 7-4 folgt der Zug 2 dem Zug 1 in der Betriebsstelle „D“ in einem sehr kurzen Zeitabstand, während die gleiche Zugfolge in der Betriebsstelle „A“ eine deutlich größere Zeitspanne hervorruft. Soll nun der vermeintlich kleinste in der Betriebsstelle „D“ gemessene Zeitabstand zwischen den beiden Fahrten als maximale Bedienungszeit des Bedienungssystems „Streckenabschnitt“ angenommen werden oder der größte aus der Betriebsstelle „A“? Wenn man dagegen die Mindestzugfolgezeit zwischen den Anfängen von bestimmten Sperrzeiten misst, und nicht an den Zeit-Weg-Linien, erhält man eindeutige Werte. Denn durch die Belegungen des Zuges 1 wird für den Zug 2 der gesamte eingleisige Streckenteil solange gesperrt bleiben, bis der letzte Blockabschnitt vor der Betriebsstelle „D“ freigegeben wird.

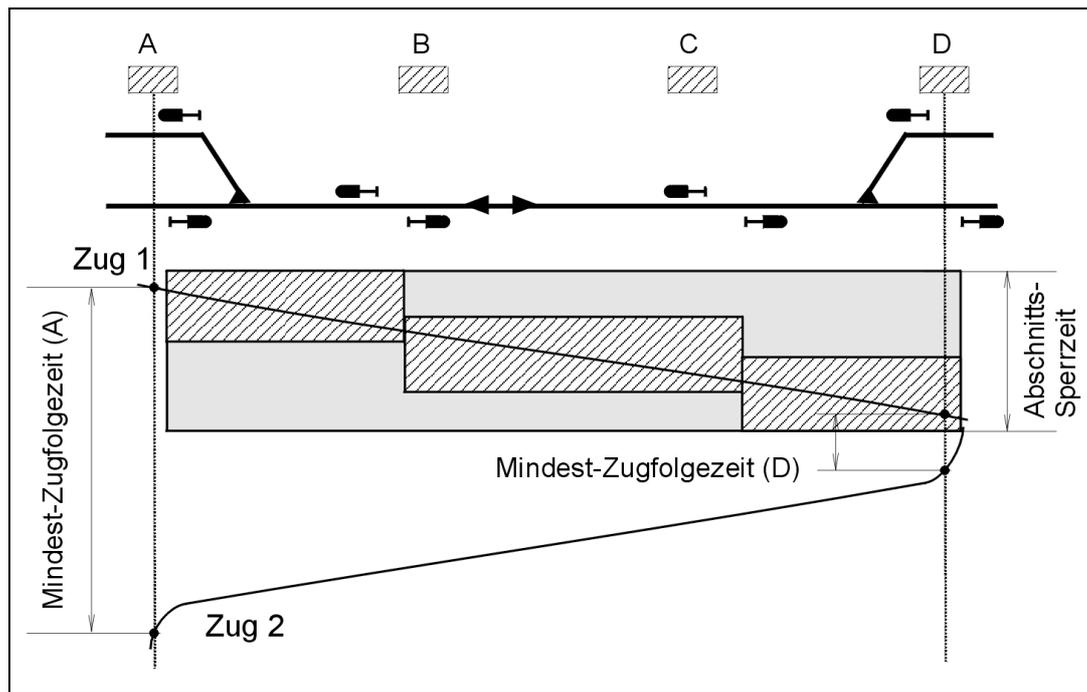


Abbildung 7-4: Mindest-Zugfolgezeiten nach HAPPEL in einem eingleisigen Streckenabschnitt

Dementsprechend kann die Streckenabschnittsbelegung des Zuges 2 frühestens nach dem Ablauf der in der Abbildung angedeuteten „Abschnitts-Sperrzeit“ beginnen. Die Abschnitts-Sperrzeit erstreckt sich auf alle Betriebsstellen des Streckenabschnittes und ist somit unabhängig von den Trassenbezugspunkten.

7.2 Mindestzugfolgezeit als Wartezeit

Bedienungstheoretisch ist die **Mindestzugfolgezeit** maximale Wartezeit, die bei nahezu gleicher Beanspruchung eines Bedienungskanals durch zwei unmittelbar aufeinander folgende gleichrangige Einheiten für die zweite entsteht. Dementsprechend wird in [46] die Mindestzugfolgezeit $t_{Z_{ij}}$ zwischen zwei Zügen i und j als Wartezeit interpretiert, die der Zug j bei Gleichrang durch den Zug i maximal erfahren kann. Da sich ein Wartevorgang im System Eisenbahn immer auf einen Haltepunkt mit Überholungsmöglichkeit bezieht, wird die Mindestzugfolgezeit am Anfang des betroffenen **Überholungsabschnittes** gemessen. In grafischer Darstellung bedeutet dies, dass die Sperrzeitentreppen beider Züge innerhalb des Überholungsabschnittes bis zu einer Berührung aneinander geschoben werden. Der zeitliche Abstand zwischen den Anfängen von den im Abschnitt ersten Sperrzeiten ist dann die gesuchte Mindestzugfolgezeit.

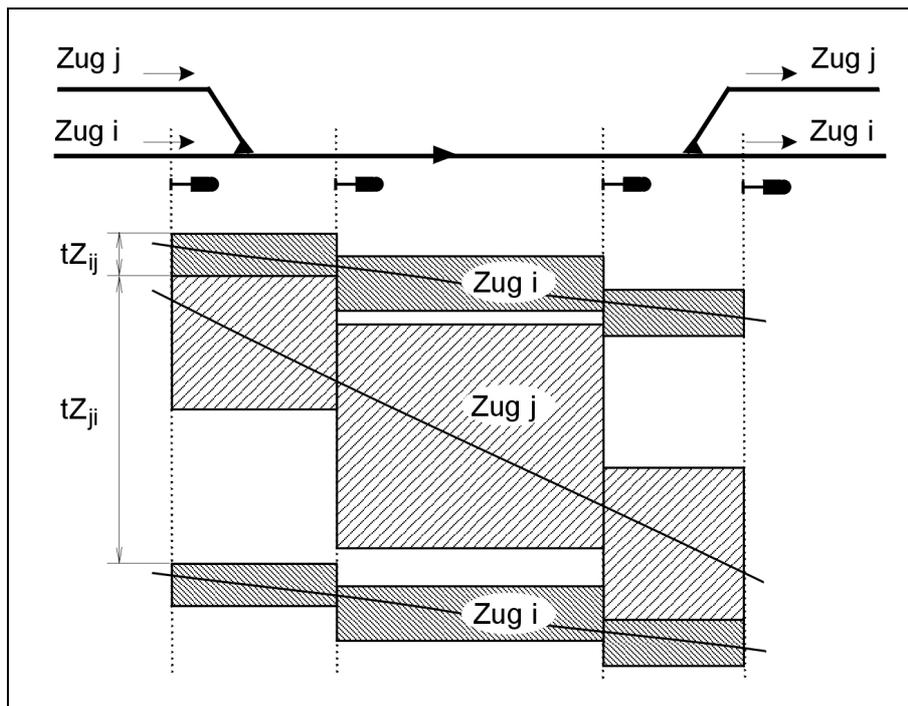


Abbildung 7-5: Mindestzugfolgezeiten in einem Überholungsabschnitt

In Abbildung 7-5 sind die grafisch ermittelten Mindestzugfolgezeiten für zwei Zugfolgefälle dargestellt:

1. schnell \rightarrow langsam ($i \rightarrow j$): Die Sperrzeitentreppen berühren sich schon im ersten Blockabschnitt des Überholungsabschnittes, und die Mindestzugfolgezeit $t_{Z_{ij}}$ ist identisch mit der ersten Sperrzeit des Zuges i
2. langsam \rightarrow schnell ($j \rightarrow i$): Hier berühren sich die Sperrzeitentreppen erst im letzten Blockabschnitt, die Mindestzugfolgezeit $t_{Z_{ji}}$ wird aber wie im ersten Fall am Anfang des Überholungsabschnittes gemessen

Abbildung 7-6 verdeutlicht, weswegen der zweite Zug im Paar eine Wartezeit erhält, die höchstens gleich der Mindestzugfolgezeit sein kann. In diesem Beispiel handelt es sich wieder um einen Zugfolgefall „langsam \rightarrow schnell“ mit gleicher Rangordnung. Die Lage des Zuges j (dick umrandete Sperrzeitentreppe) wird festgesetzt, um zu untersuchen, wie der schnellere Zug i (schraffierte Sperrzeitentreppe) behindert wird. Zum Zeitpunkt t_1 beansprucht der Zug i den ersten Blockabschnitt noch vor dem Zug j und erfährt dadurch selbst keine Wartezeit. t_2 ist der kritische Punkt, ab dem die Züge tatsächlich in der Reihenfolge „ j vor i “ ankommen. Wenn der Zug i in diesem Moment den ersten Blockabschnitt besetzt vorfindet, muss er bis zum Zeitpunkt t_4 warten.

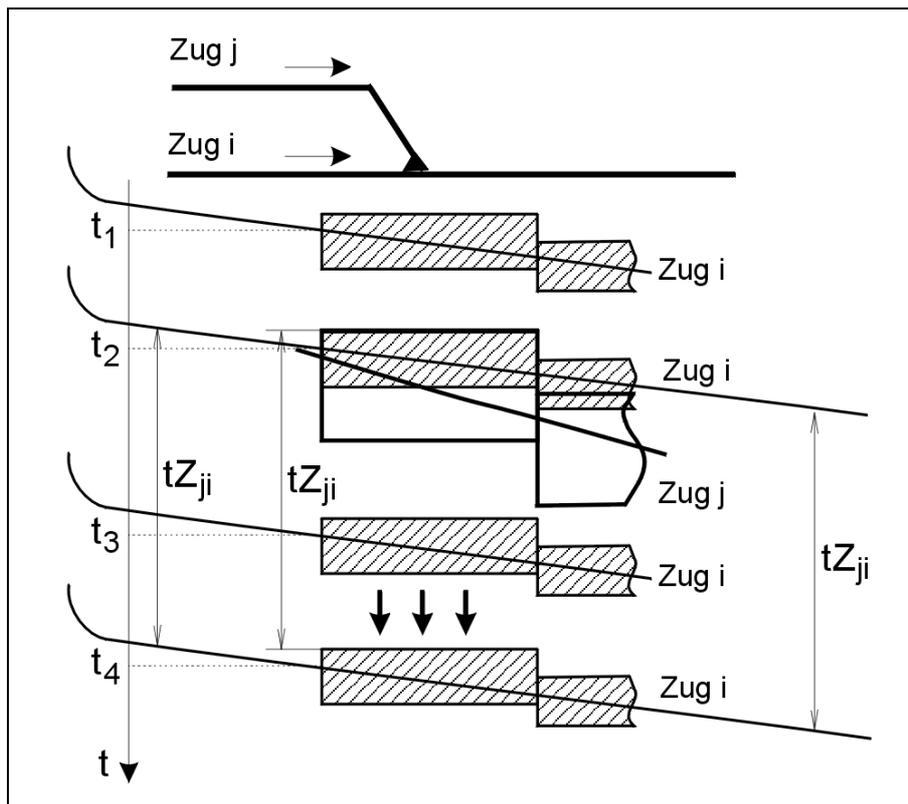


Abbildung 7-6: Mindestzugfolgezeit als maximale Wartezeit

Dabei spielt es keine Rolle, ob er an der Halteposition im Bahnhof wartet, oder langsam hinter dem Zug j fährt. Wichtig ist, dass seine Zeit-Weg-Linie am Ende des Überholungsabschnittes ausgehend von der ursprünglichen Lage genau um $t_{Z_{ji}}$ verschoben sein wird. Wenn der Zug i zu einem beliebigen Ankunftszeitpunkt t_3 , der zwischen t_2 und t_4 liegt, ankommt, beträgt seine Wartezeit weniger als $t_{Z_{ji}}$, und zwar genau die Differenz zwischen t_3 und t_4 . $t_{Z_{ji}}$ ist mit anderen Worten der Superiorwert der Bedienungszeit des Zuges j aus der Sicht des Zuges i bei gleichrangiger Behandlung.

Wenn einer der beiden Züge vorrangig ist, darf er durch den anderen nicht behindert werden, d.h. keine Wartezeit erfahren. Dies wird mit Hilfe der Dispositionsbelegungszeit tD_{ij} bewerkstelligt (vgl. Abschnitt 4.1.2). Die maximale Wartezeit tW_j des Zuges j in einem beliebigen Zugfolgefall „i vor j“ oder „j vor i“ ist dann gleich $tZ_{ij} + tD_{ij}$. Laut Formel (4-12) (Seite 57) gilt bei Gleichrang $tD_{ij} = 0$, und die Wartezeit tW_j beträgt im ungünstigsten Fall tZ_{ij} . Wenn der Zug j Vorrang hat, ist

$$tW_j \leq tZ_{ij} + tD_{ij} = tZ_{ij} - tZ_{ij} = 0 \quad (7-1)$$

Wie erwartet erhält der vorrangige Zug keine Wartezeit. Beim Nachrang des Zuges j muss er in ungünstigstem Fall die Dauer beider Mindestzugfolgezeiten abwarten:

$$tW_j \leq tZ_{ij} + tD_{ij} = tZ_{ij} + tZ_{ji} \quad (7-2)$$

Grafisch ist der Zugfolgefall mit Nachrang in Abbildung 7-7 dargestellt

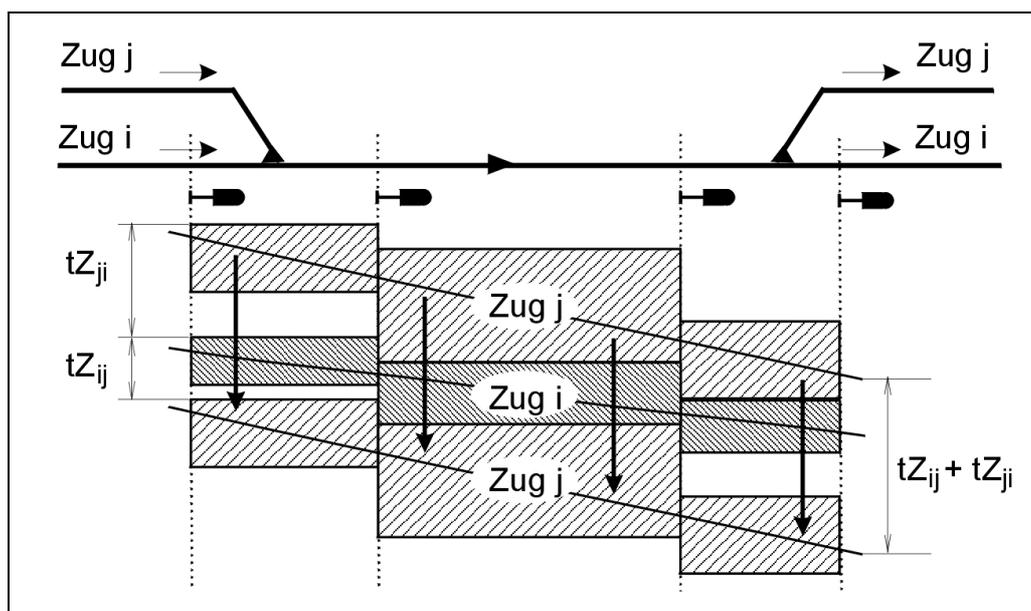


Abbildung 7-7: Maximale Wartezeit bei Nachrang

Hierbei ist folgende Situation zu beobachten: Falls nach der Ankunft des niederrangigen Zuges j vor dem Eintreffen des vorrangigen Zuges i weniger Zeit als tZ_{ji} zur Verfügung steht, wird zum einen die Zugreihenfolge getauscht, und zum anderen muss der Zug j nach der Überholung wie beim gleichrangigen Fall noch die komplette Mindestzugfolgezeit tZ_{ij} abwarten.

Im Richtungswechselbetrieb (u.a. auf eingleisigen Strecken) sind die Mindestzugfolgezeiten in den **Kreuzungsabschnitten** zu ermitteln. Wenn ein Zug einen Kreuzungsabschnitt befährt, wird seine komplette Sperrzeitentreppe für entgegenkommende Fahrten als eine einzige große Sperrzeit interpretiert. Die Dauer dieser Abschnitts-Sperrzeit ist nichts anderes als die Mindestzugfolgezeit (vgl. Abbildung 7-4).

7.3 Algorithmen zur Ermittlung der Mindestzugfolgezeit

Das „Aneinanderschieben“ von zwei Sperrzeitentreppe in einem Überholungsabschnitt kann mit Hilfe von Sperrzeitenanteilen mathematisch beschrieben werden. Dabei ist derjenige Blockabschnitt für den minimal möglichen Zeitabstand zwischen den Anfängen der ersten Sperrzeiten bestimmend, in dem sich die Sperrzeitentreppe berühren,.

In einem in [9] vorgeschlagenen Algorithmus für die Ermittlung der Mindestzugfolgezeit im Einrichtungsbetrieb wird folgende Gleichung verwendet:

$$tZ_{ij} = \max_{n=1}^k \left[[tRb_{i1} + tRs_{i1} + tFn_{i1}] + \sum_{x=1}^n tF_{ix} + [tFr_{in} + tRa_{in}] + [tRb_{jn} + tRs_{jn} + tFn_{jn}] - \sum_{x=1}^{n-1} tF_{jx} - [tRb_{j1} + tRs_{j1} + tFn_{j1}] \right] \quad (7-3)$$

Die Blockabschnitte werden hier von 1 bis k nummeriert, die reinen Fahrzeiten über alle Blockabschnitte summiert. In Abbildung 7-8 sind alle übrigen Sperrzeitenanteile der Formel (7-3), sowie die ermittelte Mindestzugfolgezeit tZ_{ij} aufgeführt.

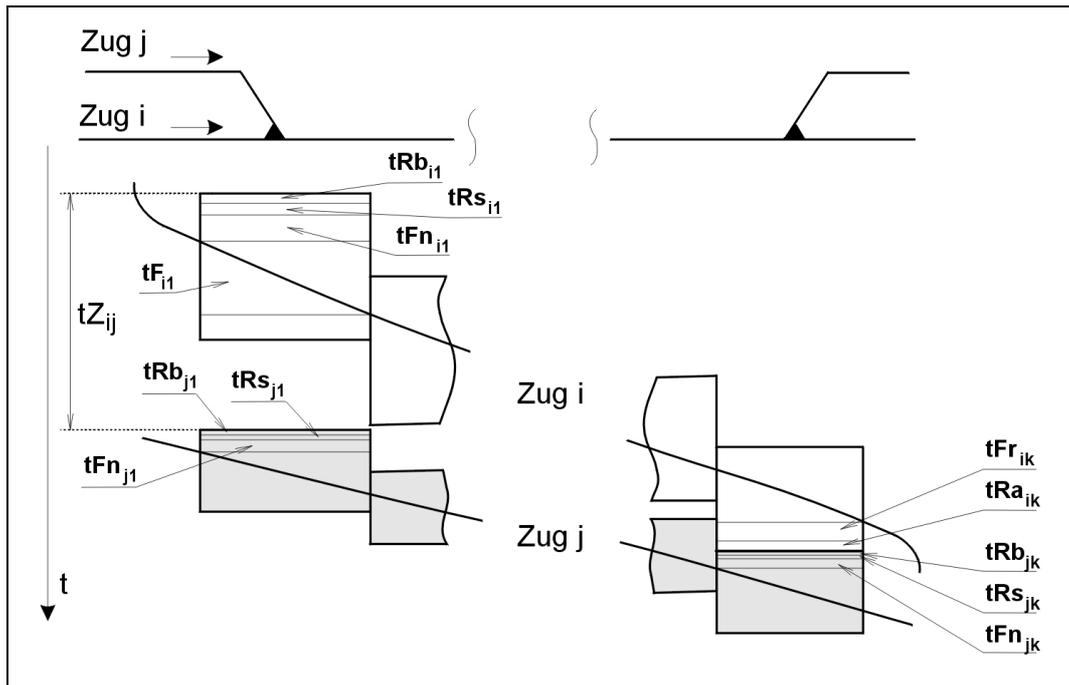


Abbildung 7-8: Ermittlung der Mindestzugfolgezeit in einem Überholungsabschnitt

Im dargestellten Zugfolgefall ist der erste Zug langsamer, und die Sperrzeitentreppe berühren sich erst im letzten gemeinsamen Blockabschnitt, welcher für den Zugfolgefall maßgebend ist. Bei vertauschter Zugfolge wäre die erste Sperrzeit für die Mindestzugfolgezeit maßgebend. Bei gleich schnellen Zügen können sich die Sperrzeitentreppe in einem beliebigen Blockabschnitt des Überholungsabschnittes treffen (vgl. Abbildung 7-3 und Abbildung 7-7), so dass die maximale Differenz in der Formel (7-3) auf diesen Abschnitt bezogen wird.

Im Richtungswechselbetrieb wird die gesamte Sperrzeitentreppe des ersten Zuges im Kreuzungsabschnitt gewissermaßen zu einer Sperrzeit. Die Mindestzugfolgezeit ist in diesem Fall von den Sperrzeitenanteilen des zweiten Zuges unabhängig, wie es auch aus der Formel (7-3) für $k = 1$ folgt. Man muss also nur den „Umfang“ der Sperrzeitentreppe der ersten Fahrt bemessen:

$$tZ_{ij} = tRb_{i1} + tRs_{i1} + tFn_{i1} + \sum_{x=1}^k tF_{ix} + tFr_{ik} + tRa_{ik}, \quad \forall j \quad (7-4)$$

Bei der EDV-Implementierung vereinfachen sich die geschilderten Verfahren dadurch, dass die Sperrzeitentreppe bereits unmittelbar nach der Fahrzeitrechnung vollständig erstellt und gespeichert werden. Alle Sperrzeiten stehen dann für die Ermittlung der Mindestzugfolgezeiten in Form von „Belegungen“, deren Anfangs- und Endzeitpunkte bekannt sind, zur Verfügung. Folglich kann in der Gleichung (7-3) auf einzelne Sperrzeitenanteile verzichtet werden. Stattdessen wird t_{Sa} für den Anfang einer Sperrzeit bzw. t_{Se} für deren Ende verwendet:

$$t_{Z_{ij}} = \max_{n=1}^k [t_{Se_{in}} - t_{Sa_{i1}} - (t_{Sa_{jn}} - t_{Sa_{j1}})] = \max_{n=1}^k [t_{Se_{in}} - t_{Sa_{i1}} + t_{Sa_{j1}} - t_{Sa_{jn}}] \quad (7-5)$$

Abbildung 7-9 erklärt die Vorgehensweise des rationalisierten Algorithmus für die Mindestzugfolgezeitrechnung. Hierbei spielt es keine Rolle, wie weit die beiden Sperrzeitentreppe zeitlich voneinander entfernt liegen und in welcher Reihenfolge sie gespeichert sind. Einzelne Sperrzeitabmessungen können auch negativ sein, wenn z.B. die Fahrt noch am Vortag, also vor dem relativen Nullpunkt der Zeitachse beginnt. Allein die Differenzen zwischen den charakteristischen Werten einzelner Sperrzeitentreppe sind für die Mindestzugfolgezeiten entscheidend.

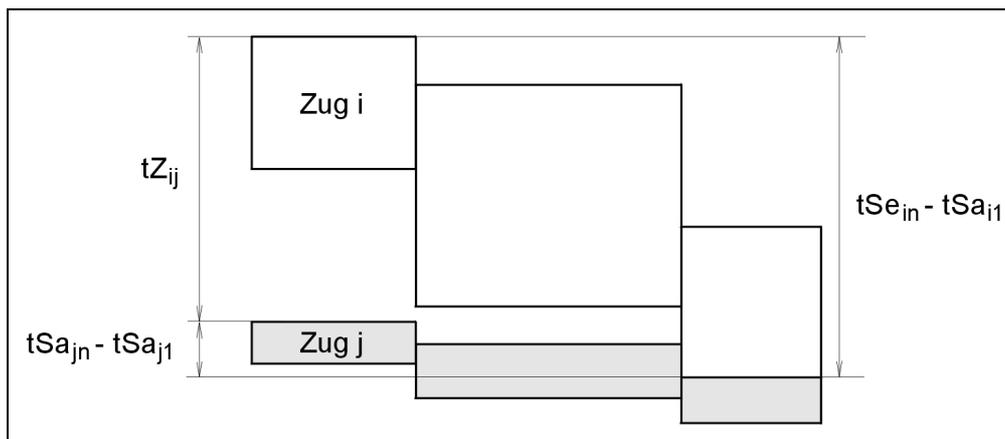


Abbildung 7-9: Ermittlung der Mindestzugfolgezeit mit Hilfe von Sperrzeitenabmessungen

In Kreuzungsabschnitten beim Richtungswechselbetrieb genügen für die Mindestzugfolgezeit die Abmessungen der ersten Sperrzeitentreppe:

$$t_{Z_{ij}} = t_{Se_{in}} - t_{Sa_{i1}}, \quad \forall j \quad (7-6)$$

Programmtechnisch gesehen erweist sich für den Richtungswechselbetrieb das vorsorgliche Speichern der Kreuzungsabschnittssperrzeiten bei jeder Weichenbelegung als noch handlicher. Dies bedeutet, dass bereits die erste Sperrzeit des Kreuzungsabschnittes über den weiteren Verlauf der Sperrzeitentreppe bis zur nächsten Weiche „informiert“ ist, und so das Durchlaufen über alle Blockabschnitte bei der Mindestzugfolgezeitermittlung entfällt.

7.4 Überholungs- und Kreuzungsabschnitte

Mindestzugfolgezeiten sind für die Bedienungszeiten der Warteschlangensysteme ausschlaggebend und werden zwischen den Wartepositionen, also innerhalb von Überholungsabschnitten, ermittelt.

In den theoretischen Studien wie [17], [48] oder [66] wird das Problem der Bildung von Überholungsabschnitten oft vernachlässigt, wobei es für die Anwendung der Wartemodelle richtungsweisend ist. Die einzige bekannte präzise Definition für Überholungsabschnitte liefert die Dienstschrift der DB AG 405 [8]. Sie lautet: „Überholungsabschnitte sind Teile der Strecke oder des gemeinsamen Laufweges beider Züge eines Zugfolgefalls, die durch Überholungsbahnhöfe des nachrangigen Zuges begrenzt werden“.

Die Festlegung der Überholungsbahnhöfe richtet sich vor allem nach der Art des Modellzuges. Laut Wartezeitvorschrift der Deutschen Bahn [10] sollen

- zeitlich verdrängte Züge nicht auf der freien Strecke, sondern auf Bahnhofsgleisen abwarten, bis sie die Strecke zügig befahren können
- Reisezüge aus Sicherheitsgründen für die Reisenden nur solche Bahnhöfe als Wartepositionen nutzen, in denen sie planmäßig halten

Demzufolge können Personenzüge nur bei einem planmäßigen Halt, schnellfahrende Güterzüge nur am Anfang/Ende eines Streckenabschnitts und langsame Güterzüge auf allen Bahnhöfen mit geeigneten Haltepositionen überholt werden.

7.4.1 Einsicht in das SLS-Modell

Die Auslegung des Begriffs „Überholungsabschnitt“ in den Programmen STRELE und ALFA offenbart einige Unstimmigkeiten, die hier anhand einiger Beispiele aufgezeigt werden sollen.

Für gleichrangige Zugfolgefälle werden auf SLS-Strecken keine Überholungen vorgesehen, so dass der zugrundeliegende Überholungsabschnitt hierbei dem gemeinsam benutzten Teil des Streckenabschnitts entspricht. Ein Knotenpunktbahnhof von ALFA stellt dennoch ausnahmsweise die Grenze des Überholungsabschnittes für alle Modellfahrten dar. In Abbildung 7-10 ist ein gleichrangiger Zugfolgefall auf einem Streckenabschnitt dargestellt. Der erste Zug i hält auf dem durchgehenden Hauptgleis des Bahnhofes B und behindert damit den Zug j . Da für gleichrangige Züge der gesamte gemeinsame Laufweg als ein Überholungsabschnitt gilt, soll die Haltezeit des ersten Zuges laut Definition des Überholungsabschnittes sozusagen als Halt auf freier Strecke komplett in der Mindestzugfolgezeit $t_{z_{ij}}$ enthalten sein.

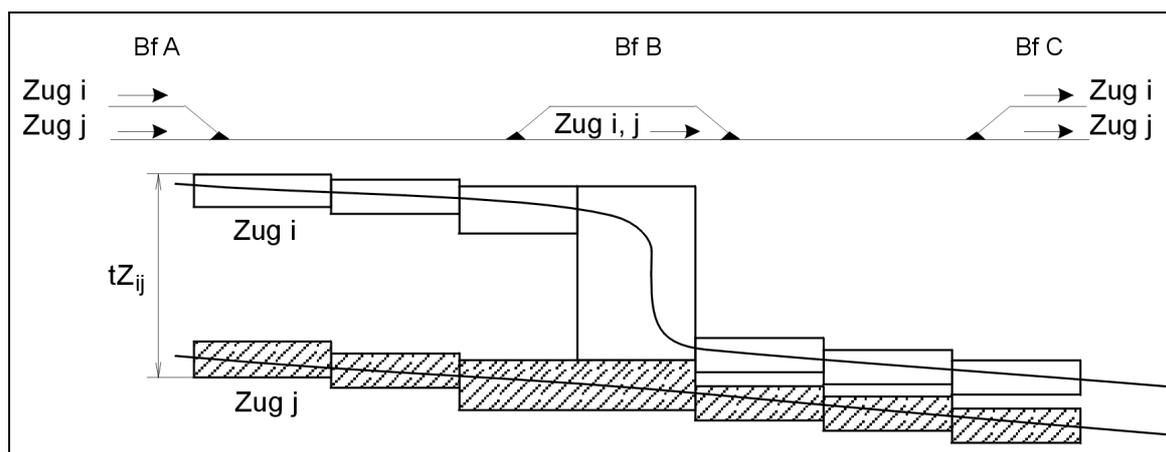


Abbildung 7-10: Gesamter Überholungsabschnitt bei gleichrangigem Zugfolgefall

Eine unwesentliche Änderung der beschriebenen Situation, die Umleitung des haltenden Zuges auf ein Überholungsgleis im Bahnhof B, hat eine deutlich geringere Mindestzugfolgezeit als Folge (Abbildung 7-11). Jetzt ist der gemeinsame Laufweg der Züge in der Mitte unterbrochen und es findet ein Reihenfolgewechsel statt. Infolgedessen muss der Zugfolgefall prinzipiell in zwei Überholungsabschnitte A-B und B-C unterteilt und die Mindestzugfolgezeiten an den Anfängen beider Abschnitte gemessen werden.

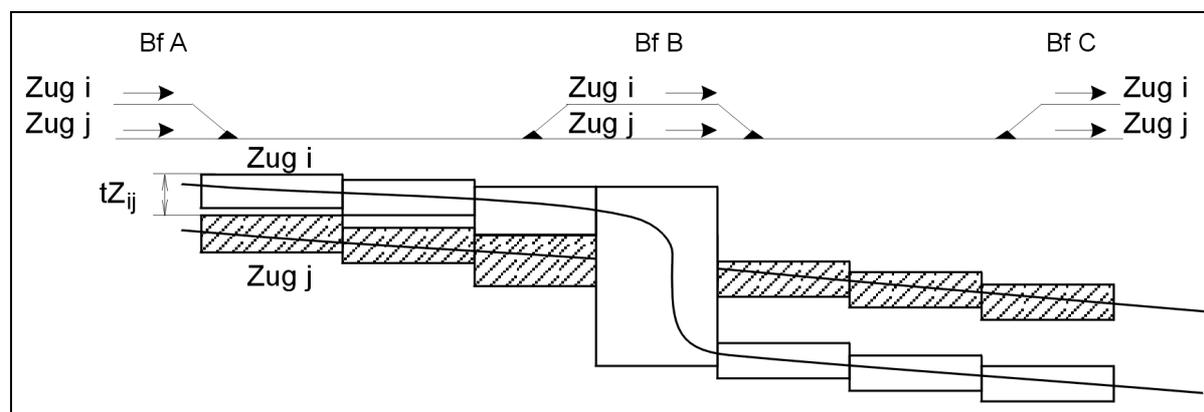


Abbildung 7-11: Überholung bei gleichrangigem Zugfolgefall

In welchem der beiden Fälle wird die Mindestzugfolgezeit korrekt berechnet? Die Antwort ist nicht eindeutig, sie ist vielmehr davon abhängig, ob der erste Zug das Überholungsgleis des Bahnhofes B im konkreten Fall frei oder besetzt vorfindet und ob der Bahnhof B für den Wartevorgang überhaupt geeignet ist. In der Fahrplankonstruktion oder bei der Simulation kann für jede bestimmte Situation festgestellt werden, ob eine Überholung durchführbar ist und sich als vorteilhaft erweist. Analytisch kann man dagegen nur eine Wahrscheinlichkeit berechnen, mit der das Überholungsgleis im Durchschnitt zur Verfügung steht (In diesem Zusammenhang ist vor allem ein Ansatz von GAST [17] zu erwähnen). Aber auch wenn diese Wahrscheinlichkeit geschätzt werden kann, bleibt unklar, welche Mindestzugfolge-

zeiten für welche Zugfolgefälle einzusetzen sind, oder ob eventuell mit einem Mittelwert gearbeitet werden soll.

In SLS wird folgende Lösung verwendet: Für jeden Modellzug wird in möglichen Überholungsbahnhöfen eine spezifische Halteart: Verkehrshalt, Betriebshalt (nur für Güterzüge), Überholungshalt oder Parallelhalt im ALFA-Knoten vereinbart, anhand deren zu entscheiden ist, ob in dem jeweiligen Überholungsbahnhof die Grenze für einen Überholungsabschnitt gezogen werden kann. Falls für den Zug i (Abbildung 7-10) in der Betriebsstelle B nur ein Verkehrshalt auf dem durchgehenden Hauptgleis definiert wird, kann hier keine Überholung stattfinden. Um eine Überholungsmöglichkeit zuzulassen, muss in der gleichen Betriebsstelle zusätzlich ein Überholungshalt auf einem der Überholungsgleise vorgegeben werden. Abbildung 7-12 illustriert diese Vorgehensweise: Der betrachtete Modellzug kann in diesem Beispiel in Aachen Hauptbahnhof, in Eschweiler und in Düren Personbahnhof überholt werden. In anderen Betriebsstellen wird keine Überholung erlaubt, auch wenn der Zug dort hält und parallele Gleise vorhanden sind.

M O D E L L Z U G D A T E N A U S G A B E					
H a l t e					
Nr.	Betriebsstelle	Gleis	Lage des Gleises	Art des Haltes	Haltzeit[min]
1507	Aachen Hbf	3	falsch	Verkehrshalt	5.00
1508	Aachen Hbf	2	falsch	Überholungshalt	5.00
1302	Aachen RE Pbf	2	durchgeh. Gl.	Verkehrshalt	1.00
1001	Eilendorf	Eilendo	durchgeh. Gl.	Verkehrshalt	1.00
902	Stolberg Pbf	2	durchgeh. Gl.	Verkehrshalt	1.00
702	Eschweiler	3	durchgeh. Gl.	Verkehrshalt	1.00
701	Eschweiler	4	richtig	Überholungshalt	1.00
601	Nothberg	Nothber	durchgeh. Gl.	Verkehrshalt	1.00
401	Langerwehe	Gleis 1	richtig	Verkehrshalt	1.00
102	Düren Pbf	5	richtig	Überholungshalt	1.00
103	Düren Pbf	3	richtig	Verkehrshalt	1.00

Abbildung 7-12: Besondere Haltearten der SLS-Modellzüge¹¹

Der geschilderte SLS-Ansatz ist einerseits sehr genau, da hierdurch für jede Zuggattung spezifische Überholungsabschnitte berechnet werden. Andererseits stellt die Vorgabe der Haltearten durch den Programmbenutzer ein gewisses Risiko dar, weil dadurch die Mindestzugfolgezeiten und somit die Ergebnisse der Kapazitätsberechnungen von seiner Kompetenz und Erfahrung abhängig werden. Außerdem ist es für umfangreiche Untersuchungsbereiche mit einer großen Anzahl von Modellzügen und Betriebsstellen sehr aufwendig, für jeden Zug jeden einzelnen Bahnhof auf die Überholungsmöglichkeiten manuell zu überprüfen. In diesem Fall wäre im übrigen auch keine direkte Fahrplanübernahme (siehe Abschnitt 6.4) möglich, weil die erforderlichen Informationen für SLS-Haltearten in RUT-0 nicht vorgesehen sind.

¹¹ Ausgabedaten aus einem STRELE-Beispielsprojekt

Ein letztes Argument gegen die Verwendung der besonderen Haltearten von SLS ist die bereits erwähnte Einheitlichkeit der SPURPLAN-Infrastruktur, die keinen prinzipiellen Unterschied zwischen Strecke, Knotenpunkt- und Überholungsbahnhof ausmacht.

Das Problem der Überholungsbahnhöfe kann noch aus einem anderen Blickwinkel betrachtet werden. Bei den für die Eisenbahnsysteme entwickelten bedienungstheoretischen Modellen wird immer angenommen, dass für alle Wartevorgänge ein unendlicher Warteraum zur Verfügung steht. So kann auch der kleine Bahnhof B in Abbildung 7-11 zunächst als ausreichend dimensioniert betrachtet werden. Demzufolge werden dort auch alle Überholungen erlaubt. Falls der Bahnhof jedoch aufgrund einer unzureichenden Gleisanzahl und langer Haltezeiten einen Leistungsengpass darstellt, muss dieser Engpass mit anderen Mitteln identifizierbar sein. Gut dafür geeignet ist ein ebenfalls bedienungstheoretisches Modell zur Auswertung der Gleisgruppenkapazität, das im Programm GLEISE realisiert ist und im Abschnitt 2.3 bereits vorgestellt wurde.

Die Suche nach Überholungsmöglichkeiten für einzelne Zugfolgefälle soll in ANKE konsequenterweise genauso wie die Teilfahrstraßenknotenabgrenzung weitgehend automatisch verlaufen. Selbstverständlich darf dabei kein „blindes“ Zuordnen aller Betriebsstellen mit mehr als einem vorhandenen Gleis zu Überholungsbahnhöfen vorgenommen werden. Vielmehr muss neben den genannten Anforderungen der DB-Vorschrift immer überprüft werden, ob eine Überholung anhand der geeigneten Gleise, der vorgegebenen Haltepositionen und der vorhandenen Betriebsstellenfahrwege tatsächlich für jeden einzelnen Zugfolgefall durchführbar ist.

Bevor das Konzept für ein automatisiertes Überholungen-Suchverfahren formuliert wird, erfolgt eine kritische Auseinandersetzung mit einigen weiteren wichtigen Aspekten der Mindestzugfolgezeitenermittlung aus SLS. Ausgangspunkt für diese Analyse war ein qualitativer Vergleich der Leistungsfähigkeitsrechnung von ALFA und ANKE, der neben einer kritischen Begutachtung des SLS-Modells auch Verbesserungsbedarf für ANKE-Algorithmen hervorgerufen hatte. Eine kurze Beschreibung des Vergleiches sowie die wichtigsten Erkenntnisse aus der Gegenüberstellung zweier Realisationen gleichartiger analytischer Modelle sind in Anlage B enthalten.

Nach der bisherigen Ausführung wird der in Abbildung 7-10 und Abbildung 7-11 dargestellte Zugfolgefall in SLS bei Gleichrang anscheinend inkorrektweise nie in zwei Überholungsabschnitte unterteilt (außer im ALFA-Knotenpunktbahnhof bei vorgegebenem Parallelhalt). Noch interessanter ist die Situation im gleichen Fall, wenn der im Bahnhof B haltende Zug i gegenüber dem durchfahrenden Zug j Vorrang hat (j kann z.B. ein schnellfahrender Güterzug der Gattung Sg oder TEEM sein).

Abbildung 7-13 zeigt, dass eine Überholung durch einen nachrangigen Zug prinzipiell möglich ist, wenn der höherrangige dadurch nicht behindert wird (Lage a des Zuges j). Ab der Lage b käme es aber zu einer Behinderung im Abschnitt zwischen den Bahnhöfen B und C. Dies hätte die Verschiebung des Zuges j in die Lage c zur Folge. Die maximale Wartezeit des Zuges j ist daher gleich der Mindestzugfolgezeit $t_{Z_{ijc}}$.

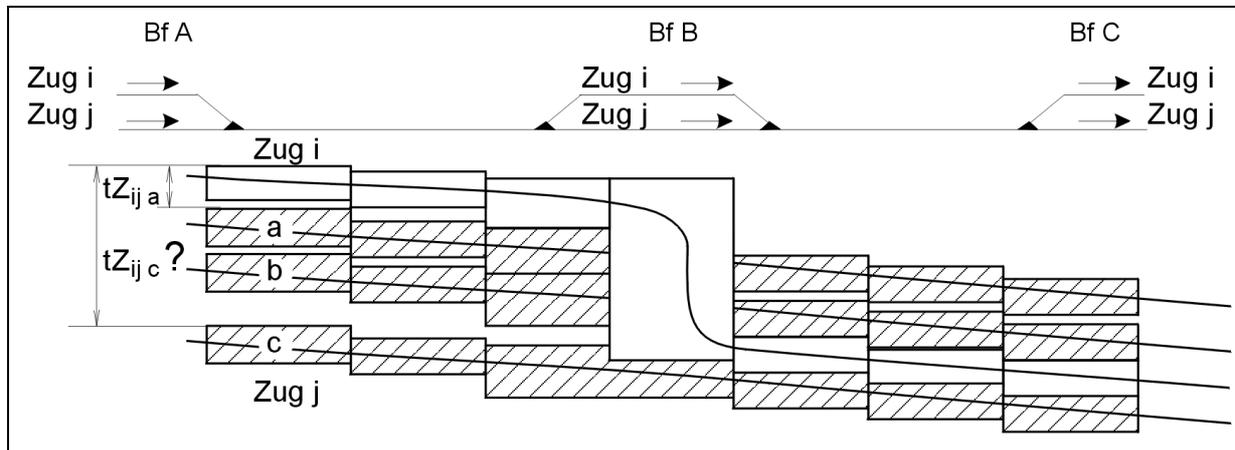


Abbildung 7-13: Überholung durch einen nachrangigen Zug als Ausnahmefall

Unabhängig davon, ob sich die Züge vor dem Bahnhof B oder danach behindern würden (wie übrigens im gleichrangigen Zugfolgefall), findet der Wartevorgang des Zuges j auf jeden Fall im Bahnhof A statt. So scheint das SLS-Verfahren, bei dem für gleichrangige Züge keine Überholungen vorgesehen werden und der schnelle nachrangige Zug als gleichrangig behandelt wird, einwandfrei zu funktionieren. Die Zeitlücke, in die die Zugtrasse b passt, führt aber zu einer verfälschten Interpretation einer der Grundlagen der analytischen Modellierung. Für die wahrscheinlichkeitstheoretische Formel von SCHWANHÄÜBER (Abschnitt 4.1) bedeutet dies, dass die Integrationsgrenzen eventuell unterbrochen werden, und eine geschlossene Lösung der Integrale (4-7) - (4-10) ein falsches Ergebnis liefert. Aus Sicht der Bedienungstheorie sind in Wirklichkeit für den dargestellten Zugfolgefall zwei Bedienungsarten möglich: eine, die durch die maximale Wartezeit $t_{Z_{ija}}$ begrenzt wird, und eine zweite, die unter Umständen bis zur Mindestzugfolgezeit $t_{Z_{ijc}}$ reicht. Eine solche Konstellation ist in keiner der bekannten eisenbahnbetriebswissenschaftlichen bedienungstheoretischen Modelle vorgesehen und würde ggf. zu falschen Aussagen über die Kapazität von Bahnanlagen führen.

Eine theoretische Lösung dieses Problems wäre mit viel Aufwand verbunden und vermutlich kaum möglich. Man müsste dafür zumindest einige neue Kenngrößen einführen, welche die gegenseitigen Abhängigkeiten zwischen den Sperrzeitentrepfen ungleichrangiger Züge explizit beschreiben würden. Durch diese neuen Kenngrößen wären bisher ohnehin komplexe Lösungen erschwert oder gar unmöglich.

Eine solche Studie würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Aus diesem Grunde wird hier ein pragmatischer Weg gewählt, der in der Praxis um eine optimale Fehlerbegrenzung sorgt. Hierbei wird ein Bahnhof immer dann für gleichrangige Zugfolgefälle als Überholungsbahnhof akzeptiert, wenn er mindestens für einen der Züge dazu geeignet ist. Schließlich würde man auch bei der Fahrplankonstruktion keine Wartezeit von der Größe $t_{Z_{ij}}$ (siehe Abbildung 7-11) einplanen, falls der Reihenfolgewechsel für den Zug i einen deutlich geringeren Zeitverlust bedeuten würde. Anders sieht es beim nachrangigen Fall aus: Hier wäre eine Wartezeit für den vorrangigen Zug i auf keinen Fall zulässig. Erfreulicherweise kommen solche Zugfolgefälle äußerst selten vor, weil die nachrangigen Reisezüge in der Regel überall dort halten, wo auch die schnelleren höherangigen Züge halten. Für langsame Güterzüge sind fast immer Überholungsmöglichkeiten innerhalb oder in der Nähe von Personenbahnhöfen zu finden. Und schnelle Güterzüge werden zumindest im Betriebsablauf auch außerplanmäßig angehalten, wenn es sonst zu Behinderungen schnellen Reisezüge käme. In Hinsicht auf die genannten Argumente werden die Überholungsabschnitte in ANKE im Gegensatz zu SLS allgemein durch alle Überholungsbahnhöfe begrenzt und nicht nur durch die Überholungsbahnhöfe der niederrangigen Züge.

Ein weiteres Problem bei der Unterteilung der Laufwege in Überholungsabschnitte tritt im Programm ALFA in dem Hauptuntersuchungsbereich, dem Kontenpunktbahnhof, auf. Wie bereits erwähnt, gilt der Knotenpunktbahnhof immer als Überholungsbahnhof für alle Modellzüge, welche die im Abschnitt 7.4 genannten Kriterien erfüllen, und zwar unabhängig davon, ob in den Zugdaten Überholungsmöglichkeiten auf Parallelgleisen explizit vermerkt sind. Wenn dies nämlich nicht der Fall ist, fängt der nächste Überholungsabschnitt direkt hinter der Haltebelegung an, wo entsprechend auch die Mindestzugfolgezeit $t_{Z_{ij}}$ -ALFA gemessen wird (siehe Abbildung 7-14). Wenn die dargestellten Züge tatsächlich auf dem Gleis 1 hintereinander gefahren wären, hätte der Mindestzeitabstand zwischen ihnen wegen der Haltebelegungen viel größer sein müssen. Im Fahrplan oder in einer Betriebssituation wäre jedoch einer der Züge bestimmt auf ein anderes Gleis (hier z.B. auf Gleis 2) umgeleitet worden. Da analytische Modelle allen Bahnhöfen zudem eine unbegrenzte Kapazität unterstellen, muss eine solche Umleitung bei der Implementierung der Modelle ermöglicht werden. Im Beispiel Abbildung 7-14 bedeutet dies, dass einer der Züge das Gleis 2 belegen würde, und die Mindestzugfolgezeit erst im nächsten Blockabschnitt gemessen werden müsste.

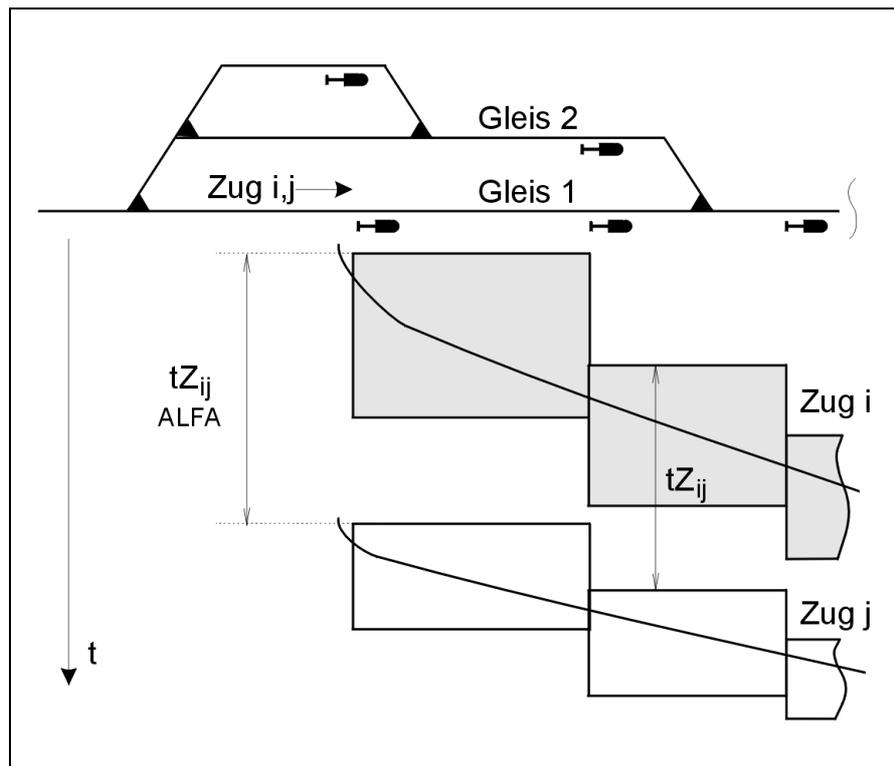


Abbildung 7-14: ALFA-Knotenpunktbahnhof als Überholungsbahnhof

Dieser Effekt trifft in ALFA auf alle gleichrangige Zugfolgenfälle zu, auch wenn Parallelhalte im Knoten vereinbart sind. Besonders für Züge gleicher Zugfolgenfälle ($i \rightarrow i$), die im Knotenpunktbahnhof halten, wird dadurch nicht nur das Überholen, sondern unter Umständen auch das Einfahren in verschiedene Gleise untersagt. Zwar ist es relativ selten, dass zwischen dem Ausfahrtsignal und dem Vereinigungspunkt zweier zu benutzender Fahrstraßen weitere Blockabschnitte liegen, aber die aus dem vorgestellten Fall gewonnene Erkenntnis lässt sich eindeutig formulieren: Ein Überholungsabschnitt beginnt bzw. endet immer an einer Weichenbelegung, d.h. in dem Blockabschnitt, in dem der Vereinigungs- bzw. Trennungspunkt zweier für die Überholung nutzbarer Fahrstraßen liegt. Ausnahmen bilden die Stellen, an denen die Züge in den Untersuchungsbereich einbrechen oder ihn verlassen.

Die nächste im Zusammenhang mit dem SLS-Konzept zu stellende Frage lautet: Darf die Mindestzugfolgezeit im Zugfolgenfall „schnell – langsam“ hinter einem Überholungsbahnhof gemessen werden, in dem der schnelle vorrangige Zug Durchfahrt hat, und welche Konsequenzen hat dies für die sogenannten maßgebenden Mindestzugfolgezeiten des gesamten Streckenabschnittes? Eine solche Situation ist in Abbildung 7-15 dargestellt: Der Zug j ist hier vorrangig, er hält nicht im Überholungsbahnhof B und kann deshalb frühestens die Betriebsstelle A als Warteraum nutzen. Aus diesem Grund sollte sich der Überholungsabschnitt für den Zugfolgenfall $j \rightarrow i$ angeblich über den gesamten Streckenabschnitt erstrecken und

die entsprechende Mindestzugfolgezeit einmal an dessen Anfang gemessen werden. Dies würde bedeuten: $tZ_{ji\ AB} = tZ_{ji\ AC}$.

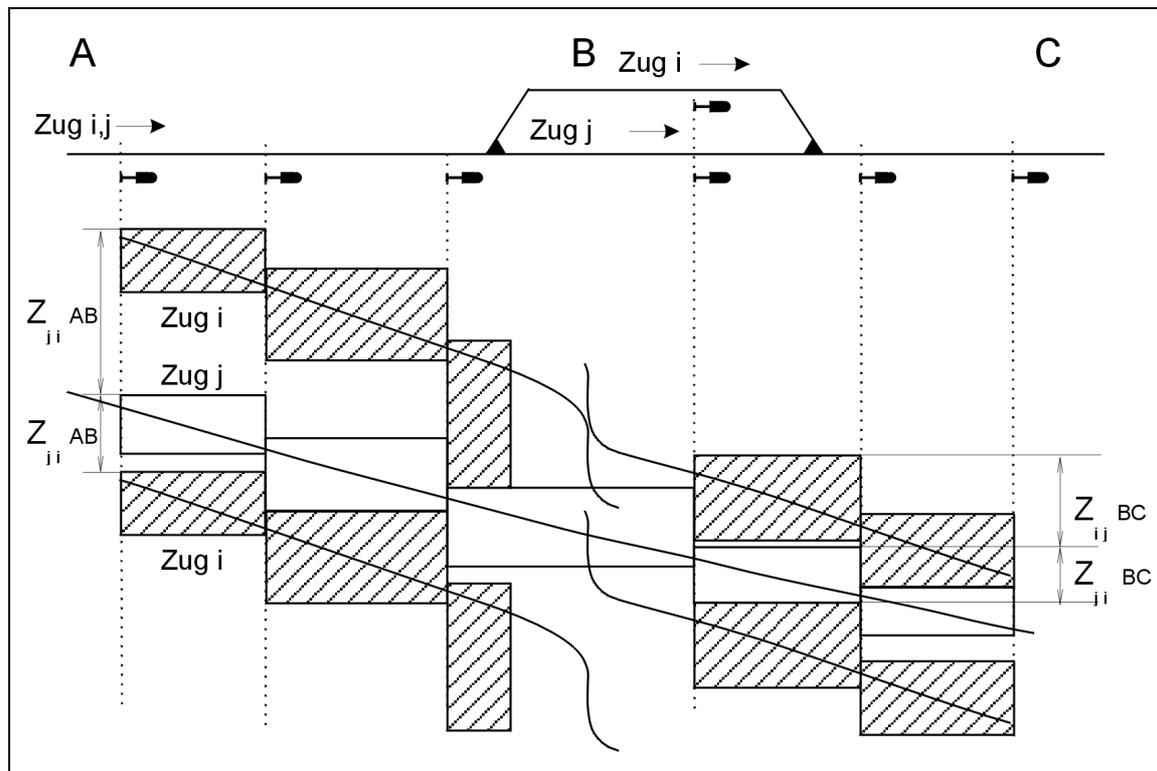


Abbildung 7-15: „Aus dem Lauf“ gemessene Mindestzugfolgezeiten

Wenn man jedoch bedenkt, dass der vorrangige Zug j keine Wartezeiten im geschilderten Zugfolgefall erleidet und deshalb auch keine Wartezeit in der Betriebsstelle B benötigt, wird die Bedeutung der „aus dem Lauf“ gemessenen Mindestzugfolgezeit $tZ_{ji\ BC}$ ersichtlich. Diese Zeit ist nämlich ein Anteil der maximalen Wartezeit, die für den nachrangigen Zug i im Bahnhof B im ungünstigsten Fall gemäß Ungleichung (7-2) abzuwarten ist.

Die direkte Schlussfolgerung daraus ist die Fehlbarkeit der maßgebenden Mindestzugfolgezeiten. Die Dienstschrift der DB AG [12] enthält die Vorschrift, „die größte der Mindestzugfolgezeiten aus einem Streckenabschnitt als maßgebende Mindestzugfolgezeit“ zu verwenden, um den gesamten Streckenabschnitt näherungsweise als ein Bedienungssystem zu betrachten. Diese Behauptung mag für gleichrangige Zugfolgefälle stimmen, aber bei Nachrang müssen die Summen $tZ_{ij} + tZ_{ji}$ aus allen Überholungsabschnitten verglichen und die größte von ihnen muss als maßgebende angenommen werden. Die SLS-Programme verwenden in den aktuellsten Versionen solche durch die Summierung ermittelte maßgebende Mindestzugfolgezeiten.

7.4.2 Berücksichtigung alternativer Fahr- und Haltemöglichkeiten

Eine automatische Erkennung von alternativen Fahrwegen zur Abgrenzung der Überholungsabschnitte ist für analytische EDV-Anwendungen der Eisenbahnbetriebswissenschaft neu. Sie ist für umfangreiche Untersuchungsbereiche mit schwer überschaubaren Betriebsprogrammen unumgänglich und wird durch die flexible Struktur der RUT-0-Betriebsstellenfahrwege und durch die im letzten Abschnitt vorgenommenen Feststellungen ermöglicht.

Im Detail lassen sich folgende Kriterien für Überholungsmöglichkeiten ausdrücken:

1. Für eine Überholung ist ein geeignetes Parallelgleis als alternative Fahrmöglichkeit erforderlich. Das Parallelgleis muss über eine Halteposition verfügen, es sei denn, es ist für Durchfahrten zugelassen und der überholte Zug hält auf dem ursprünglich vorgesehenen Gleis. Sogenannte „fliegende“ Überholungen ohne Halt werden nicht berücksichtigt.

Ein Überholungsbahnhof wird in der Regel durch eine Betriebsstelle dargestellt. Große Knotenpunktbahnhöfe können dennoch aus mehreren aufeinanderfolgenden Betriebsstellen bestehen. Erfahrungsgemäß wird sich die Suche nach alternativen Fahrmöglichkeiten in Bahnhöfen über maximal drei Betriebsstellen erstrecken (eine größere Anzahl würde die Komplexität des Suchalgorithmus deutlich erhöhen, zudem bestünde die Gefahr, Züge über parallele Strecken anstelle von parallelen Gleisen zu leiten).

2. In dem Überholungsbahnhof muss mindestens eine alternative Fahrmöglichkeit vorhanden sein. Falls der Bahnhof aus einer einzigen Betriebsstelle besteht, wird ein Fahrweg in dieser Betriebsstelle gesucht, der auf einem anderen Gleis verläuft und gleiche Anfang- und Endpunkte mit dem vordefinierten Fahrweg hat. Falls in einer Betriebsstelle kein alternativer Fahrweg gefunden ist, wird die Gesamtheit der aufeinanderfolgenden Fahrwege inklusive beider Nachbar-Betriebsstellen untersucht.
3. Für Reisezüge muss es im Überholungsbahnhof einen vom Besteller gewünschten und geeigneten Verkehrshalt geben, um eine eventuelle Gefährdung der Reisenden zu vermeiden. Bei Güterzügen werden darüber hinaus auch alle Halteplätze für Bedarfshalte akzeptiert, wenn die Längen der Gleise für den Zug ausreichend sind.
4. Wenn der überholende Zug einen planmäßigen Halt in der Betriebsstelle hat, müssen zwei Halteplätze (für den überholenden und den überholten Zug) existieren, die jeweils den Anforderungen der Zugklassen genügen. Daraus folgt, dass eine Überholungsmöglichkeit durch beide Züge des Zugfalles bestimmt wird.

Es ist mit anderen Worten unmöglich, einen Bahnhof für einen bestimmten Zug pauschal als Überholungsbahnhof zu bezeichnen, ohne Kenntnis darüber zu haben,

welche Züge dort den betrachteten überholen können. Eine Überprüfung aller Zugfolgefälle in allen Betriebsstellen zur Bestimmung der Überholungsmöglichkeiten hätte jedoch einen immensen Zeitaufwand verursacht, der sogar den Zeitbedarf der Simulationsverfahren weit überschreiten könnte, obwohl Simulation nur konkrete und nicht alle möglichen Betriebssituationen analysiert. Aus diesem Grund wurde auch hier eine pragmatische und effektive Vorgehensweise gewählt: Es wird davon ausgegangen, dass ein beliebiger zu überholender Zug in einem Bahnhof nur von drei Arten von Zügen überholt werden kann:

- von einem durchfahrenden Zug
- von einem im Bahnhof planmäßig haltenden Reisezug
- oder von einem im Bahnhof planmäßig haltenden Güterzug

Dementsprechend werden die alternativen Fahrwege nach Halte- und Durchfahrtmöglichkeiten für alle drei Fälle untersucht und nur die geeigneten als Überholungsmöglichkeiten angenommen.

		Überholender Zug		
		Zug ohne Halt	RZ mit Halt	GZ mit Halt
Überholter Zug	RZ mit planmäßigem Halt im Bahnhof	AltFW ist für Durchfahrt geeignet oder AktFW ist für Durchfahrt geeignet und AltFW verfügt über HP für <u>RZ</u> (überholter Zug nutzt den AltFW)	AltFW verfügt über HP für RZ, AktFW verfügt <u>bereits</u> über HP für <u>RZ</u>	AltFW verfügt über HP für GZ, AktFW verfügt <u>bereits</u> über HP für <u>RZ</u>
	GZ mit Halt	AltFW ist für Durchfahrt geeignet oder AktFW ist für Durchfahrt geeignet und AltFW verfügt über HP für <u>GZ</u> (überholter Zug nutzt den AltFW)	AltFW verfügt über Fahrweg mit HP für RZ, AktFW verfügt <u>bereits</u> über HP für <u>GZ</u>	AltFW verfügt über HP für GZ, AktFW verfügt <u>bereits</u> über HP für <u>GZ</u>
	GZ ohne Halt	Einer der Fahrwege verfügt über HP für GZ, der andere ist für Durchfahrt geeignet (überholter GZ wird angehalten)	Einer der Fahrwege verfügt über HP für GZ, der andere über HP für RZ	Beide Fahrwege verfügen über HP für GZ
Abkürzungen bedeuten: RZ – Reisezug, GZ – Güterzug, HP – Halteposition, AktFW – aktueller Fahrweg, AltFW – alternativer Fahrweg				

Tabelle 7-1: Anforderungen an die Fahrwege für die Überholungen

Hauptkriterien für die Annahme der Überholungsmöglichkeiten sind in Tabelle 7-1 zusammengefasst. Alle für einen Zug in Frage kommenden alternativen Fahrwege werden dort nach ihrer Hierarchie geordnet und für drei mögliche Überholungsfälle

nacheinander überprüft, bis passende Fahrwege gefunden werden oder bis die Menge der alternativen Fahrwege ausgeschöpft ist. Im letztgenannten Fall wird der betrachtete Bahnhof nicht als Überholungsbahnhof zugelassen. Die Überprüfung, ob die Haltepositionen für bestimmte Zugklassen geeignet sind und ob die Halteplatzlänge für den überholten Zug ausreicht, erfolgt ebenfalls bei der Analyse der Fahrwege. Es kann durchaus möglich sein, dass sich ein Bahnhof nur für Durchfahrüberholungen eignet, oder dass dort keine Güterzüge anhalten dürfen. Alle diese Nuancen werden im für ANKE ausgearbeiteten Algorithmus berücksichtigt, wodurch die resultierenden Überholungsabschnitte durchaus realistisch erscheinen.

Die letzte Anforderung an die Festlegung von Überholungsabschnitten lautet:

5. Auf den beiden alternativen Fahrwegen sind eine „Trennungs-“ und eine „Vereinigungsweiche“ zu finden. Diese Weichenelemente bestimmen das Ende des vorherigen bzw. den Anfang des nächsten Überholungsabschnittes. Dabei sind einige Sonderfälle zu beachten: Z.B. wird nur die Vereinigungsweiche als Anfang des ersten Überholungsabschnittes benötigt, wenn der Zuglaufweg in einem Bahnhof anfängt.

Dank der Dimensionierung der Überholungsabschnitte „von Weiche bis Weiche“ konnte fernerhin auf die aufwendige Erstellung von zusätzlichen Sperrzeitentreppe für außerplanmäßig haltende Güterzüge verzichtet werden, da die Weichenbelegungen an den Grenzen des Überholungsabschnittes durch den Zusatzhalt nicht wesentlich vergrößert werden. Die Betrachtung der Mindestzugfolgezeit als maximaler Wartezeit stellt im übrigen die zusätzliche Sperrzeitentreppe in Frage, da die Wartezeit nur durch die planmäßige Trasse bestimmt wird (vgl. Abbildung 5-19). Auch die in SLS üblichen Zuschläge zu den Mindestzugfolgezeiten bei Güterzügen in „falsch“ liegenden Überholungsgleisen werden nicht mitberücksichtigt. Die Wahl eines pauschalen Zuschlages ist ohnehin fraglich: Es besteht ebenfalls Bedarf an einer Wahrscheinlichkeitsrechnung, um die Ausschlusswahrscheinlichkeit mit entgegenkommenden Zügen zu ermitteln.

Möglichkeiten für manuelle Eingriffe in die Struktur der Überholungsabschnitte bleiben trotz des vollautomatischen Abgrenzungsalgorithmus bestehen. So kann die Topologie und die Charakteristika der Fahrwege nachträglich korrigiert werden, ohne die zugrundeliegende Infrastruktur zu ändern. Für bestimmte Fahrwege können beispielsweise Halteplätze gestrichen oder verkürzt werden, um eine Überholung dort nicht zuzulassen. Ferner lassen sich auch die Fahrweghierarchien, Anschlusspunkte und weitere Eigenschaften ändern, so dass eine Flexibilität wie bei den SLS-Haltearten erreicht werden kann. Beim ALFA-ANKE-Vergleich (Anlage B) sind u.a. auch solche Manipulationen vorgenommen worden, um die Rahmenbedingungen für beide Programme auszugleichen.

7.5 Anwendungsspezifische Mindestzugfolgezeiten

Mindestzugfolgezeiten bilden bekanntlich eine Grundlage für die Berechnung von Leistungs- und Qualitätskenngrößen in Teilfahrstraßenknoten. Deswegen sind für die TFK diejenigen Mindestzugfolgezeiten relevant, welche aus den Überholungsabschnitten ermittelt werden, zu denen die TFK gehören. Ein Teilfahrstraßenknoten kann sich im übrigen nicht in zwei Überholungsabschnitten gleichzeitig befinden, weil er grundsätzlich keine Warteposition enthält.

Die implementierte Ermittlung von TFK-eigenen Mindestzugfolgezeiten verläuft in vier Phasen:

1. Die Laufwege aller Modellzüge werden nach den im letzten Abschnitt formulierten Regeln in Überholungsabschnitte unterteilt. Die Abschnitte für die drei Überholungsarten werden für jeden Zug vermerkt.
2. Alle Modellzüge werden paarweise analysiert. Falls ein Bahnhof zur Überholung des ersten Zuges des Paares geeignet ist, wird überprüft, ob der zweite Zug ihn dort tatsächlich überholen kann. Gegebenenfalls wird der betroffene Bahnhof für die Überholung zugelassen. Gleichzeitig werden die Grenzen der gefundenen Überholungsabschnitte bei den Teilfahrstraßenkonten referenziert.

Abbildung 7-16 demonstriert die Funktionsweise dieses Algorithmus an einem Beispiel. Für den hier betrachteten Modellzug wird zuerst der Bahnhof A am Anfang des Laufweges als potentielle Überholungsmöglichkeit betrachtet.

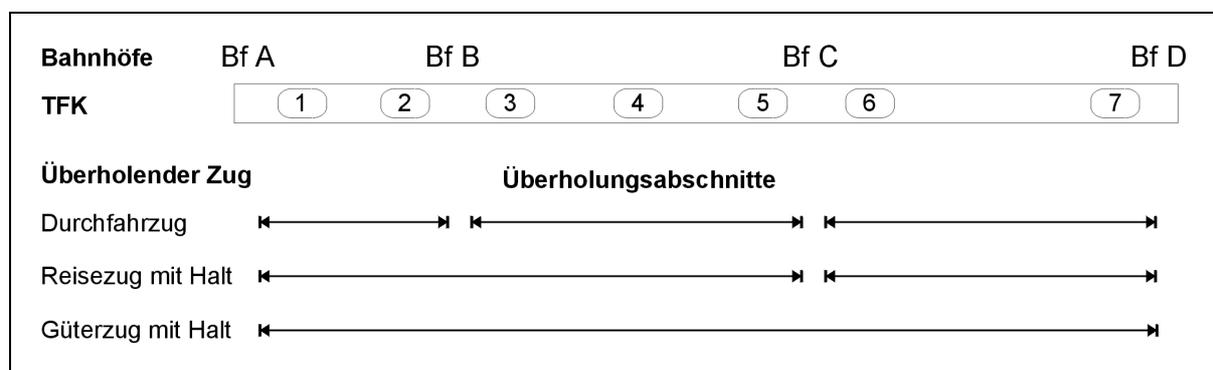


Abbildung 7-16: Überholungsabschnitte eines Modellzuges bezogen auf TFK

Im Bahnhof A beginnt die Sperrzeitentreppe und somit der erste Überholungsabschnitt. Die nächste Warteposition, wo der erste Zug überholt werden kann, befindet sich im Bahnhof B. Der Überholvorgang kann dort aber nur dann stattfinden, wenn der zweite Zug des Paares in diesem Bahnhof nicht planmäßig hält. Deswegen endet der erste Überholungsabschnitt entweder im Bahnhof B oder erstreckt sich bis zum nächsten akzeptierten Überholungsbahnhof. Alle TFK, die (im aktuellen Überholungsabschnitt) im Laufweg des ersten Modellzuges liegen, werden vermerkt. Sobald der nächste Überholungsbahnhof gefunden ist, werden die beiden Grenzen

des nunmehr vollständigen Überholungsabschnittes für den betrachteten Zugfolgefall den bei den vermerkten TFK eingetragen. Wenn z.B. der zweite Zug den ganzen in Abbildung 7-16 dargestellten Infrastrukturbereich ohne Halt durchfährt, wird für den TFK 1 und den TFK 2 der Überholungsabschnitt „Bf A bis Bf B“ vermerkt, für die TFK 3-5 „Bf B bis Bf C“, und für die TFK 6 und 7 „Bf C bis Bf D“. Wenn der zweite Modellzug ein Reisezug ist, der überall planmäßig hält, entfällt der Überholungsbahnhof B und der Überholungsabschnitt für die TFK 1 bis 5 dehnt sich vom Bf A bis zum Bf C aus. Die genauen Abschnittsgrenzen werden an den dem Zugfolgefall entsprechenden Trennungs- und Vereinigungsweichen gesetzt.

3. Da die Überholungsabschnitte durch alle Überholungsbahnhöfe begrenzt werden, müssen alle Zugfolgefälle „j nach i“ und „i nach j“ in allen TFK erneut überprüft werden, um die Überholungsabschnittsgrenzen einheitlich und ggf. enger zu setzen.

Falls im TFK 4 des vorgestellten Beispiels für den Zugfolgefall „i → j“ der Überholungsabschnitt „Bf A – Bf C“, aber für „j → i“ „Bf B – Bf D“ ermittelt wurde, gilt in diesem TFK für beide Zugfolgefälle der Überholungsabschnitt „Bf B – Bf C“.

4. Schließlich findet die Ermittlung der Mindestzugfolgezeiten zwischen den in den TFK eingesetzten Grenzen der jeweiligen Überholungsabschnitte für alle Zugfolgefälle statt.

Die Kreuzungsabschnitte (für Züge, die in verschiedene Richtungen verkehren) werden analog zu den Überholungsabschnitten gebildet. Dies bedeutet, dass keine „fliegenden“ Kreuzungen beachtet werden und mindestens einer der sich kreuzenden Züge ähnlich einer Überholung angehalten werden muss. Im übrigen werden die Kreuzungsabschnitte ebenfalls durch die Trennungs- und Vereinigungsweichen entsprechender Fahrwege begrenzt.

Das Ergebnis der Mindestzugfolgezeitenrechnung sind die für die TFK charakteristischen $m \times m$ - Matrizen der Mindestzugfolgezeiten (7-7), die als Eingangsgrößen für die im Kapitel 4 beschriebenen Modelle dienen.

$$tZ_{\text{TFK}} = \begin{pmatrix} tZ_{11} & tZ_{12} & \cdots & tZ_{1m} \\ tZ_{21} & tZ_{22} & \cdots & tZ_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ tZ_{m1} & tZ_{m2} & \cdots & tZ_{mm} \end{pmatrix} \quad (7-7)$$

7.6 Weitere Eigenschaften der Mindestzugfolgezeiten

Einige Aspekte, die bereits in vorherigen Kapiteln im Zusammenhang mit Mindestzugfolgezeiten angesprochen wurden, können nun in Hinsicht auf das neue Modell der Überholungsabschnitte analysiert werden.

7.6.1 Maßgebende Mindestzugfolgezeiten

Einer der fraglichen Punkte bei der Ermittlung von Mindestzugfolgezeiten sind maßgebende Mindestzugfolgezeiten für das Streckenabschnittmodell. Wenn man einen gesamten Streckenabschnitt als ein Bedienungssystem betrachtet, bedeutet die maßgebende Mindestzugfolgezeit eine bei Gleichrang maximal mögliche Wartezeit des ersten Zuges am Anfang des Abschnittes. Natürlich ist fraglich, ob der betroffene Zug auch in der Tat nur am Anfang des Streckenabschnittes warten wird. Andererseits kann man nicht davon ausgehen, dass jede Überholungsmöglichkeit genutzt wird, denn die Kapazität der in der Regel kleinen Überholungsbahnhöfe auf der Strecke ist nicht zu überschätzen. Da in der Spurplan-Infrastruktur Streckenabschnitte nicht eindeutig identifizierbar sind, können die maßgebenden Mindestzugfolgezeiten nur optional für den gesamten gemeinsamen Laufweg beider Züge des Zugfolgefalles ermittelt werden. Wenn in einem erkennbar großen Bahnhof angehalten wird, sollen die Modellfahrten an dieser Stelle in jeweils zwei unabhängige Fahrten unterteilt werden.

In Anlage C aufgeführte Vergleichsberechnungen zeigen, dass die optionale Berechnung der maßgebenden Mindestzugfolgezeiten in manchen Situationen durchaus sinnvoll sein kann.

7.6.2 Bezugspunkte der Mindestzugfolgezeiten

Eine weitere, bereits im Kapitel 5 weitgehend beantwortete Frage bezieht sich auf die Dimensionierung des Bedienungssystems TFK. Wenn die Mindestzugfolgezeiten für einen Teilfahrstraßenknoten an unterschiedlichen Stellen je nach Zugfolgefall gemessen werden, ist nicht eindeutig, welcher der Züge im Sinne der FIFO-Disziplin im TFK als erster eintrifft. Dementsprechend ist nicht klar, welche Züge Wartezeiten hinnehmen müssen. Abbildung 7-17 zeigt das sogenannte Drei-Zug-Paradoxon von WENDLER [66].

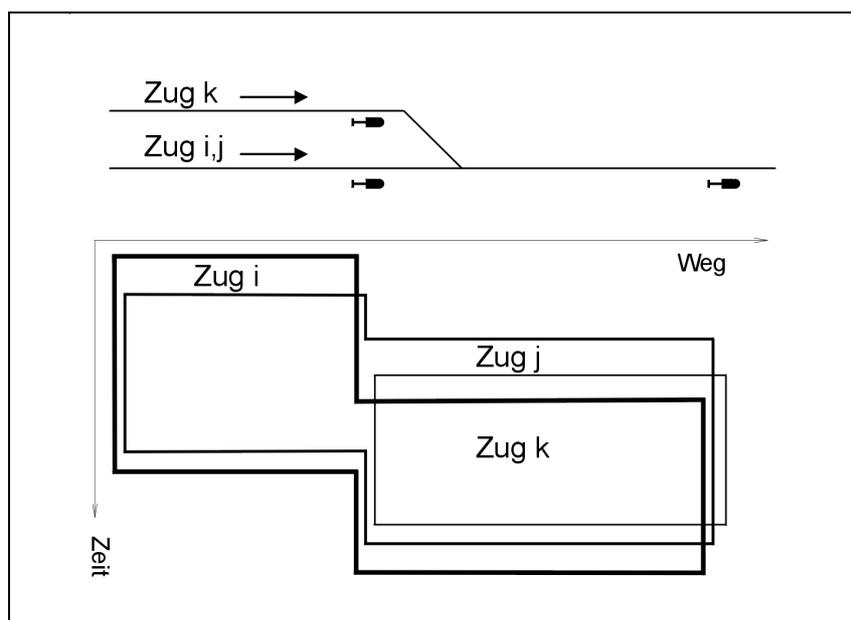


Abbildung 7-17: Drei-Zug-Paradoxon

Der Zug k fädelt unterwegs in den gemeinsamen Laufweg der Züge i und j ein. Durch die unterschiedlichen Bemessungspunkte der Mindestzugfolgezeiten sind aus der Abbildung drei verschiedene Zugfolgen festzustellen: „i→j→k“, „k→i→j“ und „j→k→i“. Alle sind, von ihren Ausgangspunkten betrachtet, korrekt. Wie soll hier die Mindestzugfolgezeit als Wartezeit interpretiert werden, wenn ungewiss ist, welche Züge warten müssen? Die pragmatische Näherungslösung dieses Problems ist der bereits erwähnte abstrakte Ankunftsprozess, bei dem der exakte topologische Bezugspunkt nicht definiert ist. Laut WENDLER ist diese Lösung durchaus akzeptabel, weil das Paradoxon nur bei einer gravierenden Fahrlinienspreizung der Züge i und j auftritt, was im Gleichrangfall normalerweise jedoch nicht zu beobachten ist. Das Problem betrifft nur gleichrangige Züge, deren Geschwindigkeiten und somit Sperrzeitentreppen erwartungsgemäß ähnlich sein müssen.

7.6.3 TFK außerhalb von Überholungsabschnitten

Wegen Berücksichtigung alternativer Fahrwege für Überholungen und darausfolgender Festlegung der Überholungsabschnitte zwischen den Trennungs- und Vereinigungsweichen der zu nutzenden Fahrwege kann in größeren Bahnhöfen ein Nebeneffekt auftreten: Einige Teilfahrstraßenknoten bleiben vorgeblich außerhalb der abgegrenzten Überholungsabschnitte, so dass nicht ersichtlich wird, welche Mindestzugfolgezeiten in solchen TFK gelten. Ein typischer Fall der „außerhalb“ von Überholungsabschnitten liegenden TFK ist in Abbildung 7-18 dargestellt.

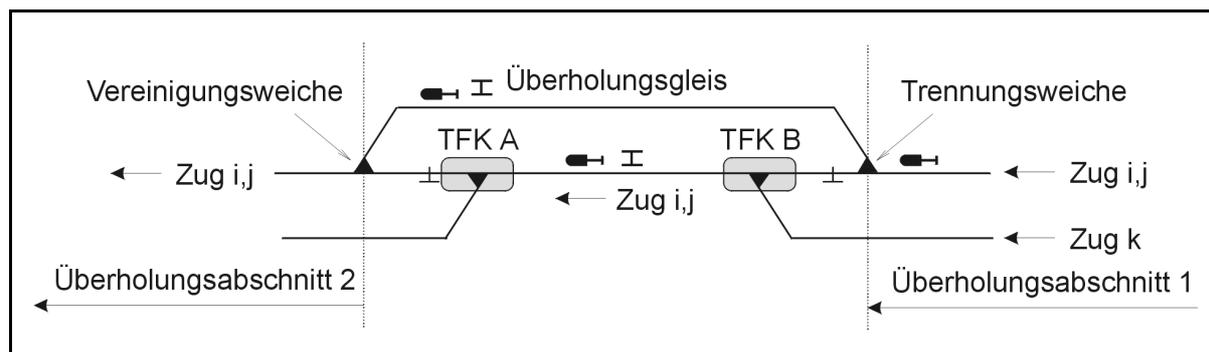


Abbildung 7-18: Teilfahrstraßenknoten „außerhalb“ der Überholungsabschnitte

Hier befahren beide Züge i und j des betrachteten Zugfolgefalles planmäßig dasselbe Gleis eines Überholungsbahnhofes. Um eine Überholung zu ermöglichen, wird ein alternativer Fahrweg genutzt, d.h. einer der Züge wird in das Überholungsgleis umgeleitet. Der Überholungsabschnitt 1 (vor dem Bahnhof) erstreckt sich deswegen bis zur markierten Trennungsweiche der beiden Fahrwege. Der nächste Überholungsabschnitt 2 (hinter dem Bahnhof) beginnt entsprechend an der Vereinigungsweiche. Zwei Teilfahrstraßenknoten (TFK A und TFK B) liegen zwischen den genannten Weichen. Die Frage lautet nun: wie wird die Mindestzugfolgezeit $t_{z_{ij}}$ in diesen TFK festgelegt?

Zuerst muss untersucht werden, ob der Zugfolgefall in den TFK tatsächlich auftritt. Wenn nämlich keine Überholung zugelassen wäre (z.B. wenn das Überholungsgleis nicht vorhanden wäre), gäbe es in diesem Bahnhof auch keine Trennung der Überholungsabschnitte und beide TFK lägen nicht außerhalb deren Grenzen. Hier ist jedoch eine Überholung möglich. Dies bedeutet, dass einer der Züge die betroffenen TFK eventuell nicht befahren würde (Zumal es ist nicht eindeutig, welcher von beiden Zügen ins Überholungsgleis ausweicht). Soll die Mindestzugfolgezeit dieses Zuges auch aus den Matrizen entfernt werden? Offenbar nicht, denn es kann durchaus vorkommen, dass der betroffene Bahnhof für andere Zugfolgefälle mit Beteiligung der Züge i und j für die Überholungen nicht geeignet ist, und so beide Züge in den Matrizen der Mindestzugfolgezeiten der TFK eingetragen sein müssen.

Im Beispiel (siehe Abbildung 7-18) schließt sich der Zug k mit den beiden Fahrten i und j im TFK B aus. In der Mindestzugfolgezeitenmatrix (7-8) des TFK sind alle drei Züge vorhanden, aber die Zeiten $t_{z_{ij}}$ und $t_{z_{ji}}$ fehlen anscheinend.

$$tZ_{\text{TFK B}} = \begin{pmatrix} tZ_{ii} & - & tZ_{ik} \\ - & tZ_{jj} & tZ_{jk} \\ tZ_{ki} & tZ_{kj} & tZ_{kk} \end{pmatrix} \quad (7-8)$$

Diesen Überlegungen zufolge wäre der TFK A kein Teilfahrstraßenknoten, weil sich dort nicht alle Fahrten gegenseitig ausschließen. Bedienungstheoretische Modelle sind für solche Strukturen auf jeden Fall nicht anwendbar. Eine Abhilfe für die

Lösung des Problems bietet wieder einmal die Interpretation der Mindestzugfolgezeit als einer Wartezeit, die bei Gleichrang für den zweiten Zug im Paar im ungünstigsten Fall entstehen kann. So gesehen kommt der zweite Zug j im TFK B maximal um die aus dem Überholungsabschnitt 1 entnommene Zeit $t_{Z_{ij1}}$ später an. Genauso kann sein Halt im Bahnhof, und somit auch die Ankunftszeit am TFK A bis auf $t_{Z_{ij2}}$ verzögert werden, da die Behinderung mit dem Zug i jetzt hinter der Halteposition im Überholungsabschnitt 2 liegen würde. Dadurch werden auch die Teilfahrstraßenknoten, die sich außerhalb der Überholungsabschnitte befinden, anhand der Lage der Warteposition zu bestimmten Überholungsabschnitten zugeteilt. Ihre Mindestzugfolgezeitenmatrizen sind vollständig, und die Ermittlung von Qualitäts- und Leistungskenngrößen ist möglich.

7.6.4 Dimensionierung des Untersuchungsbereiches

Korrekt ermittelte Mindestzugfolgezeiten sind eine der wichtigsten Voraussetzungen für exakte Aussagen über die Kapazität von Eisenbahnanlagen. Bei der Untersuchung von Netzstrukturen wird die Aufmerksamkeit vor allem auf die Verkehrsknoten (Knotenpunktbahnhöfe oder Abzweigstellen) gerichtet, weil Engpasserscheinungen hauptsächlich dort zu erwarten sind. Da die Zugfahrten oft über die Grenzen des Untersuchungsbereiches hinaus verlaufen, gilt es den Infrastrukturausschnitt so zu wählen, dass die zu untersuchenden Knoten möglichst weit entfernt von den Bereichsgrenzen liegen.

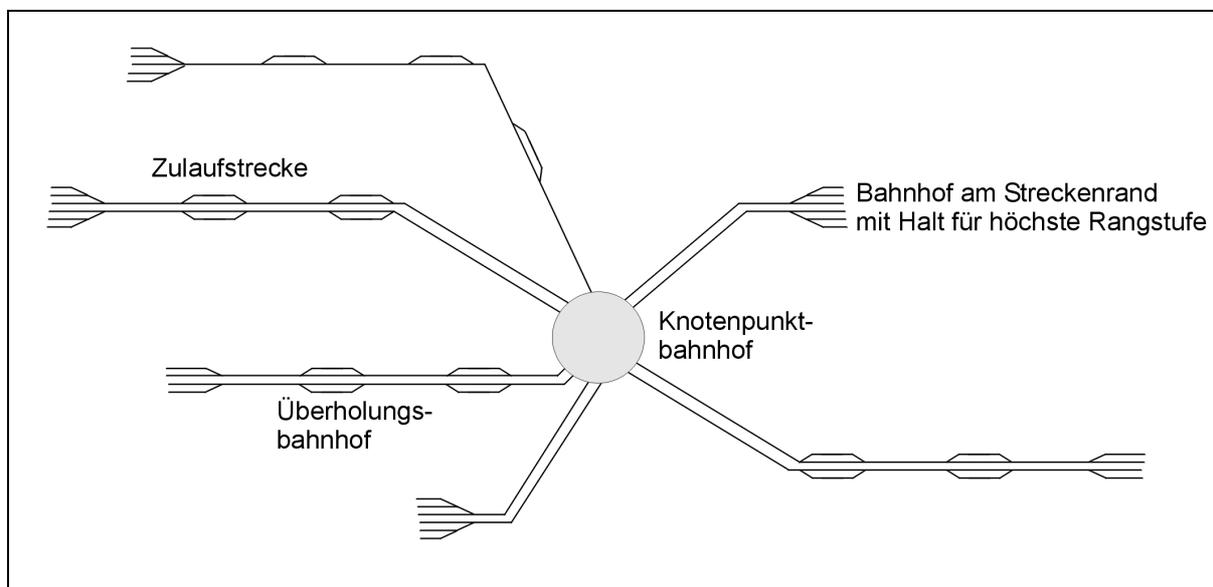


Abbildung 7-19: Schematische Darstellung eines typischen sternförmigen Untersuchungsbereiches

Faktisch sollen sich alle Zulaufstrecken des Knotens mindestens bis zum nächsten Überholungsbahnhof der höchsten Rangstufe erstrecken, damit der nächste Überholungsabschnitt für höchstrangige Züge vollständig erfasst werden kann. Die

Überholungsabschnitte für niedrigere Rangstufen sind auf jeden Fall nicht länger und deshalb in den gewählten Teilen der Zulaufstrecken vollständig enthalten. So kommt man auf sternförmige Infrastrukturausschnitte (Abbildung 7-19), die als Untersuchungsbereiche für die Analyse der in der Mitte liegenden Teile der Eisenbahnanlagen dienen.

Weitere Empfehlungen für die Anwendung von Kapazitätsberechnungen, sowie die wichtigsten Grundsätze für die Engpassauflösung werden in Kapitel 10 eingehend behandelt.

8 Gesamtfahrstraßenknoten

Obwohl die Teilfahrstraßenknoten den Anforderungen an einstellige Bedienungssysteme weitgehend entsprechen, werden sie bei der Modellierung gleichwohl als unabhängige Systemeinheiten betrachtet. In einigen Fällen dürfen jedoch die gegenseitigen Einflüsse zwischen den durch die Zugfahrten verketteten Teilfahrstraßenknoten nicht vernachlässigt werden. Im Abschnitt 6.1 wurde bereits ein Beispiel vorgestellt, in dem ein Engpass-TFK den Forderungenstrom für nachfolgende Bedienungssysteme beeinflusste. Dieser Fall mit nacheinanderfolgenden TFK stellt jedoch keinen besonders kritischen Punkt bei Wechselwirkungen dar, weil der am höchsten belastete TFK aus der Kette für die Leistungsfähigkeit des jeweiligen Überholungsabschnittes ausschlaggebend ist.

Viel komplexer sind die TFK-Abhängigkeiten wegen der gegenseitigen Fahrtenausschlüsse in großen Fahrstraßenknoten mit ausgeprägten Querfahrmöglichkeiten. In Abbildung 8-1 ist ein Ausschnitt aus dem Fahrtenplan eines komplexen Fahrstraßenknotens dargestellt. In dem grau markierten TFK verkehren die Fahrten 1, 2 und 3. Sie schließen sich in den anderen Bereichen des Fahrstraßenknotens mit den weiteren vier Fahrten aus.

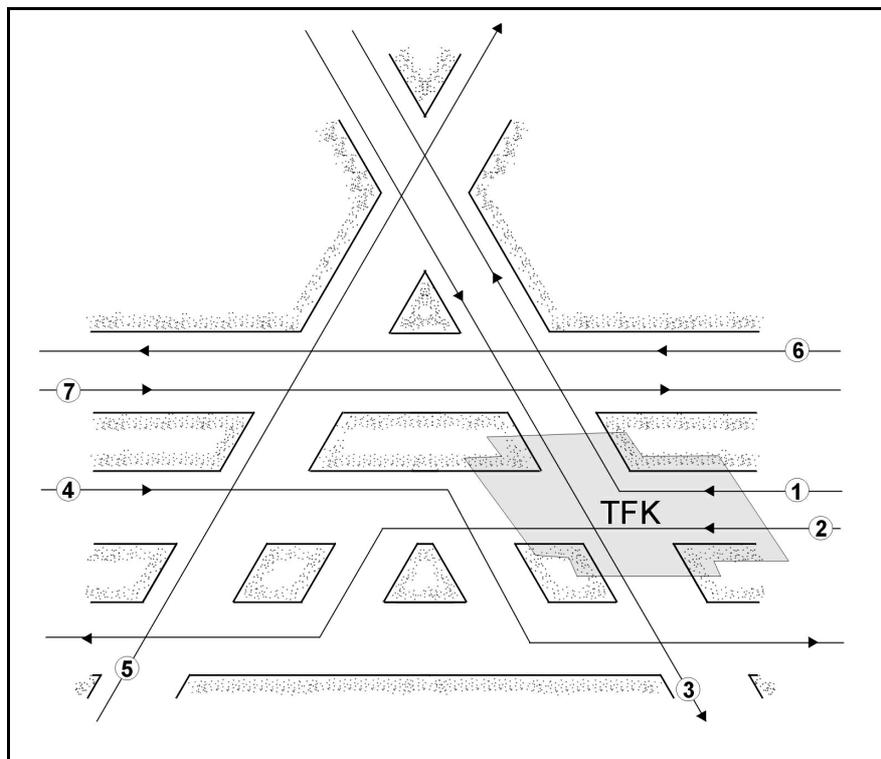


Abbildung 8-1: Komplexe Verkettungen im Fahrstraßenknoten

WAKOB [63] bezeichnet solche externen Ausschlüsse als indirekte Zusatzbelegungen. In ALFA werden dementsprechend zusätzliche Fahrten, die im TFK nicht verkehren, aber sich mit allen Fahrten des TFK ausschließen, in die Leistungsfähig-

keitsberechnung einbezogen. So wird im Beispiel (Abbildung 8-1) die Fahrt 5 in den TFK als Zusatzbelegung eingetragen. Einflüsse der Fahrten 4, 6 und 7 bleiben bei der Berechnung weiterhin unberücksichtigt.

Die Einführung der Zusatzbelegungen für die Einbeziehung von indirekten Ausschlüssen ist aus theoretischer Sicht bestimmt sinnvoll. In der Praxis bewirkt sie jedoch oft zu optimistische Aussagen über die Leistungsfähigkeit, weil die Zusatzbelegungen in der Regel Kreuzungen sind, durch die entsprechend kleine Mindestzugfolgezeiten entstehen. Im klassischen Zwei-Zug-Modell kann bei kleinen Mindestzugfolgezeiten folgender negativer Effekt auftreten: tZ_{12} sei die Mindestzugfolgezeit zwischen den Fahrten 1 und 2 des dargestellten Beispiels (denn so lange muss der zweite Zug im ungünstigsten Fall bei Gleichrang warten). Nimmt man die Zusatzbelegung des Zuges 5 mit den Mindestzugfolgezeiten tZ_{15} und tZ_{52} hinzu, entsteht für den ersten Zug maximal die Wartezeit tZ_{15} , welche auch für die Kapazitätsermittlung verwendet wird. Falls jedoch $tZ_{15} + tZ_{52} < tZ_{12}$ ist (bei Kreuzungsbelegungen ist dies oft der Fall), wird die angenommene Obergrenze für die Wartezeit zu niedrig eingeschätzt. Dieser Fehler trat auch beim Testvergleich der Programme ALFA und ANKE auf (siehe Anlage B).

Gegenseitige Wirkungen von Teilfahrstraßenknoten werden allenfalls schon bei deren Abgrenzung teilweise mitberücksichtigt, indem die Mengen der zu den TFK zugehörenden Weichen möglichst komplett zusammengestellt werden. So finden in den Trapezstrukturen-TFK (Abschnitt 5.1.3) eventuell Ausschlüsse statt, die erst in einem anderen TFK (kürzere Seite des Trapezes in Abbildung 5-8 Seite 88) auftreten.

Es ist ersichtlich, dass weder die Verwendung von indirekten Zusatzbelegungen noch die genauere Abgrenzung von TFK gleichzeitig alle sich teilweise ausschließenden Fahrten des Fahrstraßenknoten in Betracht ziehen können. Als einzig richtig erscheint in dieser Hinsicht die Untersuchung des kompletten Knotens als einer Einheit, also die Abgrenzung und die Analyse der im Abschnitt 3.1 erwähnten Gesamtfahrstraßenknoten (GFK).

Die Schwierigkeit bei der Modellierung von GFK besteht vor allem darin, dass nicht eindeutig erkennbar ist, wie viele Bedienungskanäle ein GFK als Bedienungssystem besitzt. Im Fahrstraßenknoten aus Abbildung 8-1 könnten z.B. ohne die Querfahrten 1, 3 und 5 bis zu drei Fahrten gleichzeitig stattfinden. Das Bedienungssystem besäße in diesem Fall drei Bedienungsstellen. Die Fahrt 1 verringert die Anzahl der möglichen Parallelfahrten auf zwei. Die beiden restlichen Querfahrten 3 und 5 schließen sich mit allen Fahrten des Fahrstraßenknotens aus und machen ihn dadurch zum einstelligen Bedienungssystem. So wirkt ein Fahrstraßenknoten je nach Zugfolgefall als ein- oder mehrstelliges Bedienungssystem. In Gesamtfahrstraßenknoten tritt infolgedessen das Problem der Erreichbarkeit der Bedienungskanäle auf:

Im Gegensatz zum klassischen mehrkanaligen Bedienungssystem, in dem alle Bedienungsstellen den Forderungen jede Zeit zur Verfügung stehen (wie etwa die Kassen in einem Supermarkt), kann in GFK eine Querfahrt mehrere Kanäle gleichzeitig sperren und für weitere Forderungen unerreichbar machen.

Eine universelle Lösung dieses Problems für alle denkbaren GFK kann aufgrund ihrer unterschiedlichen Struktur und Fahrstraßentopologie nicht gefunden werden. In [9] beschränkt man sich näherungsweise auf eine Interpretation der Gesamtfahrstraßenknoten als einstelliger Bedienungssysteme mit einer eingeschränkten Berücksichtigung der Mehrkanaligkeit durch die Verkettungszahl φ , den Kehrwert der mittleren Anzahl von zeitweilig wirksamen Bedienungsstellen. Diese relativ einfache Lösung ist zur Zeit der einzig bekannte und akzeptable Weg, die Auswirkungen der Verkettungen zwischen den Teilfahrstraßenknoten zu bewerten. Im Abschnitt 8.2 wird das Verfahren zur Berechnung planmäßiger Wartezeiten in Gesamtfahrstraßenknoten von SCHWANHÄUßER¹² [48], sowie dessen Erweiterung von WENDLER [66], im Detail vorgestellt.

Alternativ zur Betrachtung von GFK als einstelligen Bedienungssystemen könnte das Zusammenwirken von mehreren Teilfahrstraßenknoten auch nach einem anderen Prinzip ausgewertet werden. Möglicherweise wäre eine Ausarbeitung der exakten bedienungstheoretischen Lösungen für eine begrenzte Anzahl der von PACHL in [37] vorgeschlagenen Standard-Fahrstraßenknoten vorteilhaft, wobei der dafür erforderliche Aufwand jedoch sehr schwer abzuschätzen ist. Vielversprechender erscheint dagegen eine numerische Einschätzung der funktionellen Abhängigkeiten zwischen den Wartezeitfunktionen benachbarter TFK. Diese umfangreichen theoretischen Untersuchungen können jedoch nicht im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt werden, weshalb bei der Software-Implementierung die ausgetestete und bewährte Verkettungszahl-Standard-Methode eingesetzt wurde.

8.1 Problematik der Abgrenzung von GFK

Genauso wie bei Teilfahrstraßenknoten müssen die Infrastrukturbereiche für die Gesamtfahrstraßenknoten vor der Leistungsuntersuchung identifiziert werden. Allerdings sind dabei nur größere Ansammlungen von Gleisverknüpfungen wie Bahnhofsköpfe, Streckenabzweigstellen oder Zugbildungsanlagen der Rangierbahnhöfe als GFK von besonderem Interesse. Da solche Anlagen im Spurplan-Graphen formell schlecht erkennbar sind, können die Algorithmen zur Abgrenzung von GFK nur teilweise automatisiert werden.

¹² Die Formel von Schwanhäußer wurde für die Dienstschrift der DB AG DS 405 [9] übernommen.

Laut [9] wird ein Fahrstraßenknoten für Fahrten in den Knoten durch Signale oder Standorte begrenzt, vor denen Züge warten können, ohne Fahrten auf anderen Fahrwegen auszuschließen. Außerhalb des Knotens liegen die Grenzen bei den Anfängen freier Streckengleise. Ein GFK ist mit anderen Worten ein Bedienungssystem, das ähnlich wie ein TFK durch Wartepositionen unterbrochen wird oder offene Grenzen „nach außen“ besitzt, in dem aber auch Parallelfahrten zulässig sind.

Für die Vollständigkeit der Definition sollte ausgeschlossen werden, dass sich ein GFK in zwei oder mehrere unabhängige Bereiche zerlegen lässt, denn ansonsten existiert keine Abhängigkeit zwischen den einzelnen TFK aus diesen Bereichen.

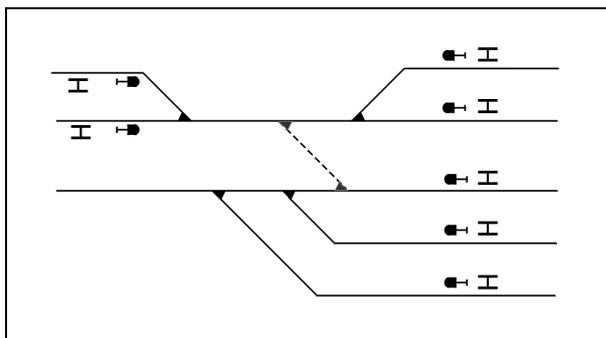


Abbildung 8-2: Fahrstraßenknoten mit eventuell unabhängigen Bereichen

Beispiel: Falls im Knoten in Abbildung 8-2 keine Querverbindung zwischen den Gleisen existieren würde, wäre er in zwei unabhängige Bereiche unterteilt und könnte deswegen nicht als eine Gesamtheit betrachtet werden. Im übrigen müssen Fahrten über diese Gleisverbindung vorhanden sein, um die beiden Teile des Knotens tatsächlich miteinander zu verbinden.

Die Struktur von GFK ist deswegen schon per Definition **fahrtenabhängig**, und die Algorithmen der infrastrukturbezogenen Abgrenzung, die bereits für TFK verwendet worden sind, können nicht eingesetzt oder müssen erweitert werden.

Die fahrstraßenbezogene Definition eines GFK lautet analog zu der Formel (5-1) (Abschnitt 5.1.2):

$$\forall f_x, f_y \in F, \exists f_k \wedge \dots \wedge f_n, \text{ so dass } f_x \wedge f_k \wedge \dots \wedge f_n \wedge f_y \quad (8-1)$$

wobei $f_k \wedge \dots \wedge f_n$ eine Kette sich paarweise ausschließender Fahrstraßen ist, die bis zu $m-2$ Fahrstraßen enthalten kann (m ist hier die Anzahl der Fahrstraßen in der Gesamtmenge F).

Da die Trennung von Fahrstraßen durch Haltepositionen und ihre Anknüpfungen an die Fahrstraßen weiterer Betriebsstellen auch hier für die Praxis nicht geeignet erscheint, wird die Abgrenzung von Gesamtfahrstraßenknoten wiederum auf der Ebene der **möglichen** Fahrstraßen, also anhand der Gleisverbindungen und Haltepunkte durchgeführt werden. Zudem betrifft das im Abschnitt 5.1.2 angesprochene Problem der Datenstabilität, wo durch jede Änderung von Fahrwegen eine neue Abgrenzung von TFK hervorgerufen würde, auch GFK.

8.1.1 Infrastrukturbezogene GFK-Abgrenzung

Eine interaktive Festlegung der Gesamtfahrstraßenknoten auf Basis des Spurplan-Graphen verläuft in zwei Phasen:

1. Eigentliche Abgrenzung, d.h. eine vorläufige Zuteilung von Weichenelementen nur aus den Bereichen mit zahlreichen Gleisverknüpfungen zu den GFK
2. Überprüfung anhand der vorgegebenen Modellfahrten, ob sich die ermittelten GFK jeweils in zwei oder mehrere voneinander getrennte Bereiche zerlegen lassen

Bei der eigentlichen Abgrenzung (Phase 1) werden drei Techniken verwendet, die in unterschiedlicher Weise einerseits die fachliche Kompetenz des Bearbeiters erfordern und sich andererseits auf die Genauigkeit der Infrastrukturabbildung im Spurplan verlassen:

- 1) Es findet eine automatische Suche nach GFK-tauglichen Bereichen der Infrastruktur mit anschließender Zerlegung dieser in GFK statt. Als Vorgaben für die Suche dienen zwei Kriterien, die den zu erwartenden Umfang der GFK bestimmen: Die Gleisanzahl im Fahrstraßenknoten und die Anzahl von Zulaufstrecken. Entsprechen irgendwelche Infrastrukturausschnitte diesen Anforderungen, werden dort Weichenelemente in Gruppen gesammelt, die durch Haltepositionen voneinander getrennt sind, so dass Gesamtfahrstraßenknoten entstehen. In der Regel wird jeder Durchgangsbahnhof in zwei Bahnhofsköpfe geteilt, komplexere Fahrstraßenknoten mit vielen Zulaufstrecken und Zwischensignalen können jedoch auch aus mehr als zwei GFK bestehen.

Der Nachteil des automatischen Algorithmus besteht darin, dass die Infrastrukturdaten eventuell unvollständig sein können. Es können z.B. die Strecken- und Gleisbezeichnungen oder die Haltepositionen fehlen. Im ersten und zweiten Fall werden unter Umständen nicht alle Fahrstraßenknoten als solche erkannt. Bei fehlenden Halteplätzen besteht die Gefahr, dass sich die GFK „zu weit“ ausdehnen und inkonsequent werden. Zwar lassen sich solche Fehler mit zusätzlichen Plausibilitätskontrollen einigermaßen vorbeugen (wenn beispielsweise auch die Betriebsstellenmitten als Grenzen akzeptiert werden oder wenn die Weichenbestände der benachbarten GFK überprüft werden), eine vollständig korrekte GFK-Abgrenzung sollte vom automatischen Algorithmus dennoch nicht erwartet werden.

- 2) Die zweite Technik, eine manuelle Vorgabe der GFK-tauglichen Infrastrukturbereiche, überlässt dem Anwender die Identifikation von Bahnhofsköpfen und Abzweigstellen, führt aber die Zuteilung von Weichen zu den GFK weiterhin automatisch aus. Es ist dabei nur erforderlich, ein Weichenelement, von dem der GFK bis zu den Haltepositionen ausgebreitet wird, im gewünschten Bereich zu

markieren. Das Problem der nicht angegebenen Halteplätze bleibt auch für diese Technik bestehen.

- 3) Eine vollständig manuelle Zuteilung von Weichen und Kreuzungen zu den Gesamtfahrstraßenknoten mittels grafischer Infrastrukturdarstellung stellt die dritte Möglichkeit dar, die GFK abzugrenzen. Der Bearbeiter markiert dabei einzelne Weichen und Weichengruppen und ordnet sie den bestimmten GFK zu. Dies erfordert gute Fachkenntnisse. Da es sich um eine „natürliche“ Erkennung von Bahnhofsköpfen und weiteren fahrstraßentypischen Strukturen handelt, kann eine völlige Unabhängigkeit der Ergebnisse von der Vollständigkeit der Infrastrukturdaten gewährleistet werden.

Im allgemeinen ist für die GFK-Abgrenzung eine Kombination von allen drei Techniken zu empfehlen. Man kann z.B. mit der ersten Methode die Gesamtfahrstraßenknoten grob lokalisieren, mit der zweiten weitere GFK vorgeben und anschließend mit der dritten notwendige Korrekturen vornehmen.

Die zweite Phase der GFK-Festlegung, die Überprüfung der GFK auf voneinander getrennte Bereiche, erfolgt vor der Berechnung der Qualitäts- und Leistungskenngrößen der GFK, da die Vollständigkeit der Fahrtenausschlüsse im GFK gemäß (8-1) von den Verläufen der Modellzüge abhängig ist, die bekanntermaßen oft geändert werden. Formell bedeutet diese Überprüfung eine Suche nach getrennten Bereichen in der Fahrtenausschlussmatrix des GFK. Tabelle 8-1 stellt eine typische Fahrtenausschlussmatrix mit getrennten Bereichen dar. Diese sind allerdings nur dann gut erkennbar, wenn Fahrten in der Matrix umgeordnet werden: Tabelle 8-2 enthält die gleiche Matrix mit umgestellten Spalten und Reihen, die getrennten Bereiche sind dort grau hervorgehoben.

		Fahrten				
		1	2	3	4	5
Fahrten	1	X		X		
	2		X		X	
	3	X		X		X
	4		X		X	
	5			X		X

		Fahrten				
		1	3	5	2	4
Fahrten	1	X	X			
	3	X	X	X		
	5		X	X		
	2				X	X
	4				X	X

-1: Fahrtenausschlussmatrix eines GFK

-2: Getrennte Bereiche in der gleichen Matrix

Algorithmisch sind getrennte Bereiche in einer symmetrischen Matrix leicht zu finden. Falls es solche in einem GFK gibt, teilt dieser sich in zwei, wie in dem Beispiel, oder in mehrere unabhängige Systeme und darf nicht als eine Einheit betrachtet werden. Eine Wartezeitrechnung wäre für ihn dementsprechend unplausible Aussagen

liefern. Für bessere Ergebnisse sollte man deswegen entweder zusätzliche besondere Fahrten definieren (hier z.B. einen Modellzug, der sich mit den Fahrten 5 und 2 ausschließt), oder die Konfiguration des GFK ändern. d.h. ihn in kleinere GFK zerlegen.

8.2 Verfahren zur Berechnung der planmäßigen Wartezeiten in GFK

Für die Berechnung der im Gesamtfahrstraßenknoten entstehenden Wartezeiten wird, basierend auf den Arbeiten von POTTHOFF [42], das Modell M/G/1 verwendet (siehe u.a. [1], [39], [70], [71]). Es gilt:

$$Elw = \frac{\rho^2}{(1-\rho)} \cdot \frac{1 + VtB^2}{2} \quad (8-2)$$

Nach der Umrechnung von der mittleren Warteschlangenlänge Elw in die mittlere Wartezeit EtW und einer Transformation nimmt (8-2) folgende Form an:

$$EtW = \frac{\lambda \cdot EtB^2}{2(1 - \lambda \cdot EtB)} \quad (8-3)$$

SCHWANHÄUßER [48] schlägt vor, auch für das teilweise mehrstellige Bedienungssystem GFK die gleiche Formel zu verwenden, und zwar modifiziert durch die bereits vorgestellte Verkettungszahl φ :

$$EtW = \frac{\varphi \lambda \cdot EtB_{GFK}^2}{2(1 - \varphi \lambda \cdot EtB_{GFK})} \quad (8-4)$$

Die Verkettungszahl ergibt sich aus der Teilung der Anzahl verketteter Fahrten des GFK N durch die gesamte Fahrtenanzahl im Knoten N_k :

$$\varphi = \frac{N}{N_k} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n h_{ij}}{N_k} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_{\varphi ij} \quad (8-5)$$

wobei

$$p_{\varphi ij} = \begin{cases} h_i \cdot h_j, & \text{wenn Zug } i \text{ und Zug } j \text{ einander ausschließen} \\ 0, & \text{in den anderen Fällen} \end{cases} \quad (8-6)$$

Bei $N=N_k$ wird $\varphi = 1$ (einstelliges Bedienungssystem). Der verkettete Belegungsgrad ρ' , der für einstellige Bedienungssysteme nicht größer als 1 sein kann, wird ebenfalls mit Hilfe der Verkettungszahl abgeleitet:

$$\rho' = \varphi \cdot \rho \quad (8-7)$$

Die Momente der Bedienungszeit errechnen sich analog zu dem Näherungsverfahren für Teilfahrstraßenknoten (Kapitel 4):

$$EtB_{\text{GFK}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_{\varphi ij} \cdot tZ_{ij} \quad (8-8)$$

$$EtB^2_{\text{GFK}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_{\varphi ij} \cdot (tZ_{ij} + tD_{ij})^2 \quad (8-9)$$

WENDLER weist in [66] nach, dass die Verwendung der Formel (8-4) in Verbindung mit (8-8) dazu führt, dass φ letztendlich im Quadrat in (8-4) eingeht, wodurch die mittlere Wartezeit im GFK zu gering ausgewiesen wird. Für die Bereinigung dieses Fehlers schlägt WENDLER auch für Gesamtfahrstraßenknoten eine Light-Heavy-Traffic-Approximation vor (siehe Abschnitt 4.2.3). Dabei verwendet er für den HT-Bereich die Formel (8-4) des einkanaligen Ersatzmodells mit einigen Modifikationen. So führt er eine sogenannte bedingte Wahrscheinlichkeit p_{ij} ein, die besagt, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Zug j folgt, falls ein Zug i im GFK eingetroffen ist. Dadurch soll die in $p_{\varphi ij}$ versteckt enthaltene Verkettungszahl herausgenommen werden und die Erwartungswerte (8-8) und (8-9) können so exakter ausgewertet werden.

Bedingte Wahrscheinlichkeiten sind den Fahrtenfolgehäufigkeiten prinzipiell ähnlich und werden aus den bereits bekannten Wahrscheinlichkeiten $P_{\varphi ij}$ berechnet:

$$p_{ij} = \frac{p_{\varphi ij}}{\sum_{j=1}^n p_{\varphi ij}} \quad (8-10)$$

oder als Matrixform zusammengefasst:

$$(p_{ij}) = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nn} \end{pmatrix} \quad (8-11)$$

Des Weiteren wird die Wahrscheinlichkeit p_{Ei} bestimmt, mit der sich ein Zug i im einkanaligen Ersatzsystem - GFK befindet (in TFK mit $\varphi = 1$, $p_{Ei} = p_i$).

Die Wahrscheinlichkeiten p_{Ei} lassen sich über den stochastischen Links-Eigenvektor ausdrücken

$$\bar{p}_E = (p_{E1}, p_{E2}, \cdots, p_{En}) \quad (8-12)$$

Dieser steht in folgender Beziehung zur Matrix (8-11):

$$\bar{p}_E \cdot \begin{pmatrix} p_{1|1} & p_{1|2} & \cdots & p_{1|n} \\ p_{2|1} & p_{2|2} & \cdots & p_{2|n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n|1} & p_{n|2} & \cdots & p_{n|n} \end{pmatrix} = \bar{p}_E \quad (8-13)$$

Mit der Normierungsbedingung

$$\sum_{i=1}^n p_{Ei} = 1 \quad (8-14)$$

lassen sich die Wahrscheinlichkeiten p_{Ei} aus dem linearen Gleichungssystem ermitteln. Hieraus sind die Erwartungswerte für die Formel (8-4) zu berechnen:

$$EB_{GFK} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_{Ei} \cdot p_{ij} \cdot (tZ_{ij} + tD_{ij}) \quad (8-15)$$

$$EB_{GFK}^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_{Ei} \cdot p_{ij} \cdot (tZ_{ij} + tD_{ij})^2 \quad (8-16)$$

Da bei der Verringerung der Zuganzahl N in (8-4) nur die Ankunftsintensität beeinflusst wird, kann der Hochrechnungsfaktor x direkt berechnet werden:

$$EtW_{zul} = \frac{\varphi \lambda x \cdot EB_{GFK}^2}{2(1 - \varphi \lambda x \cdot EB_{GFK})} \quad (8-17)$$

mit

$$x = \frac{2 \cdot EtW_{zul}}{\varphi \lambda (EB_{GFK}^2 - 2 \cdot EtW_{zul} \cdot EB_{GFK})} \quad (8-18)$$

Neben einer höheren Präzision, besitzt das Verfahren von WENDLER einen weiteren positiven Effekt: die Berechnung der bedingten Wahrscheinlichkeiten ist nicht möglich, wenn der GFK in voneinander getrennte Bereiche zerlegt werden kann.

8.3 Fazit für das GFK-Modell

Das Gesamtfahrstraßenknoten-Modell bleibt trotz Erweiterungen ein Ersatzsystem, dessen Aussagen nicht immer korrekt anzusehen und deshalb nicht eindeutig zu interpretieren sind. Die Hauptursachen der Fehlbarkeit des GFK-Modells sind:

- die Annahme über die Einkanaligkeit des Bedienungssystems, welche wegen Parallelfahrten nicht erfüllt wird
- keine Möglichkeit, die entstandenen Engpässe infolge der Ausdehnung der GFK genau zu lokalisieren

- voneinander getrennte Bereiche, die in der Praxis in den meisten Bahnhofsköpfen entstehen, wodurch solche Bahnhofsköpfe nicht als GFK interpretiert werden dürfen
- Vorgaben für die Qualitätsmaßstäbe der GFK, die so unvollständig sind, dass eine Auswertung der Qualitätsfaktoren das Gesamtbild oft nur noch weiter verzerrt (näheres dazu in Kapitel 9)

In diesem Kapitel wurde nur die Berechnung von planmäßigen Kenngrößen für GFK analysiert. Natürlich können auch die Folgeverspätungen anhand der Formeln (4-11) und (4-17) mit dem Einsatz der Verkettungszahl ausgewertet werden, mit einer gleich unzureichenden zu erwartenden Qualität der Ergebnisse, worauf hier sowie in der Realisation des Programms ANKE verzichtet wurde. Das Programm ALFA [11] führt hingegen die Berechnungen für Gesamtfahrstraßenknoten mit beiden Verfahren aus.

9 Qualitätsmaßstäbe

Aus wirtschaftlichen Gründen sollen die Bahnanlagen ein Verhalten aufweisen, das einerseits ihre Leistungsfähigkeit effektiv ausnutzt, andererseits die Überlastung und damit verbundene Verluste in vernünftigen Grenzen hält. Dafür sind die im Abschnitt 2.2 beschriebenen charakteristischen Kenngrößen mit den Vorgaben zu versehen, die einer optimalen Auslastung der Untersuchungsbereiche (Teil- und Gesamtfahrstraßenknoten) entsprechen.

Eine ausführliche Analyse unterschiedlicher Messgrößen der Qualität gibt SCHWAN-HÄUßER in [51]. Dabei kommen für die Beurteilung der Qualität des Fahrplans bzw. des Betriebes sowohl elementare Kenngrößen wie Belegungsgrad oder erforderliche mittlere Pufferzeit, als auch komplexere wie Betriebsflüssigkeit, mittlere Wartezeit, mittlere Warteschlangenlänge und Aufnahmefähigkeit der Gleisgruppen in Frage. Da die Auslastung des Systems in analytischen Modellen normalerweise als Wartezeitfunktion dargestellt wird (siehe Abbildung 2-1 Seite 20), ist es zweckmäßig, auch die Qualitätsvorgaben als zulässige Wartezeiten zu definieren.

Allgemein gilt die Summe der Wartezeiten, die in einem **Fahrplan** enthalten sind, als Maß für die Marktfähigkeit der Bahn. Diese fahrplanmäßigen Wartezeiten, die infolge Einfädelung und Überholung entstehen, als Qualitätsmaßstab zu verwenden, ist wegen ihres Zusammenhangs mit Marketing-Vorgaben sehr sinnvoll. So wurde bereits in den Richtlinien zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit der Fahrstraßenknoten aus dem Jahre 1979 [8] das Verhältnis der Wartezeiten zur Betriebszeit, die mittlere Warteschlangenlänge Elw , als grundlegende Norm für die Betriebsqualität bezeichnet. Der Qualitätsfaktor q_{LW} als Relation zwischen der tatsächlich ermittelten mittleren Warteschlangenlänge und dem vorgegebenen zulässigen Wert ist heute eine der wichtigsten charakteristischen Kenngrößen der Fahrplanqualität, seine genaue Beschreibung ist im Abschnitt 2.2.2 enthalten.

Ursprünglich sollte die Anzahl der im Durchschnitt wartenden Fahrten laut alten Dienstschriften der Deutschen Bundesbahn den Wert $Elw = 0,6$ für Fahrstraßenknoten und $Elw = 0,3$ für Teilfahrstraßenknoten bei einer befriedigenden Fahrplanqualität nicht überschreiten. Später hat man für TFK plausible Interpolationsformeln für die Berechnung der zulässigen mittleren Warteschlangenlänge entwickelt, die u.a. das Mischungsverhältnis des Betriebsprogramms berücksichtigen. So können an die schnelleren Reisezüge höhere Anforderungen gestellt und gleichzeitig den langsamen Güterzügen kann mehr Spielraum für eine mögliche Disposition gegeben werden.

Auch die obere Grenze der im Schnitt wartenden Züge für den Gesamtfahrstraßenknoten wurde im Programm ALFA abhängig von dem Anteil der Reisezüge umgestaltet. Während die TFK immer kleine Infrastrukturbereiche sind, in denen sich

zu jedem beliebigen Zeitpunkt nur ein Zug befinden kann, ist es bei GFK nicht möglich pauschal vorzusagen, wie groß und komplex sie sein werden. So kann eine feste Qualitätsvorgabe für GFK zur Qualitätsüberschätzung führen, wenn z.B. im Grenzfall ein GFK einen TFK darstellt ($\varphi = 1$). Umgekehrt werden die Anforderungen an einen GFK zu hoch, wenn dort mehrere Parallelfahrten möglich sind ($\varphi \ll 1$). Eine Anpassung des Qualitätsmaßstabs an die Verkettungszahl φ wäre möglicherweise eine gute Alternative, in der Fachliteratur wurde sie dennoch bisher nicht behandelt, vermutlich wegen des ohnehin unausgewogenen Konzepts des GFK.

Genauso wie im Fahrplan lässt sich auch **im Betrieb** der Quotient aus der Summe der Folgeverspätungen und des Untersuchungszeitraums als eine mittlere Warteschlangenlänge interpretieren und mit entsprechenden Qualitätsvorgaben versehen.

9.1 Interpolationsformeln

Bei der Durchführung von Leistungsuntersuchungen wurde wiederholt festgestellt, dass der Ansatz mit festen Vorgaben für die zulässigen Warteschlangenlängen zu unplausiblen Ergebnissen führen kann. In einer Studie für die Deutsche Bundesbahn [50] verglichen SCHWANHÄUßER und SCHULTZE verschiedene Streckenabschnitte hinsichtlich ihrer berechneten Leistungsfähigkeit und des realen Betriebes. Dabei wurde festgestellt, dass der Anteil der Reisezüge eine wesentliche Rolle für die Betriebsqualität einer Strecke spielt. Mit Hilfe einer exponentiellen Interpolationsfunktion gelang dann eine ausreichend genaue Eichung der Qualitätsmaßstäbe, die später in die Dienstschriften der DB AG aufgenommen wurde.

In den Programmen ALFA und STRELE [11] wird bereits die von dem Anteil der Reisezüge (ARZ) abhängige zulässige Warteschlangenlänge im Voraus berechnet. Für den Zustand der Fahrplanerstellung gilt im Teilfahrstraßenknoten

$$LW_{F_{zul}} = 0,479 \cdot e^{-1,3 \cdot ARZ} \quad (9-1)$$

und im Gesamtfahrstraßenknoten

$$LW_{zul}^{GFK} = 1,150 \cdot e^{-1,3 \cdot ARZ} \quad (9-2)$$

Die zulässige Warteschlangenlänge für TFK für die Betriebsabwicklung wird in ALFA ebenfalls mit Hilfe einer Interpolationsformel ermittelt:

$$LW_{B_{zul}} = 0,257 \cdot e^{-1,3 \cdot ARZ} \quad (9-3)$$

Aus den Formeln (9-1) und (9-3) folgt, dass an den Betriebszustand deutlich höhere Anforderungen als an die Fahrplanqualität gestellt werden, d.h. eine Folgeverspätung wird etwa doppelt so hoch wie eine gleiche im Fahrplan vorgesehene Fahrzeitverzögerung bewertet. Diese Vorgehensweise berührt auf subjektiven Empfindungen der Bahnkunden: Die Stabilität des geplanten Betriebes ist für die Kunden von großer

Bedeutung. Die Pünktlichkeit ist maßgebend für die Attraktivität der Bahn als Transportmittels, obwohl die Beförderungsgeschwindigkeit in erster Linie von den Wartezeiten im Fahrplan beeinflusst wird.

Selbst wenn der Anteil der Reisezüge ein geeignetes Kriterium für die Einschätzung der zu erwartenden Betriebsqualität ist, können auch die Formeln (9-1) und (9-3) unter Umständen wenig plausible Ergebnisse liefern. Dies liegt daran, dass auch zwischen den Reisezügen wesentliche Unterschiede bestehen, besonders wenn man den modernen Hochgeschwindigkeitsverkehr den Regionalbahnen gegenüberstellt. Genauso uneinheitlich sind die Anforderungen der Kunden an den schnellen und den langsamen Güterverkehr.

Als eine weitere Verfeinerung der interpolierten Qualitätsmaßstäbe hat SCHWANHÄUßER in [56] die Verwendung von Rangziffern anstelle des Anteils der Reisezüge vorgeschlagen. In der Tat spiegelt die Rangziffer die Bedeutung einer Zugfahrt sowohl für die Fahrplanerstellung als auch für den Betrieb wieder, wobei die Rangziffern eines Zuges im Fahrplan und im Betrieb unterschiedlich sein können. Die zulässige Länge der Warteschlange kann im Fahrplan bei Nennleistung mit folgender Formel von SCHWANHÄUßER ermittelt werden:

$$LW_{F_{zul}} = \frac{0,027}{\sum_{i=1}^m n_i} \cdot \sum_{i=1}^m n_i \cdot e^{0,1277 \cdot Rg} \quad (9-4)$$

Die entsprechende Formel für den Betriebszustand stellt ähnlich der ARZ-Formel etwas höhere Qualitätsanforderungen:

$$LW_{B_{zul}} = \frac{0,0155}{\sum_{i=1}^m n_i} \cdot \sum_{i=1}^m n_i \cdot e^{0,1277 \cdot Rg} \quad (9-5)$$

Falls der Forderungenstrom aus Fahrten eines einzigen Ranges besteht, kann die Formel (9-5) für die zulässige Warteschlangenlänge im Betrieb folgendermaßen umgeformt werden:

$$LW_{B_{i_{zul}}} = 0,0155 \cdot e^{0,1277 \cdot Rg} \quad (9-6)$$

Abbildung 9-1 veranschaulicht, wie unterschiedlich die Qualitätsanforderungen an die einzelnen Zuggattungen sein können: Während z.B. ein ICE so gut wie keine Folgeverspätungen erhalten darf, kann eine Rangierfahrt fast die Hälfte der Betriebszeit mit Warten verbringen.

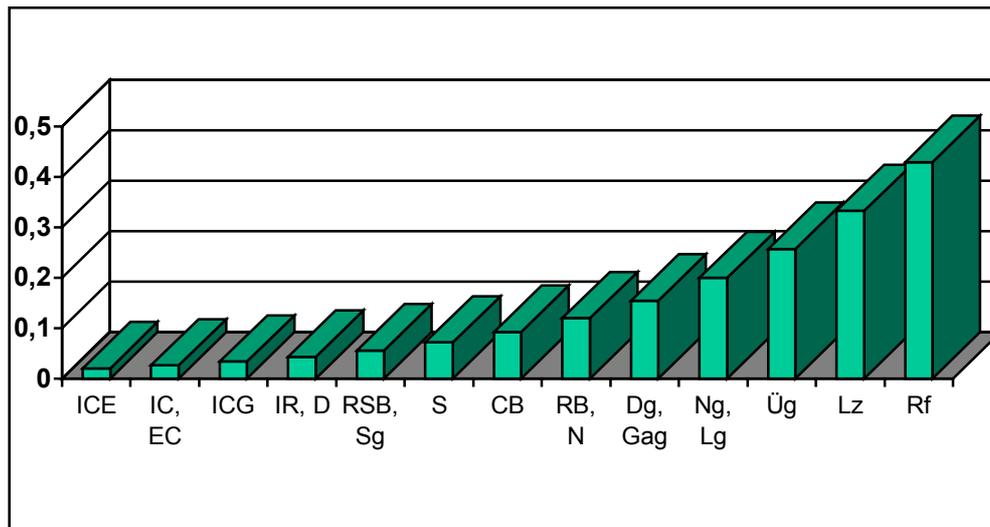


Abbildung 9-1: Zulässige Warteschlangenlängen für Zugfamilien im Betriebsablauf

Die Standardformeln (9-1) und (9-3), die GFK-Formel (9-2), sowie die neuen Formeln (9-4) und (9-5) als Option sind im EDV-System ANKE für die Berechnung der Qualitätsmaßstäbe implementiert¹³. Es existieren jedoch einige interessante Alternativansätze, die möglicherweise in der Zukunft verwendbar sein werden und in dieser Arbeit erwähnt werden sollen.

9.2 Optimaler Leistungsbereich

HERTEL [26] schlägt vor, einen optimalen Leistungsbereich in Eisenbahnanlagen durch folgende zwei Punkte auf der Belastung-Achse des Wartezeitdiagramms (vgl. Abbildung 2-1) zu umschließen: das Minimum der relativen Fahrplanempfindlichkeit und das Maximum der Verkehrsleistung.

Die **relative Empfindlichkeit** einer Funktion ist der Quotient aus ihrer ersten Ableitung und der Funktion selbst. Je langsamer sich eine Funktion ändert, desto stabiler und unempfindlicher wird sie. Die relative Fahrplanempfindlichkeit gegenüber der Änderungen der Auslastung eines Eisenbahnbetriebssystems ergibt sich aus der Wartezeitfunktion $\sum tW$:

$$EMPF = \frac{\sum tW'}{\sum tW} \quad (9-7)$$

An der Stelle, in deren Nähe eine Erhöhung der Zuganzahl das geringste Wachstum der Wartezeiten verursacht, wird das Minimum der Fahrplanempfindlichkeit erreicht.

¹³ Formeln (9-4) und (9-5) stellen einen systematischen Vorschlag dar und sind im Gegensatz zu (9-1) und (9-3) noch nicht geeicht.

Die Empfindlichkeitskurve lässt sich für jedes bedienungstheoretische Modell, in dem die erste Ableitung der Wartezeitfunktion existiert, erstellen. HERTEL demonstriert in [26] die exakte Ableitung der relativen Empfindlichkeit für sein GI/GI/1 – Wartemodell (siehe [15] und Abschnitt 4.2.2). Prinzipiell kann auch eine relative Empfindlichkeit der Folgeverspätungen aus der Formel (4-11) oder (4-17) ermittelt werden. Ob die resultierende Funktion ein Minimum im Bereich $0 < \sum tW < \infty$ besitzt, ist allerdings unklar.

Die zweite Grenze des optimalen Leistungsbereichs wird durch eine andere Funktion festgelegt, die **Verkehrsleistung**, auch **Beförderungsenergie** genannt. Sie ist das Produkt aus Verkehrsstärke λ und Beförderungsgeschwindigkeit v_{bef} :

$$Q = \lambda \cdot v_{\text{bef}} \quad (9-8)$$

Mit Erhöhung der Zugzahl sinkt die Beförderungsgeschwindigkeit in dieser Funktion zunächst langsam, so dass die Verkehrsleistung noch bis zu einem bestimmten Punkt auf der Belastungsachse steigt. Ein weiterer Anstieg des Durchsatzes wird danach durch eine rasche Abnahme der Beförderungsgeschwindigkeit kompensiert. Schließlich fällt die Geschwindigkeit und somit die Verkehrsleistung in einem unendlichen Stau bis auf Null ab. Daher ist ein Betrieb des Systems oberhalb des Maximums der Beförderungsenergie unwirtschaftlich.

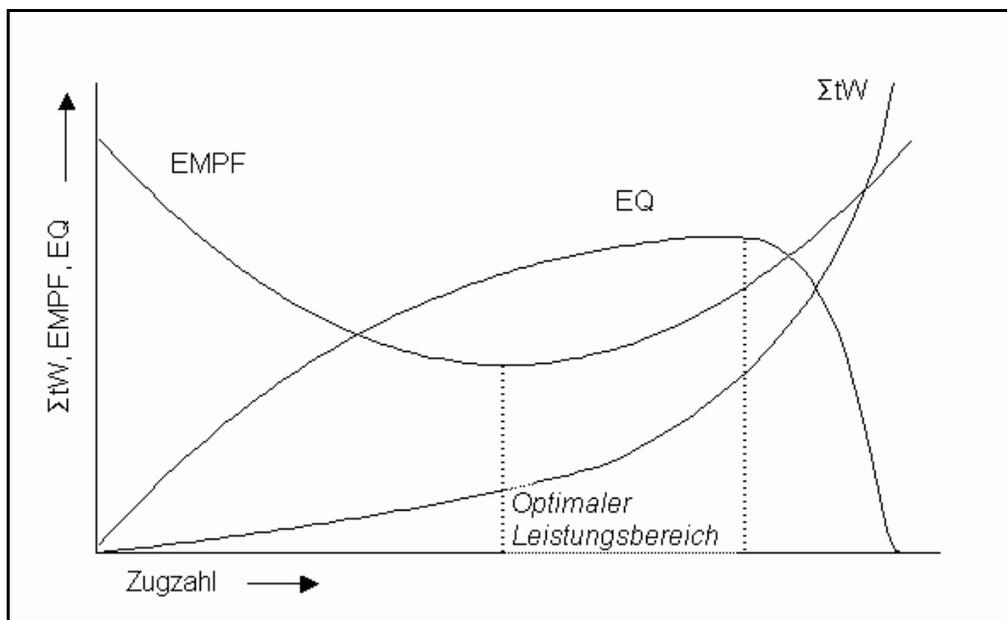


Abbildung 9-2: Optimaler Leistungsbereich in der Wartezeitfunktion

In Abbildung 9-2 sind neben der Wartezeitfunktion $\sum tW$ die Empfindlichkeit $EMPF$ und mittlere Verkehrsleistung EQ dargestellt. In diesem Beispiel existiert zwischen dem Minimum der Empfindlichkeit und dem Maximum der Verkehrsleistung ein breiter optimaler Leistungsbereich.

Der wesentliche Vorteil des HERTEL'schen Verfahrens besteht darin, dass eine optimale Auslastung des Systems funktionell ermittelt wird. Im Gegensatz zu den empirischen Formeln von SCHWANHÄUßER / SCHULTZE basiert dieser Ansatz nicht auf der Marktwirksamkeit des Angebotes entsprechend subjektiven Empfindungen der Eisenbahnkunden, sondern auf objektiven Sachverhalten. Infolgedessen benötigt das Verfahren gar keine Qualitätsvorgaben, da der optimale Leistungsbereich direkt aus der modellierten Wartezeitfunktion ermittelt werden kann. Danach soll jede errechnete Zuganzahl, die in diesem Bereich liegt, laut HERTEL einer akzeptablen und wirtschaftlich profitablen Auslastung des Systems entsprechen.

Es gibt dennoch Gründe, die gegen den Einsatz des beschriebenen Verfahrens sprechen. Zum einen ist es nur für analytische Untersuchungen unmittelbar geeignet, denn auch wenn sich eine geschlossene Wartezeitfunktion für Simulationsmodelle erstellen lässt, kann die statistische Sicherheit dieser Funktion nur durch eine sehr große Anzahl der Simulationsläufe erreicht werden. Zum anderen müssen die im Verfahren verwendeten Funktionen für jedes analytische Modell noch hergeleitet werden. Dies kann unter Umständen weitere Schwierigkeiten bereiten, wenn z.B. im Modell keine Angaben zur mittleren Fahrgeschwindigkeit oder zur Streckenlänge vorhanden sind. Darüber hinaus stellt sich die Frage, ob dieses Konzept überhaupt für die Teilfahrstraßenknoten als Bedienungssysteme tauglich ist: Es gibt keine Sicherheit, dass das Minimum der Empfindlichkeit und das Maximum der Verkehrsleistung in allen konkreten Fällen existieren und so hintereinander liegen, dass dadurch ein optimaler Leistungsbereich gebildet wird.

Offensichtlich besteht in diesem Bereich noch Forschungsbedarf. Man versucht u.a. die Funktionen, die den optimalen Leistungsbereich bestimmen, umzuformen, um die etwas willkürliche Definition der Verkehrsleistung zu erweitern und weitere Wirtschaftsfaktoren einzubeziehen.

9.3 Weitere Ansätze

Basierend auf Schwanhäußer [53] verwendet JOCHIM [29] in seiner Lösung ebenfalls zwei Funktionen: die Kosten- und die Erlöskurve eines Bahnunternehmens. Zwischen den beiden Linien soll eine sogenannte **Gewinnlinie**¹⁴, wie in Abbildung 9-3 dargestellt, entstehen. Im Bereich der Gewinnlinie liegende Zugzahlen entsprechen einem profitbringenden Betrieb, das Gewinnmaximum gibt die Nennleistung des Systems an.

¹⁴ Der Begriff „Gewinnlinie“ wurde erstmals in einer Niederschrift des Wissenschaftlichen Ausschusses für Bau- und Betriebstechnik der Deutschen Bundesbahn vom September 1991 eingeführt

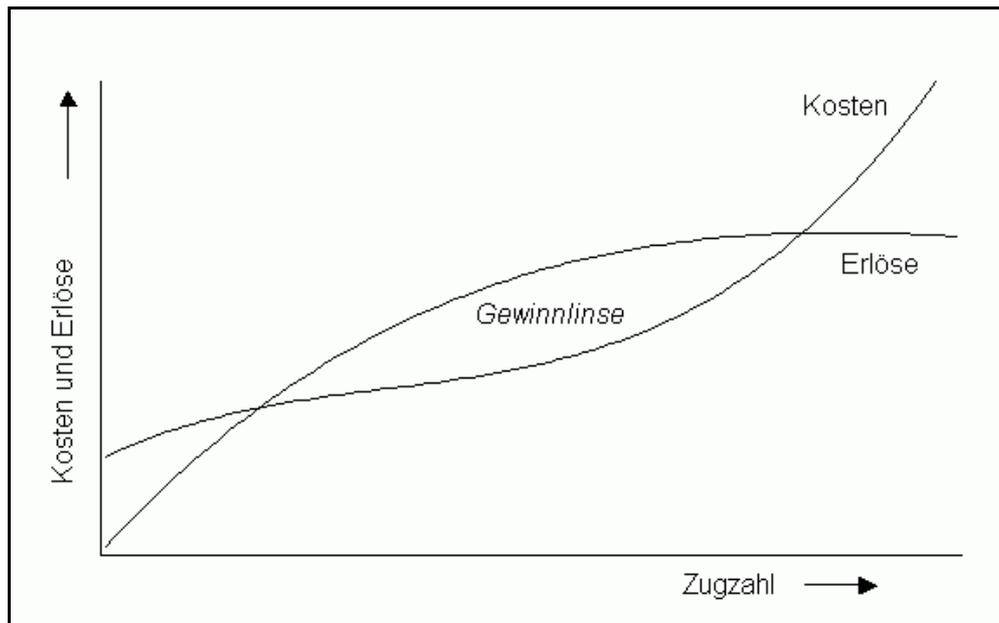


Abbildung 9-3: Eine Gewinnlinie zwischen Kosten und Erlösen

Um die Verluste infolge von Wartezeiten abzuschätzen, berechnet JOCHIM die Erlöskurven mit Hilfe des Modal-Split-Modells, in dem komplexe empirische Zeitbewertungsfaktoren integriert sind. Auch die Kosten setzen sich aus mehreren Komponenten, wie Personal-, Vorhaltungs-, Abfertigungs- Zugbildungskosten usw. zusammen. Insofern ist das neue Verfahren schon aufgrund des umfangreichen Datenflusses und der Notwendigkeit, zahlreiche Schätzfunktionen zu eichen, in der Praxis sehr aufwendig zu handhaben.

Dennoch ist dieser Ansatz für analytische Leistungsuntersuchungen zweifellos interessant, weil er sich ausschließlich nach betriebswirtschaftlichen Kenngrößen orientiert und keine abgeleiteten betrieblichen Parameter enthält und somit unabhängig von den eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Verfahren gilt. Im allgemeinen bestätigt das Gewinnlinsen-Verfahren grundsätzlich die Genauigkeit des gebräuchlichen empirischen Ansatzes von SCHWANHÄÜBER/SCHULTZE (siehe Abschnitt 9.1)

In einer weiteren Studie [34] versucht OETTING die Funktionalität der Verkehrsleistung (9-8) zu erweitern, indem neben der Beförderungsgeschwindigkeit und der Ankunftsintensität zusätzlich die Zugmasse in Betracht gezogen wird. Obwohl die Kurve für diese sogenannte **Transportkraft** ähnlich wie die der mittleren Verkehrsleistung verläuft (vgl. Abbildung 9-2), erlaubt sie dank des eingeführten Wirtschaftsfaktors einen besseren Vergleich der Varianten der Betriebsprogramme. Allerdings muss das Konzept der Transportkraft noch gründlich erforscht werden, bevor man es in der Praxis verwenden kann. So würde die Transportkraft vermutlich keine brauchbaren Ergebnisse unter bestimmten Randbedingungen liefern, etwa wenn hochrangige Züge getaktet werden.

10 EDV-System ANKE

Basierend auf in dieser Arbeit formulierten Konzeptionen sowie vorgestellten Modellen und Verfahren wurde das elektronische Datenverarbeitungssystem für die analytische Netzkapazitätsermittlung ANKE entwickelt. Einzelheiten der software-technischen Umsetzung: verwendete Objektmodelle, Datenbankaufbau, Gestaltung grafischer Benutzeroberfläche, Datenverwaltung, Algorithmen zur Realisierung der TFK-Abgrenzung, der Mindestzugfolgezeitenberechnung usw. sind zwar sehr umfangreich und als IT-Aspekte zweifellos interessant. Aber aus Sicht der Eisenbahnbetriebswissenschaft, insbesondere für die analytische Prozessmodellierung im System Eisenbahn als Gegenstand dieser Arbeit, sind solche spezifischen Details eher nebensächlich und werden deshalb nicht ausführlich beschrieben.

Genauso wenig zweckmäßig wäre im Rahmen dieser Arbeit alle Nuancen der Programmbenutzung zu erläutern. Für den potenziellen Anwender wird an dieser Stelle auf das umfangreiche Online-Hilfe-System von ANKE [60] verwiesen, das im übrigen auch einige theoretische Hintergründe beinhaltet. Für den Einsteiger empfiehlt sich das ANKE-Benutzerhandbuch [56], welches mit dem Programm geliefert wird und dessen wichtigste Funktionen leicht verständlich erklärt. In diesem Kapitel wird stattdessen die prinzipielle Struktur des EDV-Systems vorgestellt. Elemente der Benutzerschnittstelle, sowie einzelne Funktionen und Optionen werden nur in bezug auf die in vorherigen Kapiteln analysierten theoretischen Aspekte angesprochen. Abschließend werden allgemeine Grundsätze zur Engpassauflösung und zur Verbesserung des Leistungsverhaltens von Bahnanlagen im Abschnitt 10.6 formuliert.

10.1 Programmstruktur

ANKE ist ein typisches Einplatzsystem für PC. Dies bedeutet, dass jede Netzuntersuchung als ein selbstständiges Projekt betrachtet werden kann und auf keine andere Software angewiesen ist. Das Programm baut auf dem System RUT-0 (Rechnerunterstütztes Trassenmanagement) auf und verwendet teilweise aus RUT-0 stammende Daten. Abbildung 10-1 veranschaulicht das Prinzip der Datenübernahme.

RUT-0 - Infrastrukturdaten werden komplett mit dem Programm SPURPLAN erfasst und können von ANKE gelesen und analysiert, jedoch nicht geändert werden. Die infrastrukturbezogene automatische Abgrenzung von Teilfahrstraßenknoten (siehe Abschnitt 5.1.3) greift zwar auf die Infrastrukturdaten zu, aber die eigentlichen TFK werden nicht als Bestandteil der Spurplan-Daten, sondern als Teil des ANKE-Projektes mit Referenzen auf die Infrastrukturelemente gespeichert. Falls die Infrastruktur nachträglich mit Hilfe von SPURPLAN überarbeitet wird, werden

entsprechende ANKE-Daten zwecks Anpassung an die geänderte Infrastruktur automatisch umorganisiert.

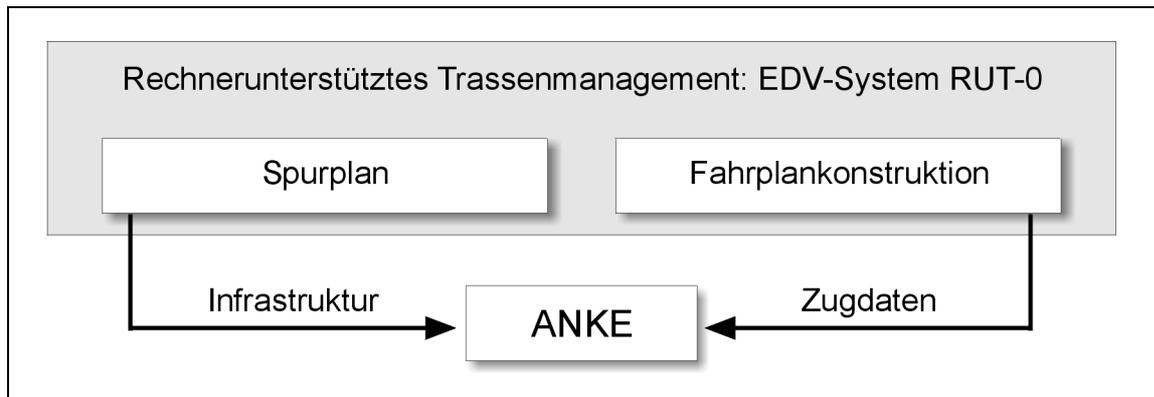


Abbildung 10-1: Verwendung der RUT-0-Daten

Im Gegensatz zum Programm SPURPLAN, von dem die Infrastrukturdaten für ANKE bereitgestellt werden, ist der Einsatz der zweiten Komponente von RUT-0, des Programms FAKTUS für die Fahrplankonstruktion, für die Kapazitätsuntersuchungen mit ANKE nicht erforderlich. Um jedoch die aufwendige Eingabe von Modellzügen zu beschleunigen, kann ANKE optional auf die Zugdaten eines RUT-0-Fahrplans zugreifen und aus ihnen eigene Modellzugdaten erstellen. Die Grundsätze des Fahrplanimports wurden bereits im Abschnitt 6.4 formuliert.

Die interne Datenstruktur von ANKE und die Abhängigkeiten zwischen deren Elementen ist schematisch in Abbildung 10-2 dargestellt. Die **Infrastrukturdaten** befinden sich auf dem Schema außerhalb des ANKE-Projektes, weil sie erstens mit einem anderen Programm erfasst werden und zweitens von mehreren ANKE-Projekten gleichzeitig verwendet werden können. Die erste interne Datengruppe, die **Modellzugdaten**, enthält vorgegebene Zugcharakteristika und die auf den Spurplan-Betriebsstellenfahrwegen aufgebauten Laufwege. Bei der Fahrzeitrechnung werden die Belegungszeiten jedes Zuges für alle befahrenen Blockabschnitte ermittelt und in **Sperrzeitentrepfen** zusammengefasst. Danach werden die Laufwege der Modellzüge in Überholungsabschnitte eingeteilt, in denen die Sperrzeitentrepfen aneinander geschoben werden.

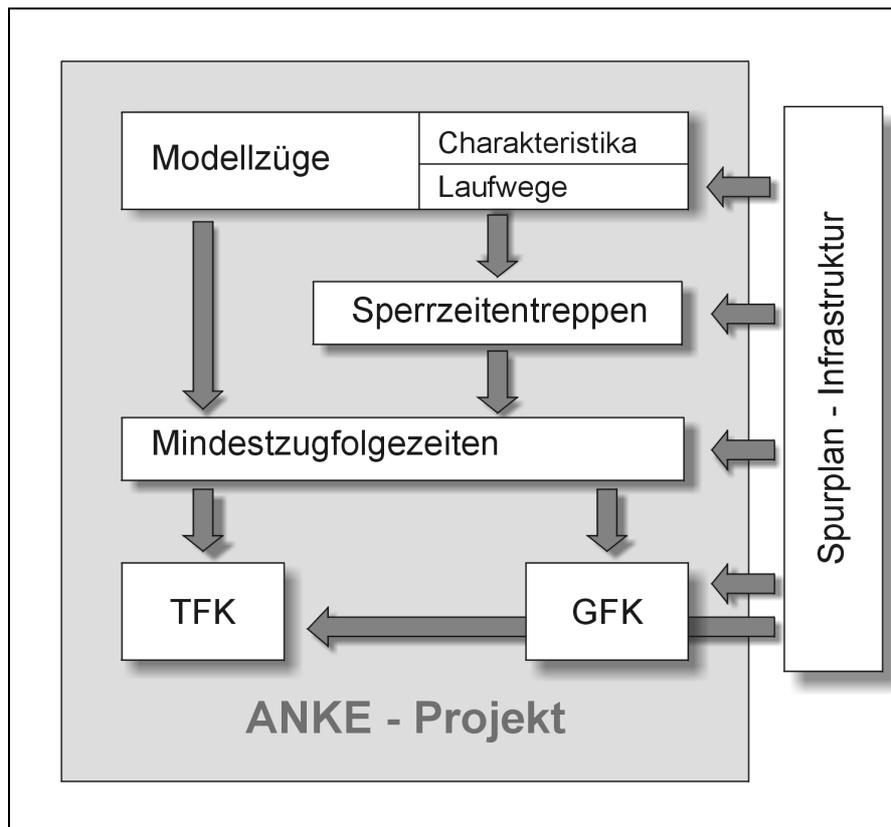


Abbildung 10-2: Datenstruktur eines ANKE-Projektes

So entstehen die **Mindestzugfolgezeiten**, die wiederum als Hauptvorgaben für die spätere Kapazitätsberechnung in die **TFK** und die **GFK** eingetragen werden. Diese werden anhand der Infrastruktur vor der Mindestzugfolgezeitenrechnung ermittelt und dienen als Netzelemente, deren Qualitäts- und Leistungskenngrößen die Kapazität des betrachteten Netzteils bestimmen und mögliche Leistungsengpässe in der Infrastruktur aufdecken.

10.2 Netzuntersuchung mit ANKE

Eine analytische Netzuntersuchung mit dem Programm ANKE lässt sich in vier Phasen aufteilen, deren Reihenfolge auch für herkömmliche EDV-Systeme für die Leistungsberechnungen von Eisenbahnsystemen typisch ist:

- **Infrastruktureingabe:** möglichst vollständige Abbildung aller Elemente der Bahnanlage, die genaue Definition der Fahrtenverläufe und exakte Fahrzeitenrechnung gestattet
- **Definition der Modellzüge:** Übernahme eines RUT-0-Fahrplans und/oder direkte Eingabe von Zugcharakteristika und Laufwegen, anschließend Fahrzeitenrechnung
- **Steuerung der Eingangsdaten:** Auswahl der Parameter, Berechnung und Überprüfung von Mindestzugfolgezeiten und anschließend Kapazitätsermittlung

- Engpassidentifikation und -auflösung: detaillierte Analyse der ermittelten Kenngrößen, Beeinflussung der Zugströme und Infrastrukturänderung mit darauffolgender Überprüfung der Ergebnisse

10.2.1 Infrastruktureingabe

Eine komplette manuelle Erfassung der Infrastruktur ist auch für relativ kleine Abschnitte ein aufwendiger Prozess, der viel Sorgfalt und Fachkenntnis erfordert. Für eine korrekte Fahrzeitermittlung müssen zuerst alle Streckenmerkmale aus dem Lageplan inklusive ihrer Charakteristika und Kilometrierungsangaben exakt angegeben werden:

- Betriebsstellenelemente: Betriebsstellenanfang und -ende mit Streckennummer, Gleisbezeichnungen, Fahrzeitmesspunkte
- Weichen und Kreuzungen: alle existierende Typen mit Angaben zur Gleislage und der Kilometrierungsrichtung
- Sicherungstechnik: Vor- und Hauptsignale, Signal- und Fahrstraßenzugschlussstellen, Schutzsignale für Rangierfahrten, Elemente der Linienzugbeeinflussung
- Widerstandselemente: Streckenneigungswechsel, Bogen und Tunnel
- Geschwindigkeitselemente: Änderungen der zulässigen Streckengeschwindigkeiten inklusive spezieller Angaben für LZB-geführte Züge, Geltungsbereiche der Geschwindigkeitsbänder
- Halteplätze: Halteplätze für Reise- und Güterzüge mit Angaben zur Bahnsteiglage und -länge
- Weitere Infrastrukturelemente: Grenzen des Bearbeitungsbereichs, Kilometrierungssprünge und -wechsel, Prellböcke, Bahnübergänge und Zusatzelemente zur grafischen Darstellung des Spurplans

Die zweite Phase der Infrastruktureingabe ist die Definition der betriebsstellenbezogenen Fahrwege, die ebenfalls ein Teil der Spurplan-Daten sind. Aus ihnen werden in ANKE-Projekten die Laufwege für Modellzüge zusammengesetzt. Fahrwege verlaufen immer von einer Betriebsstellengrenze zur nächsten (richtungsbezogen) und unterscheiden sich dadurch von den im Stellwerk einstellbaren Fahrstraßen, die zwischen den Hauptsignalen verlaufen und bei Halt nur bis zur Halteposition gelten (vgl. Abschnitt 2.5.2).

Die Fahrwegdefinition erfasst folgende Angaben:

- Bezeichnung und Beschreibung des Fahrweges, seine Gleislage sowie die Angabe, ob der Fahrweg elektrifiziert ist
- Angaben zur Durchfahrmöglichkeit und zum Gleiswechselbetrieb

- Hierarchien für alle Zugklassen (Fernreisezug, Nahreisezug, S-Bahn, Ferngüterzug usw.), die hauptsächlich für die Bildung von Standardlaufwegen maßgebend sind
- Fahrwegverlauf als Reihenfolge der Infrastrukturelemente. Verlauf enthält außerdem Vorgabe-Halteplätze und weitere Merkmale wie Zusatzpunkte, alternative Werte für bestimmte Spurplanknoten oder abweichende Durchrutschwege.

Generell müssen möglichst viele Betriebsstellenfahrwege erfasst werden, und zwar unabhängig davon, ob diese Fahrwege von den Modellzügen tatsächlich benutzt werden sollen. So reicht die Angabe über ein durchgehendes Hauptgleis in einem Überholungsbahnhof alleine nicht aus: Ohne zusätzlichen Fahrweg wird dieses Gleis, obwohl dort keine Züge auf dem Parallelgleis planmäßig halten, vom Programm u.U. nicht als Überholungsmöglichkeit erkannt, wodurch die Mindestzugfolgezeiten überdimensioniert werden könnten.

Für die Bahnanlagenplanung kann oft die gewünschte Präzision der Infrastrukturdaten nicht sichergestellt werden, weil viele Einzelheiten über eine künftige Infrastruktur vorab nicht bekannt sind. Dazu gehören Gleisanzahl, exakte Lagen von Signalen und Zugschlussstellen, Bahnsteiglängen usw. Aus den Planungsunterlagen soll dennoch hervorgehen, welche Streckenwiderstände und zulässige Höchstgeschwindigkeiten in der Anlage zu erwarten sind. Zudem verfügt man normalerweise über die Angaben zur Stellwerkstechnik und zu den Blocksignalabständen. Das voraussichtliche Betriebsprogramm liefert weitere Informationen über die Anzahl, Größe und über die Struktur der Bahnhöfe. Mit Hilfe dieser Hinweise und Anhaltspunkte lassen sich einige Infrastrukturvarianten erstellen, die analytisch bewertet und verglichen werden können.

Als eine der Hauptanforderungen an ANKE wurde im Abschnitt 2.4 die Kompatibilität mit vorhandenen Datenbanken der DB AG genannt. ANKE kann tatsächlich ohne Einschränkungen auf die vorhandenen Spurplan-Datenbestände zugreifen. Dies bedeutet, dass, falls digitale Spurpläne für bestehende oder für geplante Bahnanlagen zur Verfügung stehen, sie ohne weiteres in ANKE eingelesen und mit Modellfahrten versehen werden können. Eine sternförmige Struktur des Untersuchungsbereiches (siehe Abschnitt 7.6.4) kann mit dem Programm SPURPLAN mit einem relativ geringen Aufwand durch die Zusammenfassung mehrerer Spurplan-Projekte gewährleistet werden. Hierzu müssen die in einem Projekt gesammelten Infrastrukturteile miteinander verknüpft und redundante ggf. entfernt werden.

ANKE akzeptiert auch nachträgliche Änderungen der Infrastruktur. Kleinere Infrastrukturanpassungen, die weder die Gleistopologie, noch den Betriebsstellen- und Fahrwegebestand betreffen, bewirken in ANKE eine neue Fahrzeiten- und Mindestzugfolgezeitenermittlung. Bei der Änderung von Gleisverbindungen durch die Eingabe bzw. durch das Löschen von Weichen und Kreuzungen werden auch die

Teilfahrstraßenknoten neu abgegrenzt, wodurch eventuell eine neue TFK-Nummerierung (siehe Abschnitt 10.2.3) zustande kommt und ein Variantenvergleich bei der Kapazitätsermittlung erschwert wird. Bedeutende Infrastrukturänderungen, wie z.B. das Löschen von kompletten Betriebsstellen oder Fahrwegen, führen dazu, dass die Laufwege der Modellzüge teilweise nicht mehr gültig sein können. In diesem Fall muss man die Zuglaufwege manuell überarbeiten.

10.2.2 Definition der Modellzüge

In ANKE sind alle im Kapitel 6 formulierten Regeln zur Erfassung von Modellzügen konsequent umgesetzt worden.

Die erste Gruppe der Eigenschaften eines Modellzuges, seine physikalische Charakteristik (vgl. Abschnitt 6.2), wird in einem interaktiven Dialog eingegeben, der in Abbildung 10-3 dargestellt ist.

Modellzugcharakteristik

Identifikation

Modellzugnummer: 8001
 Gattung: RB
 Anzahl der Modellzüge: 65
 Kommentar: Regional
 Zugfamilie:

Triebfahrzeugbaureihe

1.: 141-101 Reisezug Wirkt auch
 2.:
 3.:
 4.:

Zugklasse

FRz S FGz Gz
 NRz Rz NGz Lz

LZB, Geschwindigkeit

LZB-fähig **Band:** 0: normal
 1: NeiTec aktiv
 anderes:

max. V Wagenzug:
 max. V Zug [km/h]: 120

Verpätungsniveau

Standard **Verkehrszeiten**

pVe: 0.30 tVm: 8.0

Rangziffern

Plan: 16 Betrieb: 16

Länge, Masse

Anzahl der Wagen: 5
 Gesamtlänge [m]: 147.7
 Wagenzug [m]: 132.0
 Masse [t] (Wagenzug): 200

Bremstellung

R BzH: 150
 P G R+Mg

OK Abbruch Hilfe

Abbildung 10-3: Eingabe der Modellzugcharakteristik

Die Fahrtenanzahl, die der Modellzug repräsentiert, wird indirekt durch seine Verkehrszeiten bestimmt. Die Verkehrszeiten können einzeln, im Takt oder zufällig in einem Zeitabschnitt verteilt eingegeben werden. Diese Angaben beeinflussen die Rechnungsergebnisse jedoch nur dann, wenn die Zugfolgefälle nach dem fahrplanabhängigen oder dem Stundenganglinienverfahren ermittelt werden, oder wenn der Variationskoeffizient der Ankunftsabstände VtA aus den tatsächlichen Ankunftszeiten

in den TFK zu errechnen ist. Sonst spielt nur die Fahrtenanzahl für die Kapazitätsberechnung eine Rolle, wobei die Verteilung der Ankünfte im Untersuchungszeitraum als absolut zufällig angenommen wird.

Bei der Definition des Laufweges wird zunächst, ebenfalls interaktiv, die Reihenfolge von Betriebsstellen mit planmäßigen Mindesthaltezeiten festgelegt. Als Start- und Zielpunkt eines Laufweges können dabei entweder bestimmte Haltepositionen oder Einbruch- bzw. Ausbruchstellen am Rande des Untersuchungsbereichs dienen. Das Programm nimmt anhand der angegebenen Betriebsstellenreihenfolge einen sogenannten Standardlaufweg, der aus den Fahrwegen der höchsten Hierarchiestufen besteht, automatisch auf. Danach können auch andere Fahrwege in den einzelnen Betriebsstellen ausgewählt werden, so dass ein Zug praktisch jeden beliebigen zulässigen Fahrtverlauf nehmen kann.

Wenn ein RUT-0-Fahrplan vorliegt, der auf Durchführbarkeit und Stabilität untersucht werden soll, dann erübrigt sich die zeitaufwendige Eingabe von Modellfahrten. In solchen Fällen lohnt sich die im Abschnitt 6.4 konzipierte automatische Erstellung von Modellzügen aus den Gruppen von identischen oder ähnlichen Zügen des Fahrplans. Die Fahrplanübernahme wird durch das Öffnen eines RUT-0-Konstruktionsprojektes durchgeführt. Alle erforderliche Parameter sind dabei in einem Dialog einzugeben, der in Abbildung 10-4 dargestellt ist.



Abbildung 10-4: Vorgaben für einen Fahrplanimport

Der Laufwegdefinition sowie nach jeder Änderung des Modellzuges folgt eine automatische Berechnung der Regelfahrzeit nach dem im Abschnitt 6.3 aufgeführten numerischen Delta-V-Schritt-Verfahren. Eventuelle Fehler der Fahrzeitrechnung, z.B. Komplikationen wegen fehlenden Bremschwertstellen oder unzureichender Zugkraft, werden dabei übermittelt, damit der Programm benutzer sie beheben kann.

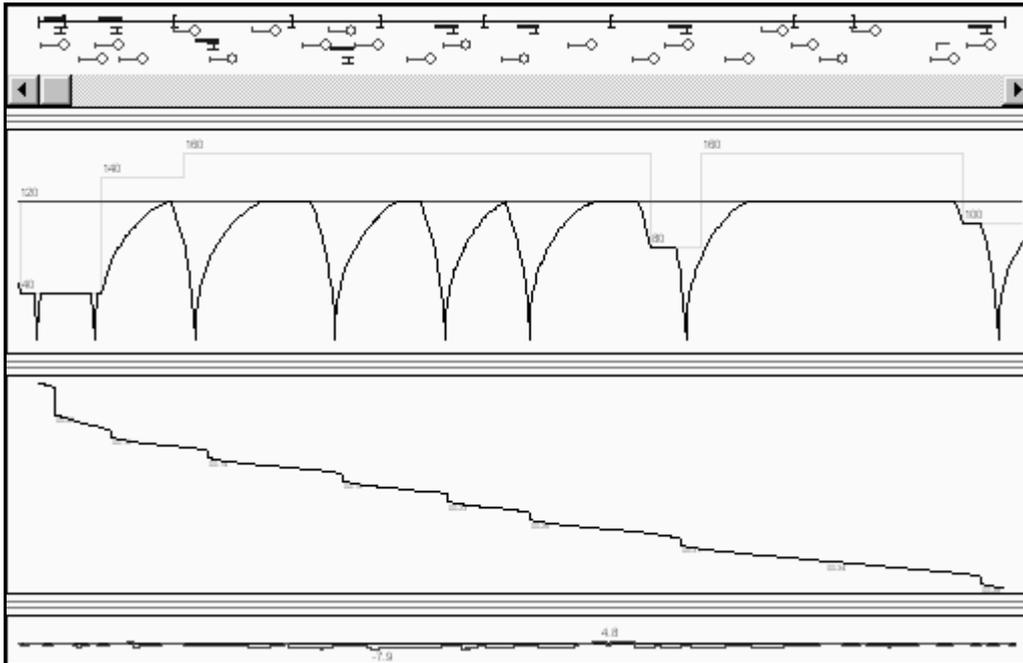


Abbildung 10-5: Grafische Darstellung der Geschwindigkeitskurve, der Zeit-Weg-Linie und der Streckenneigungen

Sobald die Modellzugdefinition abgeschlossen ist, sind alle Fahrzeiten exakt berechnet (Abbildung 10-5). Für die Netzkapazitätsermittlung fehlen noch die wichtigste Eingangsparameter – Mindestzugfolgezeiten. Außerdem sollte die Plausibilität aller Eingangsdaten kontrolliert werden.

10.2.3 Datenanpassung

ANKE ermittelt zusammen mit den Fahrzeiten auch alle Sperrezeiten (Belegungen), die, in Sperrzeitentreppen zusammengefasst, für die Mindestzugfolgezeitenrechnung bestimmend sind. Zuvor müssen aber die Überholungsabschnitte abgegrenzt werden, in denen dann die Teile der Sperrzeitentreppen bis zur Berührung aneinander geschoben werden, so dass sich am Anfang des jeweiligen Abschnitts eine Mindestzugfolgezeit ergibt. Dies geschieht nach den im Abschnitt 7.4 formulierten Regeln. Der Laufweg jedes Modellzuges wird in bezug auf Überholungsmöglichkeiten untersucht, wobei folgenden Faktoren berücksichtigt werden:

- alternative Fahrtrmöglichkeiten in potenziellen Überholungsbahnhöfen
- Varianten der Überholung durch Züge verschiedener Zugklassen
- Verfügbarkeit der Haltepositionen für Überholungen

Das Resultat dieser algorithmischen Analyse sind Überholungsabschnitte, d.h. die Abschnitte der Sperrzeitentreppen, welche in der Regel durch zwei Weichenbelegungen begrenzt sind. Die erste Weiche ist dabei die Vereinigungsweiche des

vorgegebenen und des gefundenen alternativen Fahrweges im Bahnhof am Anfang des Überholungsabschnittes. Die zweite Weiche ist die Trennungsweiche der entsprechenden Fahrwege im Bahnhof am Ende des Überholungsabschnittes. An den Grenzen des Untersuchungsbereichs (am Einbruch- und am Ausbruchspunkt) wird anstelle der Weichenbelegungen die erste bzw. die letzte Sperrzeit des jeweiligen Zuges vermerkt.

Da sich die Mindestzugfolgezeiten stets auf bestimmte Teilfahrstraßenknoten beziehen (je nachdem in welchen Überholungsabschnitten die TFK liegen), müssen die TFK zu Beginn der Mindestzugfolgezeitenrechnung zur Verfügung stehen. Deswegen werden die TFK bereits beim Erstellen des jeweiligen ANKE-Projektes, wenn auf die Spurplan-Infrastrukturdaten zum ersten Mal zugegriffen wird, vollautomatisch abgegrenzt. Die Einzelheiten des dabei verwendeten infrastrukturbezogenen Abgrenzungsalgorithmus sind im Abschnitt 5.1.3 eingehend beschrieben. Viele technische Details der Realisierung dieses Verfahrens wie Wegsuche im Infrastrukturgraphen, Sammeln von bestimmten Knoten oder Erkennung von Trapezstrukturen, sind zwar sehr umfassend, aber für die Eisenbahnbetriebswissenschaft eher irrelevant. Deshalb wird hier auf Erläuterung jeglicher programmtechnischer Zusammenhänge verzichtet.

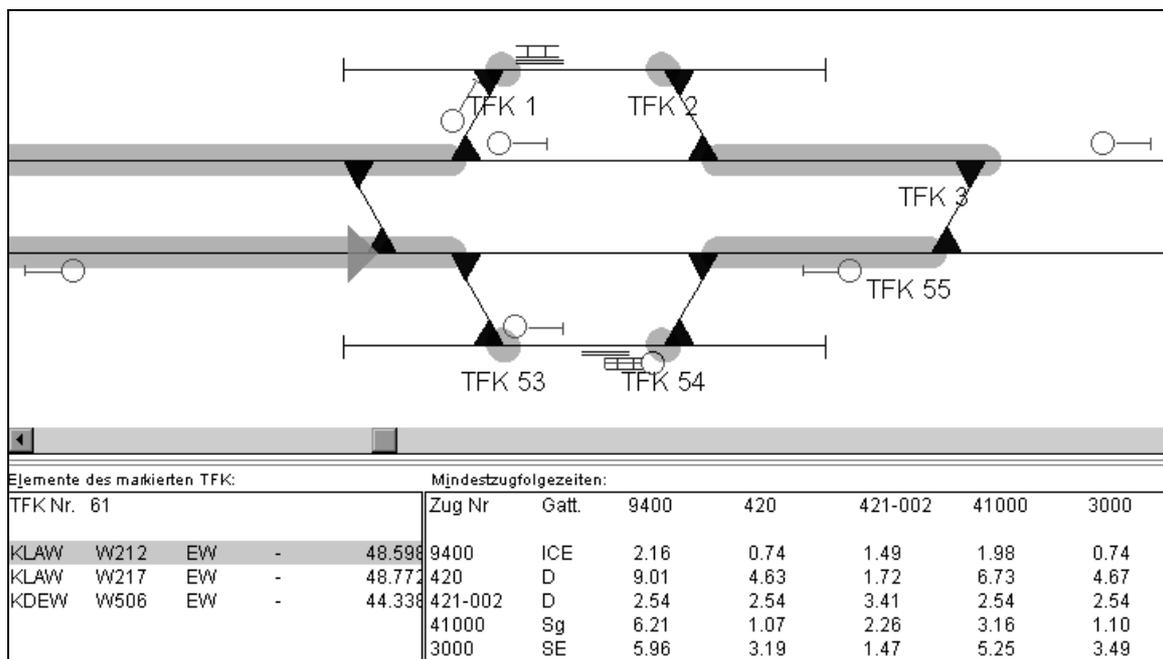


Abbildung 10-6: Darstellung von TFK

Für den Anwender des Programms sind die Teilfahrstraßenknoten Strukturen, die Weichen und Kreuzungen beinhalten (ein TFK besteht aus mindestens einer Weiche oder Kreuzung) und die auf dem Infrastrukturbild angezeigt werden können. Abbildung 10-6 zeigt die TFK, wie sie in ANKE zusammen mit den zugehörigen Weichenelementen und Mindestzugfolgezeiten dargestellt werden. In einer TFK-eigenen $N \times N$ Matrix mit Mindestzugfolgezeiten sind die Werte enthalten, die durch

das Aneinanderschieben von Sperrzeitentreppeanteilen im Überholungsabschnitt (in dem der betrachtete TFK liegt) ermittelt werden. Kapitel 7 beschäftigt sich ausführlich mit den Mindestzugfolgezeiten.

Nach der Ermittlung der Mindestzugfolgezeiten sind alle Voraussetzungen geschaffen, um die Leistungs- und Qualitätskenngrößen von TFK zu berechnen. Zuvor empfiehlt es sich jedoch, einige einfache Maßnahmen zur Plausibilitätskontrolle der Daten durchzuführen. Neben der Kontrolle von Zugcharakteristika, Laufwegen und Fahrzeiten kann in ANKE die Fehlerfreiheit von Sperrzeiten und Mindestzugfolgezeiten anhand der grafischen Anzeige (Abbildung 10-7) überprüft werden, wobei besonders große Mindestzugfolgezeiten bereits bei der oberflächlichen Analyse der TFK-Matrizen auffallen (vgl. Abbildung 10-6). Den Ursprung der Mindestzugfolgezeiten kann man relativ leicht anhand der grafischen Darstellung entsprechender Zugfolgefälle nachvollziehen.

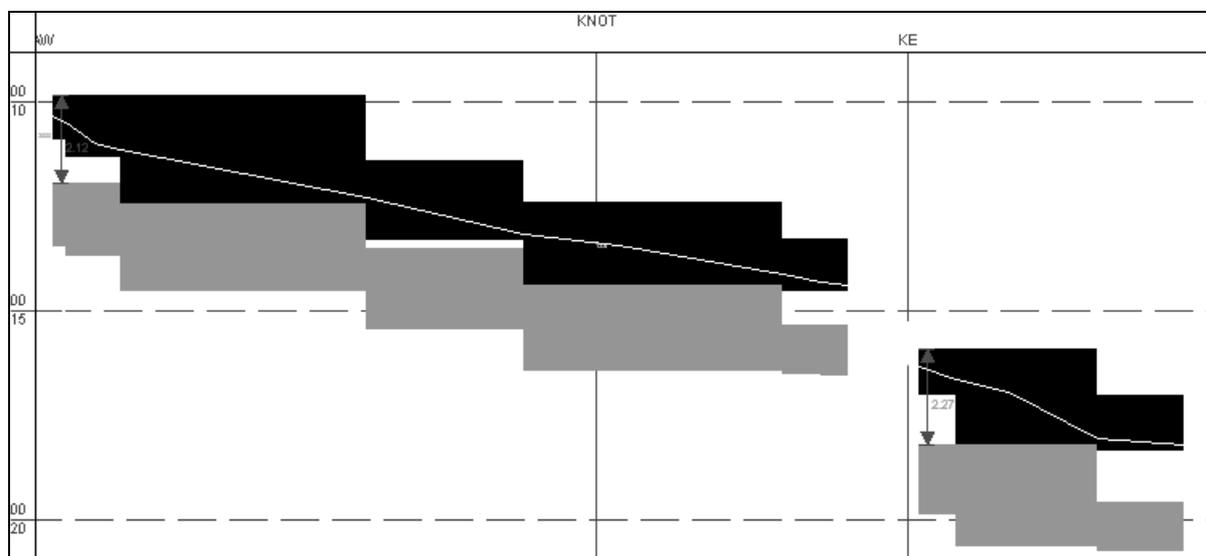


Abbildung 10-7: Anzeige von Sperr- und Mindestzugfolgezeiten

Mögliche Fehlerquellen können eventuell durch die Unvollständigkeit der Infrastruktur entstehen. Bei zu langen Blockabschnitten sind z.B. dazugehörige Sperrzeiten überdimensional groß und beeinflussen dadurch die Ausdehnung von Mindestzugfolgezeiten. Ebenso leicht erkennbar sind auch andere Infrastrukturmängel, wie fehlende Zugschlussstellen, falsch eingegebene Durchrutschwege, unvollständige Geschwindigkeitsvorgaben usw.

Gleichzeitig sind in der Grafik (Abbildung 10-7) die abgegrenzten Überholungsabschnitte zu erkennen. Diese können aus verschiedenen Gründen ebenfalls zu lang sein und dadurch auch übertrieben große Mindestzugfolgezeiten verursachen. Die Bahnhöfe, die vom Programm als ungeeignet für eine Überholung erkannt wurden, aber vom Bearbeiter dennoch als Überholungsbahnhöfe eingestuft werden, können dann genauer untersucht werden. Es kann vorkommen, dass dort fälschlicherweise keine parallelen Fahrwege für Überholungen definiert worden oder Halteplätze für

bestimmte Zugklassen nicht vorhanden sind, wodurch diese Bahnhöfe als Kandidaten für Überholungen vom Programm abgelehnt werden. In selteneren Fällen möchte man umgekehrt die Überholungsabschnitte verlängern, wenn bekannt ist, dass auf bestimmten Gleisen nicht überholt wird. So kann z.B. das erzwungene Halten von Schnellgüterzügen an jedem kleinen Bahnhof vermieden werden. Hierbei können also Manipulationen mit Fahrwegen zur Verbesserung der Struktur von Überholungsabschnitten ebenfalls helfen.

Nach jeder Veränderung an der Infrastruktur, die extern im Programm SPURPLAN vorgenommen wird, werden in ANKE die TFK neu abgegrenzt, alle Fahrzeiten berechnet, die Überholungsabschnitte erneuert und die Mindestzugfolgezeiten automatisch neu ermittelt. Betreffen die Änderungen nur Fahrwegdaten, bleibt die alte TFK-Struktur bestehen, da keine Weichenelemente oder Gleisverbindungen modifiziert worden sind. Einer internen Anpassung von Modellzugdaten in ANKE muss immer eine komplette Mindestzugfolgezeitenrechnung folgen.

10.2.4 Auswertung der Ergebnisse

Nachdem die Daten überprüft und angepasst sind, kann nun die Kapazitätsermittlung gestartet werden. Sie dauert in der Regel auch für größere Projekte nur einige Sekunden. Der größte Rechenaufwand wird für die Ermittlung von Überholungsabschnitten und Mindestzugfolgezeiten benötigt. Danach stehen alle Eingangsdaten geordnet und teilweise abgearbeitet zur Verfügung, und die Abwicklung der im Kapitel 4 beschriebenen Algorithmen läuft schnell ab.

Für jeden TFK werden in ANKE folgende im Abschnitt 2.2 aufgeführte Kenngrößen berechnet:

- Anzahl der Modellzüge, die im TFK verkehren
- Gesamtanzahl der Fahrten, die in diesen Modellzügen enthalten sind
- Belegungsgrad
- Variationskoeffizient der Ankunftsabstände
- Kenngrößen, die sowohl für die Fahrplanerstellung als auch für den Zustand der Betriebsabwicklung ermittelt werden. Dies sind:
 - zulässige mittlere Warteschlangenlänge
 - berechnete mittlere Warteschlangenlänge
 - Wartezeitensumme
 - Qualitätsfaktor
 - Hochrechnungsfaktor

Die ersten zwei Kenngrößen sind trivial und können relativ einfach kalkuliert bzw. ausgezählt werden. Der **Belegungsgrad** ρ muss für TFK zwischen 0 und 1 liegen. Falls er dennoch größer als eins wird, bedeutet dies, dass das vorgegebene Betriebsprogramm nicht durchführbar ist, bzw. dass die Warteschlangenlänge unendlich groß sein wird. In solchen Fällen ist es zum einen nicht sinnvoll, die Berechnungen weiterzuführen, weil die betroffenen TFK eindeutig überlastet sind. Zum anderen würden die verwendeten analytischen Modelle an solch hohen Werte von ρ einfach scheitern. Deswegen wird der TFK mit $\rho > 1$ lediglich als überlastet bezeichnet, genauere Angaben zu den Ausnutzungsgraden einzelner Qualitätskenngrößen sind überflüssig und werden deshalb nicht gemacht.

Die nächste Kenngröße, der **Variationskoeffizient der Ankunftsabstände** VtA , kann entweder mit Hilfe der geschätzten Ankunftszeiten in den TFK jeweils direkt berechnet, oder einmal für alle TFK vorgegeben werden. Während in der ersten Variante versucht wird, den Ankunftsstrom unmittelbar zu analysieren, setzt die zweite, genauso wie das Programm ALFA, einen abstrakten Forderungenstrom voraus. Eine direkte Ermittlung von VtA empfiehlt sich vor allem für TFK, die als Bedienungssysteme nur einen Eingang besitzen, z.B. für Bereiche mit Einrichtungsbetrieb. Bei mehreren Eingängen gibt es keinen eindeutigen topologischen Bezugspunkt für den Anfang des TFK, an dem die Ankunftszeiten registriert werden könnten. In diesem Fall sollte man von einem abstrakten Forderungenstrom ausgehen. Ausführlicher ist der Ankunftsprozess im Abschnitt 5.2 analysiert. Außerdem werden in Anlage C u.a. beide Varianten der Ermittlung von VtA anhand eines Beispiels verglichen.

Die **zulässige mittlere Warteschlangenlänge** wird in ANKE mit dem empirischen Verfahren aus Abschnitt 9.1 berechnet. Je nachdem können dabei entweder die Formeln (9-1) und (9-3) oder (9-4) und (9-5) verwendet werden (Die Formeln (9-1) und (9-4) liefern zulässige Warteschlangenlänge für den Fahrplan, (9-3) und (9-5) für den Betrieb).

Tatsächliche **mittlere Warteschlangenlänge** im Fahrplan ergibt sich für $VtA \leq 1$ aus dem Näherungsansatz von WAKOB (Abschnitt 4.2.1) und für $VtA > 1$ aus der GI/GI/1-Lösung von HERTEL (Abschnitt 4.2.2). Die mittlere Warteschlangenlänge im Betrieb als durchschnittliche Anzahl der Züge, die Folgeverspätungen erleiden, liefert die zuggattungsscharfe Formel von SCHWANHÄUßER (Abschnitt 4.1.2).

Die jeweilige **Wartezeitensumme** (in Minuten) wird durch eine Multiplikation der entsprechenden mittleren Warteschlangenlänge mit der Größe des Untersuchungszeitraums berechnet.

Der **Qualitätsfaktor** ist der Quotient aus der tatsächlichen und der zulässigen Warteschlangenlänge (vgl. Abschnitt 2.2.2).

Der **Hochrechnungsfaktor** (Abschnitt 2.2.1) wird je nach Ansatz durch eine iterative Erhöhung bzw. Reduktion der Zugzahl ermittelt, oder unmittelbar aus den Formeln abgeleitet.

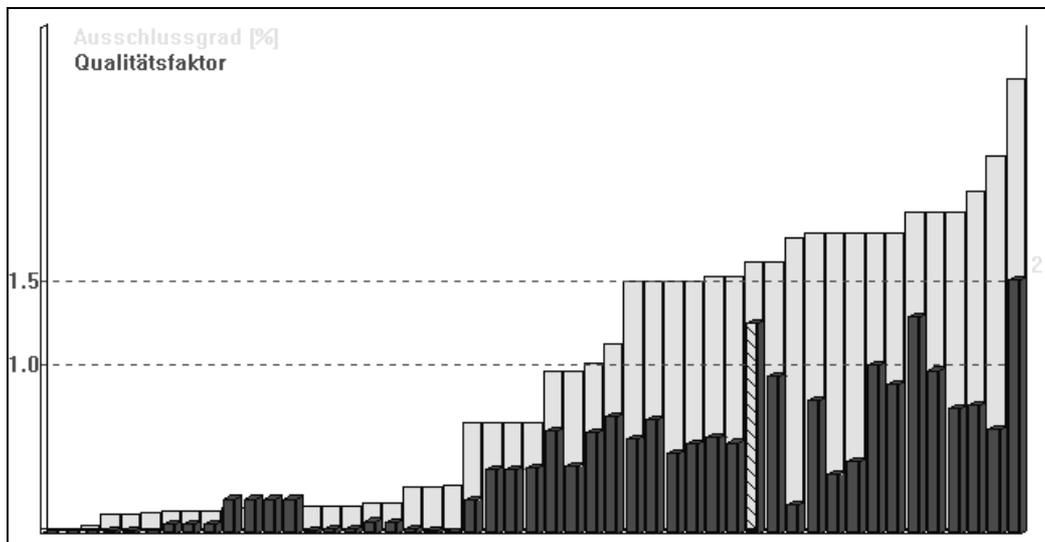


Abbildung 10-8: Diagramm mit Rechnungsergebnissen

Für eine bessere Übersicht können die wichtigsten Kenngrößen in einem Diagramm dargestellt werden. Abbildung 10-8 zeigt dieses für den Qualitätsfaktor des Fahrplans. Jede Säule im Diagramm entspricht hier einem TFK. Die TFK sind nach den Zugzahlen in aufsteigender Reihenfolge angeordnet.

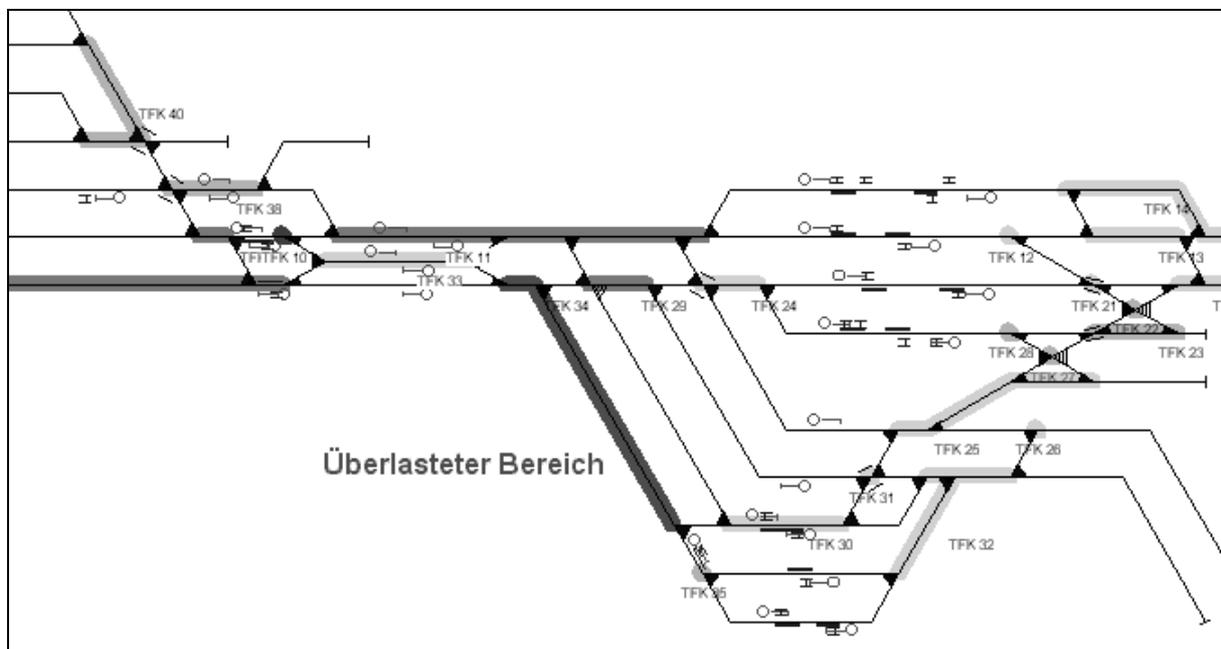


Abbildung 10-9: Grafische Anzeige der Auslastung von TFK

Im dargestellten Beispiel ist erkennbar, wie hoch der gesamte Untersuchungsbereich und seine Elemente belastet sind und wie viele Engpässe es gibt. Diese werden nach der Kapazitätsrechnung auch in der grafischen Darstellung von Teilfahrstra-

ßenknoten sichtbar (Abbildung 10-9). Durch unterschiedliche Farben, die vom Qualitätsfaktor abhängig sind, ist erkennbar, welche Infrastrukturbereiche überlastet, welche optimal ausgelastet und in welchen noch größere Qualitätsreserven vorhanden sind.

Die in TFK entstandenen Wartezeiten können auch detaillierter als Teilsummen dargestellt werden: In allen in ANKE verwendeten analytischen Ansätzen ist möglich, die berechneten Wartezeiten auf einzelne Modellzüge zu verteilen. So kann man die Engpassursachen besser nachvollziehen, weil es leichter feststellbar ist, welche Fahrten an welchen Stellen Zeitverzögerungen hinnehmen müssen und wie hoch die Wartezeiten im einzelnen sind. Diese dürfen nicht direkt im Teilfahrstraßenknoten (d.h. auf der Strecke), sondern spätestens am nächsten zurückliegenden Überholungsbahnhof abgewartet werden. Dafür ist im Programm eine Zuweisung von Wartezeiten zu den entsprechenden Haltepositionen vorgesehen. Ein hierfür entwickeltes Verfahren wird im nächsten Abschnitt im Zusammenhang mit einer ausführlichen Betrachtung von Wartezeiten vorgestellt.

Somit sind alle Phasen einer analytischen Netzuntersuchung mit ANKE zwar abgeschlossen, aber es sind noch einige Steuerungsmöglichkeiten und Optionen vorhanden, die die Funktionalität des Programms und daher dessen Aussagekraft und Einsatzmöglichkeiten erweitern. Diese Steuerungsmöglichkeiten werden im Abschnitt 10.4 eingehend beschrieben.

10.3 Ursprung und Aufteilung von Wartezeiten

Die Wartezeiten werden normalerweise je nach Entstehungsort und -grund, zwei verschiedenen Gruppen zugeteilt:

1. den Wartezeiten aus Einfädeln und Kreuzen und
2. den Wartezeiten aus Überholungen

Die gängigen analytischen Modelle erfassen zwar die meisten Wartezeiten, können aber nicht immer eindeutig feststellen, zu welcher dieser Gruppen eine bestimmte ermittelte Wartezeit gehört.

WAKOB versucht in [63], die summierten Wartezeiten voneinander abzutrennen, indem er nach der Wartezeitenrechnung alle Modellzüge jedes TFK paarweise vergleicht. Falls beide Züge im Paar gleiche „Fahrwegindizes“ haben, gilt die Wartezeit aus diesem Zugfolgefall als Wartezeit aus Überholung. Sonst wird angenommen, dass sich die Züge erst im TFK treffen, wodurch die Wartezeit aus Einfädeln oder Kreuzen entsteht. Prinzipiell ist diese Auslegung korrekt, wenn anstelle der Fahrwegindizes die Laufwege im gesamten betrachteten Überholungsabschnitt verglichen werden. Nur so kann entschieden werden, ob sich die beiden Züge schon im Bahnhofsbereich oder erst auf der Strecke behindern.

Eine Vorgehensweise, die sich von den bedienungstheoretischen Modellen unterscheidet, stellt das im Abschnitt 7.4.1 erwähnte Verfahren zur Ermittlung der Wartezeiten infolge stehender Überholungen von GAST [17] dar. Sein Ansatz verspricht präzise statistische Aussagen und trennt sogar die Wartezeiten aus Überholungen von den Wartezeiten aus Wiedereinfädelungen. Das Verfahren kann jedoch Kreuzungen und Einfädelungen ohne Halt in den Untersuchungsbereich nicht berücksichtigen.

10.3.1 Aufteilung von Wartezeiten in ANKE

Auf eine zusätzliche Implementierung des Verfahrens von GAST, nur um die Wartezeiten aus Überholungen von den übrigen unterscheiden zu können, wurde in ANKE verzichtet. Auch die von WAKOB vorgeschlagene Untersuchung von Laufwegen erscheint im Hinblick auf das ohnehin komplizierte Konzept der Überholungsabschnitte (siehe Abschnitt 7.4) kaum realisierbar.

Im Grunde ist jedoch bei den Kapazitätsberechnungen in Bahnanlagen nicht die Frage von besonderem Interesse, welche Arten von Wartezeiten entstanden sind, sondern wie hoch die Wartezeiten sind und wo sie abgewartet werden müssen. In ANKE werden die für TFK ermittelten Wartezeiten folgendermaßen auf die Wartepositionen verteilt:

1. Es werden alle Überholungsabschnitte sämtlicher Modellzüge untersucht
2. In einem Überholungsabschnitt eines Zuges werden alle TFK gesammelt
3. Es wird überprüft, in welchem TFK die größte Wartezeit für den betrachteten Zug entstanden ist
4. Diese Zeit ist vor dem aktuellen Überholungsabschnitt abzuwarten, sie kann einer geeigneten Warteposition zugeschrieben werden
5. Bricht der Zug in den Untersuchungsbereich ein, so dass am Anfang seines Laufweges keine Überholung möglich ist, muss die Wartezeit aus seinem ersten Überholungsabschnitt außerhalb des Untersuchungsbereiches abgewartet werden.

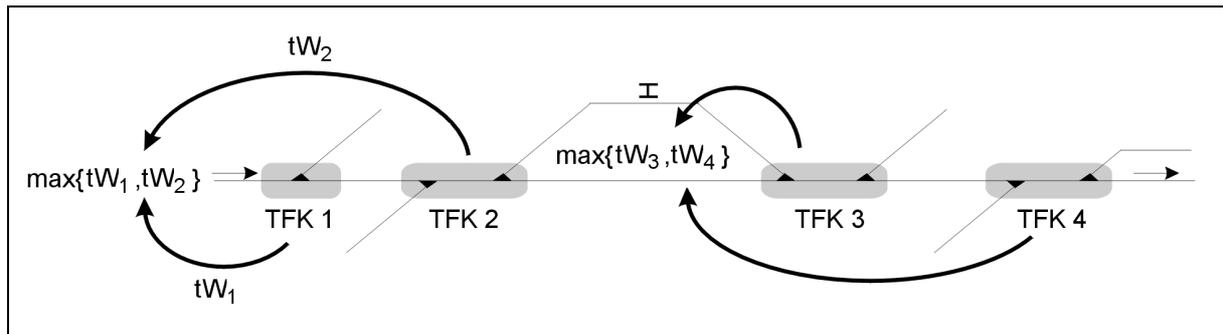


Abbildung 10-10: Zuteilung von Wartezeiten zu Wartepositionen

Abbildung 10-10 veranschaulicht die beschriebene Vorgehensweise an einem Beispiel, in dem der Laufweg eines Modellzuges in zwei Überholungsabschnitte unterteilt wird. Jeder Überholungsabschnitt enthält jeweils zwei TFK. Die größte Wartezeit im ersten Abschnitt, die aus dem TFK 1 und dem TFK 2 stammt, wird dem Anfang des Untersuchungsgebietes zugeteilt. Die maximal mögliche Wartezeit aus dem zweiten Überholungsabschnitt wird im Überholungsbahnhof abgewartet.

10.3.2 Doppelte Warteschlangen

Das im letzten Abschnitt vorgestellte Beispiel bekräftigt u.a. die Vermutung, dass an die TFK mit Zweirichtungsbetrieb bisher zu hohe Leistungsanforderungen gestellt wurden. In solchen Fällen werden die in einem TFK entstehenden Wartezeiten den Wartepositionen in zwei Richtungen, und nicht einer Richtung zugeteilt (Mehr als zwei Eingangsrichtungen kann ein TFK nicht aufweisen, dies wird auch durch die Schichten-Darstellung von TFK im Abschnitt 5.1.3 bestätigt). Es entstehen mit anderen Worten zwei unterschiedliche Warteschlangen vor dem Bedienungssystem TFK, wobei sich der vorgegebene zulässige Wert für die Warteschlangenlänge nur auf eine Warteschlange bezieht. Wahrscheinlich führt dieser Effekt zu einer Unterschätzung der Kapazität von eingleisigen Strecken, so dass eine zusätzliche Anpassung der im Kapitel 9 beschriebenen Qualitätsmaßstäbe erforderlich wäre. Auf jeden Fall ist noch unklar, in welchem Verhältnis und nach welchen Regeln sich die Gesamtwarteschlange in zwei kleinere Warteschlangen teilt. Es besteht also weiterer Forschungsbedarf, bevor die neue Erkenntnis über doppelte Warteschlangen in ANKE und anderen analytischen Werkzeugen aufgenommen werden kann.

10.4 Steuerungsmöglichkeiten und Optionen

Für die Verfeinerung der Ergebnisse einer Kapazitätsrechnung und für einen Variantenvergleich sind in ANKE zahlreiche Einstellungsmöglichkeiten vorgesehen. Sie erlauben, die Flexibilität der analytischen Modelle möglichst effizient und vollständig auszunutzen.

Einige der Optionen sind hier schon genannt worden (u.a. die Steuerung des VtA und der zulässigen Warteschlangenlänge). Die weiteren sind:

- Berechnung und Auswahl eines maßgebenden Tagesabschnittes anhand der Tagesganglinie
- Vorgaben für die Mindestzugfolgezeitenrechnung
- Bestimmung des Dispositionsfaktors
- Angaben zur Ermittlung der Zugfolgefälle

10.4.1 Maßgebender Tagesabschnitt

Erfahrungsgemäß wird der Betrachtungszeitraum bei analytischen Leistungsuntersuchungen von Bahnanlagen auf maximal 24 Stunden beschränkt. Von der Gleichartigkeit aller Züge im Laufe eines ganzen Tages kann man aber sehr selten ausgehen. Die Homogenität des Forderungenstromes ist jedoch eine der wichtigsten Annahmen der Bedienungstheorie. Um diese Voraussetzung besser zu erfüllen, wird der Tag in kleinere Zeitabschnitte mit möglichst stationären Verkehrsströmen unterteilt, für die die Netzkapazität explizit zu berechnen ist. Ein weiteres Argument für eine engere Begrenzung des Betrachtungszeitraums ist die Notwendigkeit, die Auslastung von Anlagen auch für Spitzenstunden zu ermitteln, für die dann jedoch geringere Qualitätsvorgaben anzusetzen sind.

im Eisenbahnbetrieb, insbesondere auf den Strecken mit ausgeprägtem Mischverkehr, ist eine Unterscheidung von zwei maßgebenden Tagesabschnitten (Tag und Nacht) zweckmäßig. Bekanntlich verkehren nachts überwiegend langsame Güterzüge, und der Tag bleibt dem schnelleren Personenverkehr vorbehalten. Die Grenzen dieser Tagesphasen lassen sich jedoch nicht pauschal für alle möglichen Bahnanlagen bestimmen. Vielmehr sind sie in der Regel auch für einzelne TFK des zu untersuchenden Teilnetzes unterschiedlich, und zwar aus folgenden Gründen:

- Die Struktur der Zugströme kann in TFK sehr variabel sein, z.B. auf S-Bahn-Gleisen findet nur S-Bahn-Verkehr statt, während in Rangierbahnhöfen keine Reisezüge verkehren
- Die Züge sind wegen der Ausdehnung des Untersuchungsbereichs oft mehrere Stunden unterwegs, so dass sie die einzelnen TFK zu unterschiedlichen Zeiten erreichen

Als Kriterium für die Beurteilung der Gleichartigkeit zwischen einzelnen Forderungen (Zügen) wird in [8] die Rangziffer vorgeschlagen. Wenn man also davon ausgeht, dass gleichrangige Züge auch annähernd gleiche fahrdynamische Eigenschaften besitzen und somit homogene Ankunftsströme bilden, lassen sich die Anforderungen

für die Aufteilung des gesamten Tages in zwei maßgebende Zeitabschnitte wie folgt formulieren:

1. Die Differenz zwischen den mittleren Rangziffern beider Tagesabschnitte muss ein Maximum über alle möglichen Kombinationen von Tagesabschnitten ergeben
2. Die Varianz der Stundenrangziffern innerhalb jedes der beiden Abschnitte muss so gering sein, dass die Homogenität des Ankunftsstromes statistisch nachgewiesen werden kann

Die erste Anforderung kann mit Hilfe eines Algorithmus erfüllt werden, der ebenfalls in [8] enthalten ist. Das Verfahren vergleicht tatsächlich alle möglichen Kombinationen zweier geschlossener Tagesabschnitte, berechnet jedes Mal die mittleren Rangziffern und akzeptiert am Ende diejenige Kombination, die den größten Rangziffernunterschied aufweist. Die Dauer eines Abschnittes wird, damit er repräsentativ ist, auf minimal fünf Stunden begrenzt, weswegen insgesamt $24 \times (24 - 5) = 456$ Kombinationen untersucht werden müssen.

Für die Überprüfung der zweiten Anforderung muss die Stichprobe, die aus den mittleren Rangziffern der Stunden besteht, einem statistischen Test, z.B. dem Student-Test, unterzogen werden, der die Homogenität der Stichprobe mit einer bestimmten statistischen Sicherheit nachweisen kann.

In ANKE werden die Kenngrößen aller TFK zunächst für den gesamten Tag ermittelt. Anschließend können bestimmte TFK, deren Auslastung für den betrachteten Teil des Netzes besonders bedeutend ist, genauer untersucht werden. Zu diesem Zweck wird für jeden ausgewählten Teilfahrstraßenknoten eine Tagesganglinie erstellt (siehe Abbildung 10-11).

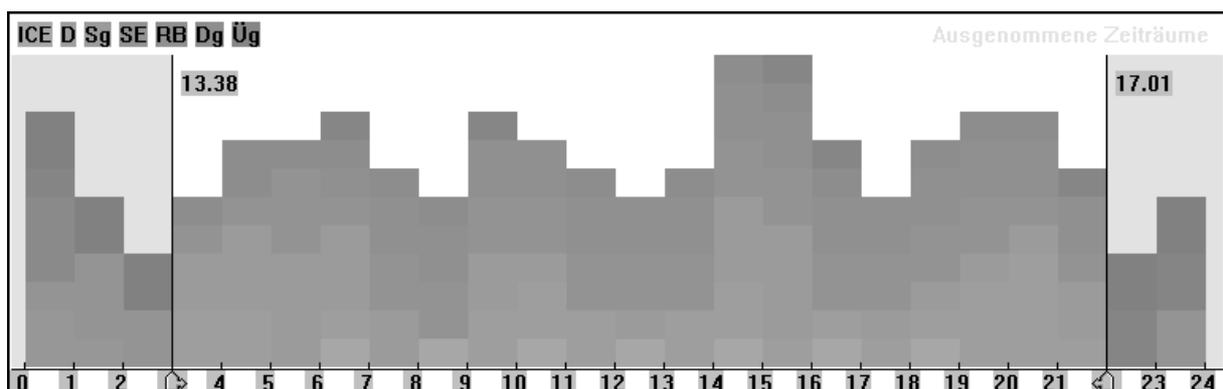


Abbildung 10-11: Tagesganglinie eines TFK mit maßgebenden Tagesabschnitten

Darin sind beide maßgebenden Tagesabschnitte, welche nach den beschriebenen Regeln ermittelt werden, angedeutet und entsprechende mittlere Rangziffern angezeigt. Die Kapazitätsrechnung kann nun für diese Abschnitte, wie auch für jeden anderen beliebigen Zeitabschnitt, wiederholt werden.

10.4.2 Modifikation der Mindestzugfolgezeiten

Die Optionen für die Mindestzugfolgezeitenrechnung stehen in ANKE vor allem aus Kompatibilitätsgründen zu SLS zur Verfügung. Die wichtigsten charakteristischen Unterschiede zwischen den Algorithmen, die beide EDV-Systeme für die Mindestzugfolgezeitenermittlung verwenden, sind im wesentlichen im Kapitel 7 diskutiert worden. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse sollen grundsätzlich als Standardeinstellungen bei Kapazitätsberechnungen angewandt werden. Da ANKE zudem als Nachfolger von ALFA bei der DB AG eingesetzt werden soll, muss das Programm unter gleichen Voraussetzungen die gleichen Ergebnisse wie ALFA liefern können.

Demnach gelten für die Mindestzugfolgezeiten in ANKE folgende Optionen, wobei die jeweils zweite (mit „oder“ verknüpft) der Vorgehensweise von ALFA entspricht:

- Die Mindestzugfolgezeiten können aus den Überholungsabschnitten oder maßgebend aus dem kompletten Zuglauf ermittelt werden (Abschnitt 7.6.1)
- Die Überholungsabschnitte sind begrenzt durch die Vereinigungs- und die Trennungsweiche der für eine Überholung in Frage kommenden Fahrwege oder verlaufen von einer Haltebelegung bis zur anderen (Abschnitt 7.4.1)
- Bei der Abgrenzung von Überholungsabschnitten sind ranggleiche oder -niedrigere Überholungen zugelassen oder verboten (Abschnitt 7.4.1)

Einige Auswirkungen dieser Optionen werden in den Beispielsrechnungen in den Anlagen B und C vorgestellt.

10.4.3 Bestimmung des Dispositionsfaktors

Die im Abschnitt 4.1 eingeführte Dispositionsbelegungszeit setzt für jeden Zugfolgefall entweder Gleichrang oder vollen Vorrang voraus, auch wenn die tatsächlichen Prioritätsunterschiede nur geringfügig sind. Für eine praxisnahe Betrachtung des Betriebsgeschehens ist es zweckmäßig, die Vorrangregelung durch einen Dispositionsfaktor c_d [%] auszudrücken, wobei $-100\% < c_d < +100\%$ ist. Dies bedeutet, dass

- bei vollem Vorrang des ersten Zuges im Zugfolgefall $c_d = -100$ gilt
- bei vollem Nachrang $c_d = +100$
- und beim Gleichrang $c_d = 0$

Die Annahme von Zwischenwerten kann die Wartezeitvorschriften [10], die gelegentlich erlauben, auch den höherrangigen Zügen Wartezeiten zuzumuten, einigermaßen erfüllen.

Die Dispositionsbelegungszeit tD_{ij} , um die der vorrangige Zug verspätet sein darf, wird dementsprechend durch den Dispositionsfaktor als Anteil der Mindestzugfolgezeit festgelegt:

$$tD_{ij} = \begin{cases} tZ_{ij} \cdot \frac{c_d}{100} & \text{für } -100 < c_d < 0 \\ tZ_{ji} \cdot \frac{c_d}{100} & \text{für } 0 < c_d < +100 \end{cases} \quad (10-1)$$

Der Dispositionsfaktor c_d wird in ANKE in Abhängigkeit vom Rangunterschied und von einem vorgegebenen Dispositionsquotient m_f wie folgt berechnet:

$$c_d = 100 \cdot \frac{\text{Rang}_i - \text{Rang}_j}{m_f}, \quad |c_d| \leq 100 \quad (10-2)$$

Bei $m_f = 4,0$ würde in einem Konfliktfall ein Zug der Gattung ICE (Rangziffer 2) vor einem Zug der Gattung EC (Rang 4) einen teilweisen Vorrang in Höhe von

$$c_d = 100 \cdot \frac{2-4}{4,0} = -50 [\%], \quad (10-3)$$

aber vor einem Zug der Gattung D (Rang 8) bereits einen vollen Vorrang haben.

Man muss beachten, dass eine stärkere Minderung der Rangbeziehungen zwischen den Zügen eventuell zu einer unrealistischen Betrachtung des Eisenbahnbetriebssystems und somit zu einer übermäßig optimistischen Beurteilung dessen Leistung und Qualität führen kann.

10.4.4 Fahrtenfolgehäufigkeiten

Alle drei im Abschnitt 6.5 vorgestellten Methoden zur Berechnung der Anzahl von Fahrtenfolgefällen sind in ANKE realisiert. Als Voreinstellung gilt im Programm das fahrplanunabhängige Standardverfahren, welches den Zugfahrten eine völlige Unabhängigkeit voneinander und vom Systemzustand unterstellt.

Für die aus RUT-0 übernommenen Betriebsprogramme eignet sich am besten das zweite fahrplanabhängige Verfahren, um den im Fahrplan häufig auftretenden Zugfolgefällen mehr Bedeutung zukommen zu lassen. Außerdem können dank dieses Verfahrens die im Fahrplan nicht vorgesehenen Zugfolgen, die in der Regel durch zu große Mindestzugfolgezeiten gekennzeichnet sind, aus der Kapazitätsberechnung ausgeschlossen werden.

Alternativ zu den ersten zwei Methoden kann man das Stundenganglinienverfahren bei unsicherer Kenntnis des Betriebsprogramms verwenden. Abbildung 10-12 präsentiert eine vom Programm mit dem Stundenganglinienverfahren ausgewertete Matrix der Fahrtenfolgehäufigkeiten eines TFK.

TFK Nr.	Anzahl der Fahrtenfolgefälle					
30	Fahrtenfolgehäufigkeiten					
31	Untersuchungszeitraum zwischen 0:00 h und 24:00 h					
32	Zug Nr	Gatt.	41000	8000	61000	68000
33	41000	Sg	6.00	3.33	5.17	0.50
34	8000	RB	3.33	11.42	7.33	1.92
35	61000	Dg	5.17	7.33	11.58	0.92
36	68000	Üg	0.50	1.92	0.92	1.67
37	Zugfolgefälle nach Stundenganglinienverfahren					
38						
39						
40						

Abbildung 10-12: Anzeige von Fahrtenfolgehäufigkeiten

Im allgemeinen weichen die Ergebnisse der Wartezeitenrechnung mit unterschiedlich ermittelten Fahrtenfolgehäufigkeiten nur dann erheblich voneinander ab, wenn die Abfahrtszeiten der Modellzüge nach bestimmten Regeln definiert sind (z.B. im Taktfahrplan oder bei zeitlicher Trennung des Güterverkehrs). Werden die Abfahrtszeiten zufällig eingegeben, ergeben sich in allen drei Verfahren ungefähr gleiche Fahrtenfolgehäufigkeiten, wobei jedoch nur die Aussagen des Standardverfahrens in diesem Fall statistisch gesichert sind (vgl. Anlage C).

10.5 Gesamtfahrstraßenknoten

Im Unterschied zu ALFA werden Gesamtfahrstraßenknoten in ANKE in einer besonderen Schnittstelle bearbeitet. Diese Vorgehensweise hängt in erster Linie von der Darstellung der Bahnhöfe und Abzweigstellen im Spurplan-Graphen ab. Diese Strukturen sind im Graphen nämlich formell nur schwer abzugrenzen, zudem decken sie im Gegensatz zu den TFK nicht das gesamte Netz ab. Die Festlegung, die GFK interaktiv abzugrenzen, so dass sie grundsätzlich keine direkten Verknüpfungen mit den TFK aufweisen, wie es in ALFA gebräuchlich ist, wurde im Kapitel 8 gemacht.

Sowohl die Bezeichnungen, als auch die Struktur der GFK werden in ANKE vom Programm benutzer kontrolliert. Nur einige wenige automatisierte Operationen können mit Unterstützung spezieller Algorithmen durchgeführt werden. Die Leistungsuntersuchung von GFK wird normalerweise ergänzend zu der Kapazitätsermittlung in TFK abgewickelt. Sie wird in drei Phasen unterteilt:

1. Auswahl geeigneter Infrastrukturbereiche
2. Abgrenzung von GFK
3. Berechnung der Kenngrößen

In der ersten Phase entscheidet der Bearbeiter, welche Bereiche des betrachteten Teilnetzes, in denen einzelne TFK durch Querfahrten komplex miteinander verbunden sind, als GFK untersucht werden sollen. Alternativ zur manuellen Auswahl

kann hier ein Algorithmus verwendet werden, der die Infrastrukturausschnitte mit mehreren parallelen Gleisen (Bahnhöfe) oder mit mehreren Zulaufstrecken (Abzweigstellen) im Spurplan-Graphen automatisch aussucht.

In der zweiten Phase müssen jedem GFK bestimmte Weichen zugeteilt werden, damit er in allen Richtungen durch die Haltepositionen oder durch die Projektgrenzen eingeschlossen wird. Diese Abgrenzung kann ebenfalls teilweise automatisiert werden, indem sich ein GFK nach der Vorgabe der ersten Weiche automatisch erweitert, bis in allen Richtungen im Infrastrukturgraphen Haltepositionen, Projektgrenzen oder Gleismitten erreicht werden. Abbildung 10-13 stellt einen automatisch abgegrenzten Gesamtfahrstraßenknoten (graue Infrastrukturabschnitte) dar.

In der dritten Untersuchungsphase werden für GFK folgende Kenngrößen berechnet: Zuganzahl, Verkettungszahl, Belegungsgrad und Kenngrößen der Fahrplannerstellung: zulässige mittlere Warteschlangenlänge, kalkulierte mittlere Warteschlangenlänge, Qualitätsfaktor und Hochrechnungsfaktor.

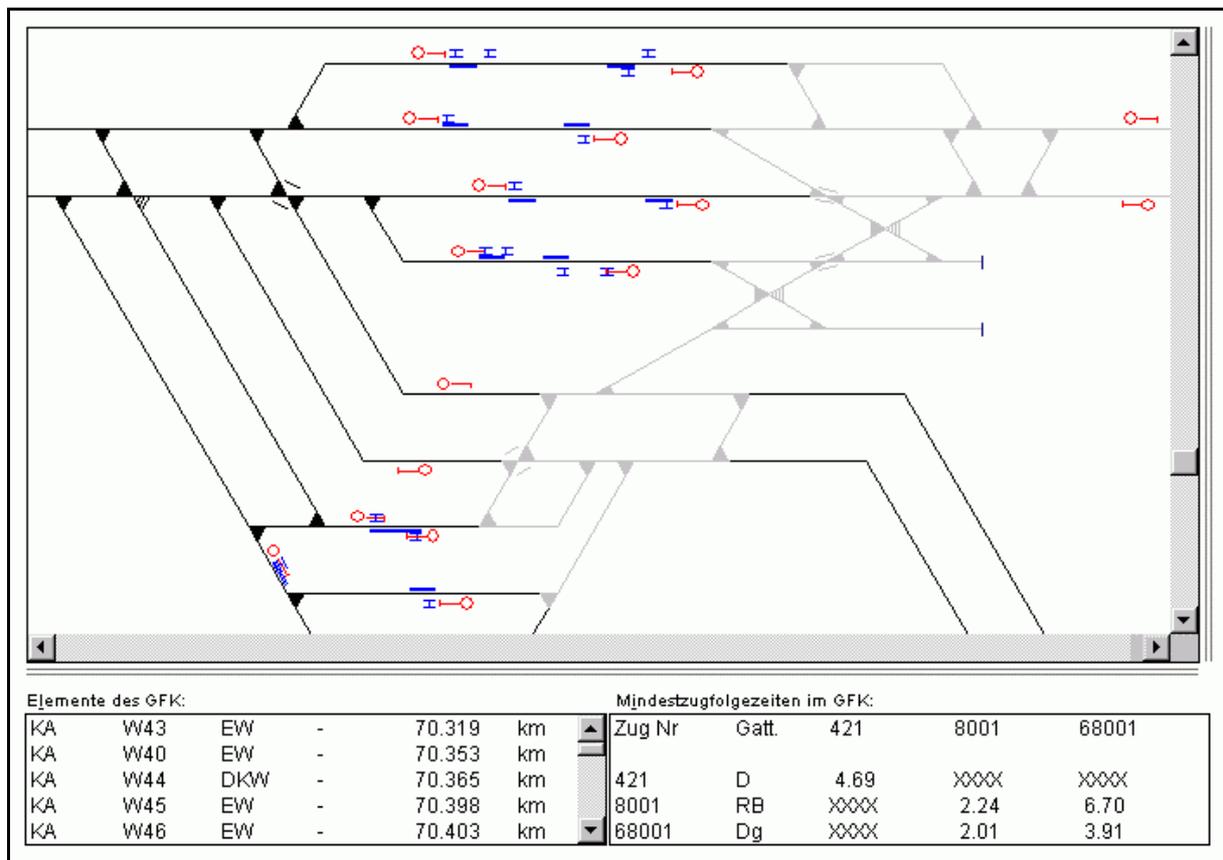


Abbildung 10-13: Anzeige von Gesamtfahrstraßenknoten

Die Ergebnisse der Kapazitätsberechnungen sind aus den im Abschnitt 8.3 genannten Gründen nicht immer zuverlässig. Der in Abbildung 10-13 dargestellte GFK besteht z.B. aus zwei vollständig getrennten Bereichen (Dies ist in der Matrix mit Mindestzugfolgezeiten gut zu erkennen). Deswegen erfüllt er die Bedingungen,

die von der Theorie an einen GFK gestellt werden, nicht, und seine Kenngrößen können somit mit dem Verfahren von WENDLER nicht ermittelt werden¹⁵.

10.6 Engpassauflösung und Verbesserung der Leistungsfähigkeit von Eisenbahnanlagen

Die Auswertung von Rechnungsergebnissen wird in ANKE durch zahlreiche Hilfsmittel unterstützt. Zum einen besteht für den Programmbenutzer immer die Möglichkeit, den Inhalt aller Anzeigefenster, z.B. Matrizen mit Mindestzugfolgezeiten, Ausschnitte aus der grafischen Darstellung von TFK, Fahrtenfolgehäufigkeiten oder ermittelte Kenngrößen, direkt auszudrucken. Zum anderen können viele Ausgaben für andere Anwendungen zur weiteren Bearbeitung bereitgestellt werden. Bei der Beseitigung von Engpässen empfiehlt sich beispielsweise der Vergleich zwischen Varianten der Kapazitätsrechnung mit Hilfe eines Tabellenkalkulationsprogramms.

Nachdem die überlasteten Bereiche einer Bahnanlage identifiziert sind, können verschiedene Maßnahmen zur Engpassauflösung mit ANKE überprüft werden. Der Umfang dieser Maßnahmen ist in erster Linie von der Aufgabenstellung an eine konkrete Netzuntersuchung abhängig. Möchte man ein geplantes Betriebsprogramm korrigieren oder die Ursachen von Störungen bei bereits stattgefundenen Betriebsabläufen beseitigen, kann dies durch gezielte Modifikationen der Zugströme, z.B. durch Änderungen der Fahrtverläufe, Zugzahlen, Fahrtenreihenfolgen oder Rangordnungen, verwirklicht werden. Bei der Infrastrukturbemessung kommen für die Engpassauflösung auch alternative Gestaltungen der Eisenbahnanlagen in Frage. In diesem Fall werden mit ANKE die Planungsaufgaben für die Neu- oder Ausbaustrecken bei vorgegebenen Betriebsprogrammen unterstützt. Im einzelnen können generell folgende Änderungen für die Engpassauflösung vorgeschlagen werden:

1. Modifikationen der Zugströme:

- Entfernen der Züge aus dem Betriebsprogramm
- Umleitung über andere Fahrwege/Strecken
- Umgestaltung der Züge zwecks Verbesserung der fahrdynamischen Eigenschaften
- Trennung des langsamen Verkehrs vom schnellen
- Einführung von Taktzeiten
- Änderung des Zugmischungsverhältnisses durch sogenannte Harmonisierung

¹⁵ Das klassische Verfahren würde in diesem Fall zwei Bedienungskanäle im GFK erkennen und dessen Kapazität bewerten, obwohl es keinen Zusammenhang zwischen den beiden Kanälen gibt

2. Infrastrukturänderungen:

- Ausbau der Infrastruktur
- Modernisierung der Sicherungstechnik
- Beschränkung des Raumabstandes der Züge (möglichst viel Zugfolgeabschnitte)
- Gleichmäßige Blockaufteilung (Vermeiden großer Zugfolgeabschnitte)
- Verkürzung der Zugfolgeabschnitte vor und hinter den zu erwartenden Engpässen
- Einführung zusätzlicher Überholungsmöglichkeiten

Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit ist ein geschlossenes Konzept für ein modernes interaktives Datenverarbeitungssystem für die analytische Kapazitätsermittlung von Eisenbahnnetzen entwickelt worden. Die bereits erfolgte Implementierung dieses Konzeptes in Form des PC-Softwaresystems ANKE eröffnet bisher nicht bekannte Möglichkeiten für betriebswissenschaftliche Untersuchungen von Bahnanlagen.

Das neue System zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus:

- Es verwendet die neuesten Erkenntnisse der Eisenbahnbetriebswissenschaft, insbesondere erweiterte analytische Modelle.
- In dem System ist eine optimale Integration verschiedener wissenschaftlicher Methoden erreicht worden, die eine gute Netzabdeckung und qualitative Aussagen erlaubt. Die Datenmodellierung bleibt dabei flexibel und anpassungsfähig.
- Die bei der Implementierung verwendeten Algorithmen sind überwiegend automatisiert, wodurch der Bearbeitungsaufwand in Anbetracht der großen Untersuchungsbereiche deutlich reduziert wird.
- Das Programm besitzt trotz der hohen Beanspruchung von Rechnerressourcen eine ausreichende Schnelligkeit und Stabilität.

Aus der Sicht des Programmbenutzers bietet ANKE viele Vorteile im Vergleich zu den herkömmlichen EDV-Werkzeugen. Unter anderem sind dies:

- Die Möglichkeit der Abbildung größerer Netzteile bis hin zu gesamten nationalen Eisenbahnnetzen. Eine Einschränkung hinsichtlich der Größe des zu untersuchenden Gebietes besteht ausschließlich durch die Ausschöpfung der Rechnerressourcen und nicht wegen der Software
- Eine echte grafische Benutzeroberfläche, eine benutzerfreundliche Schnittstelle, umfangreicher Informationsfluss und Möglichkeiten zum Datenaustausch mit anderen Anwendungen
- Die Kompatibilität zu der RUT-0-Datenbank der Deutschen Bahn AG, die mittlerweile das gesamte Eisenbahnnetz Deutschlands umfasst

Zurzeit ist das EDV-System ANKE prinzipiell in der Lage, alte Programme der SLS-Familie, die bisher bei der Bahn als Standardwerkzeuge für Leistungsuntersuchungen von Strecken und Fahrstraßenknoten angewendet werden, in vollem Umfang zu ersetzen. Eine Erprobungsphase des Programms, in der die wertvollen Erfahrungen und Anregungen gesammelt werden sollen, ist bereits von der DB Netz AG eingeleitet worden.

Als ein „High-end“-Produkt der analytischen Modellierung von Eisenbahnbetriebssystemen darf ANKE dennoch nicht angesehen werden. Es bleiben sowohl zahlreiche Ausbaumöglichkeiten vorhanden, als auch einige methodische Fragen offen, deren Lösungen die Fähigkeiten von analytischen Modellen noch verbessern könnten.

Als eine vorstellbare Programmerweiterung kommt in erster Linie die Implementierung der LHT-Approximation der Wartezeitfunktion von WENDLER in Frage. Diese Methode ist zwar sehr komplex, sie verspricht aber eine bisher ungeahnte Genauigkeit der Aussagen über das Leistungsvermögen von Eisenbahnsystemen. Ferner wäre auch die Integration anderer analytischer Modelle, beispielweise ein Einsatz des bedienungstheoretischen Verfahrens zur Bestimmung der erforderlichen Gleisanzahl in Bahnhöfen, sinnvoll.

Alternativ zur rein analytischen LHT-Approximation erscheint eine in [67] vorgeschlagene Kombination dieses mathematischen Modells mit der Simulation vielversprechend. Demnach könnten die höheren Ableitungen der Wartezeitfunktion simulativ, also numerisch, geschätzt werden, wodurch die Komplexität des Verfahrens gesenkt und die Plausibilität entsprechend verbessert werden könnte.

Forschungsbedarf besteht weiterhin in Hinblick auf das Zusammenwirken von mehreren Teilfahrstraßenknoten, weil das bisher verwendete Gesamtfahrstraßenknoten-Modell nicht präzise genug ist, um komplexe Fahrtenausschlüsse in Bahnhöfen und Abzweigstellen korrekt abzubilden.

Ein weiteres unerforschtes Phänomen stellen die in der Arbeit erwähnten doppelten Warteschlangen dar, die vermutlich helfen könnten, weitere Leistungsreserven von eingleisigen Strecken aufzufinden.

Im übrigen bleibt zu hoffen, dass die analytische Modellierung als ein wichtiges Element der Eisenbahnbetriebswissenschaft nicht nur mit der Weiterentwicklung der theoretischen Grundlagen, sondern auch mit dem raschen technischen Fortschritt mithalten kann.

Literaturverzeichnis

- [1] **Asmussen, S.:** Applied probability and queues
Wiley series in probability and mathematical statistics: Applied probability and statistics; Chichester 1987
- [2] **Bamberg, G., Baur, F.:** Statistik
Oldenburg Verlag, München 1993
- [3] **Baars, J., Brünger, O.:** Von der Trassenbestellung zum Kursbuch
Eisenbahntechnische Rundschau, 48 (1999), S. 662-667
- [4] **Bendtfeld, J-F.:** Gestaltung und Bewertung von Fahrstraßenknoten
Eisenbahningenieur, 9 (1999), S 36-39
- [5] **Bunday, Brian D.:** An introduction to Queuing theory
Arnold publishing, London 1996
- [6] **Brünger, O.:** Konzeption einer Rechnerunterstützung für die Feinkonstruktion von Eisenbahnfahrplänen
Dissertation, Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Instituts der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen 1995
- [7] **Brünger, O.:** Weiterentwicklung der eisenbahnbetrieblicher Werkzeuge auf der Basis des Spurplanmodells und des Rechnerunterstützten Trassenmanagements
3.Eisenbahnbetriebswissenschaftliches Kolloquium; Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Instituts der RWTH Aachen 2000
- [8] **Deutsche Bundesbahn:** Richtlinien für eisenbahnbetriebswissenschaftliche Untersuchungen, für Ermittlung von Sperrzeiten, für die Untersuchung von Fahrstraßenknoten, für die Ermittlung der Leistungsfähigkeit von Strecken, DS 405, erstveröffentlichung 1974, Berichtigungen bis 1991
- [9] **Deutsche Bundesbahn:** Richtlinien für die Ermittlung der Leistungsfähigkeit von Fahrstraßenknoten, 405, Abschnitt 10, 1979
- [10] **Deutsche Bundesbahn:** Wartezeitvorschrift für den Personenverkehr, Anlage 1 zur DS 402 / 2.4
Bundesbahndirektion, Köln 1990
- [11] **Deutsche Bundesbahn.** Zentrale Produktion: Programmfamilie SLS, PC-Programme zur Leistungsfähigkeitsberechnung und Simulation im Eisenbahnwesen, Benutzerhandbuch
Mainz 1992
- [12] **Deutsche Bahn AG.** Geschäftsbereich Netz: Trassenpreise
Mainz 1994

- [13] **Deutsche Bahn AG**, Geschäftsbereich Netz: Richtlinie 405.0103 Fahrwegkapazität (Entwurf)
Berlin 1999
- [14] **Fischer, H., Bolemant, M., Margaritov, A., Friedrich, G.-R.**: Das Projekt SABINE – Simulation und Auswertung des Betriebsablaufs im Netz
VDI Berichte Nr. 1219, 1995, S 451-462
- [15] **Fischer, K., Hertel, G.**: Bedienungsprozesse im Transportwesen: Grundlagen und Anwendungen der Bedienungstheorie
Transpress, Berlin 1990
- [16] **Forman, S. Acton**: Numerical methods that work
The Mathematical Association of America; Washington D.C. 1990
- [17] **Gast, I.**: Wartezeiten infolge stehender Überholungen auf Eisenbahnstrecken
Dissertation, Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Instituts der RWTH Aachen 1985
- [18] **Gnedenko, B.W., Kowalenko, I.N.**: Einführung in die Bedienungstheorie
R. Oldenbourg Verlag, München Wien 1971
- [19] **Gröger, T.**: Simulation des Vorganges der Trassenvergabe und Nachweis der Stabilität der Betriebsabwicklung
3.Eisenbahnbetriebswissenschaftliches Kolloquium; Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Instituts der RWTH Aachen 2000
- [20] **Happel, O.**: Sperrzeiten als Grundlage für die Fahrplankonstruktion
Eisenbahntechnische Rundschau, 2 (1959), S. 79-90
- [21] **Hauptmann, D., Rudolph, R.**: Stadtbahnplanung mit Hilfe von Betriebssimulation
Der Nahverkehr 1-2 (2000), S. 50-54
- [22] **Hauptmann, D.**: Automatische und diskriminierungsfreie Ermittlung von Fahrplantrassen in beliebig großen Netzen spurgeführter Verkehrssysteme
Dissertation, Hesta-Verlag, Darmstadt 2000
- [23] **Hertel, G.**: Verfahren der Modellierung und Berechnung von Bedienungssystemen mit störanfälligen Kanälen
Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Verkehrswesen, Dresden.
Bd. 30 (1983), S. 865-875
- [24] **Hertel, G.**: Exakte Lösung zur Berechnung der Wartegleiszahl vor im Einrichtungsbetrieb befahrenen Streckengleisen bei Nicht-Poisson-Ankünften (G/M/1 - Wartesystem)
Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Verkehrswesen, Dresden,
Bd. 31 (1984), S. 195-205

-
- [25] **Hertel, G.:** Analytische Modellierung und formelmäßige Behandlung von Standard-Bedienungssystemen mit störanfälligen Kanälen
Dissertation (B), Hochschule für Verkehrswesen, Dresden 1985
- [26] **Hertel, G.:** Die maximale Verkehrsleistung und die minimale Fahrplanempfindlichkeit auf Eisenbahnstrecken
Eisenbahntechnische Rundschau 10 (1992), S. 665-671
- [27] **Hertel, G., Ludwig, D.:** Kundenorientierte Leistungsuntersuchungen im Netz der Eisenbahn
Edition ETR: Bahn Report 1997
- [28] **Hertel, G, Kölbl, W.:** Wartezeiten als wesentliche Qualitätsparameter der Beförderungsleistungen
Schriftenreihe des Institutes für Verkehrssystem-theorie und Bahnverkehr der TU Dresden. Bd. 2 (1996), S. 52-54
- [29] **Jochim, H.:** Verkehrswirtschaftliche Ermittlung von Qualitätsmaßstäben im Eisenbahnbetrieb
Dissertation, Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Instituts der RWTH Aachen 1999
- [30] **Krampe, H., Hertel, G.:** Beurteilung der Belastbarkeit von Gleisentwicklungen unter Berücksichtigung von Störungen
Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Instituts der RWTH Aachen, Heft 41; Aachen 1987
- [31] **Massute, E.:** Zur Geschichte der Bahnhofsdurchleuchtung
Eisenbahntechnische Rundschau. Rangiertechnik, Darmstadt 1953 (13), S. 18-46
- [32] **Müller, W.:** Eisenbahnanlagen und Fahrdynamik, 1. Band
Julius Springer Verlag, Berlin 1950
- [33] **Neuts, M.F.:** Structured Stochastic Matrices of M/G/1 Type and their Applications
Marcel Dekker Inc., New York 1989
- [34] **Oetting, A.:** Kann die „Transportkraft“ ein aussagefähiger Maßstab für Ertrag, Auslastung und Betriebsqualität von Eisenbahnstrecken sein?
3.Eisenbahnbetriebswissenschaftliches Kolloquium, RWTH Aachen 2000
- [35] **Oltrogge, C.:** Linienplanung für mehrstufige Bedienungssysteme im Öffentlichen Personenverkehr
Dissertation, Fachbereich für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Technischen Universität Braunschweig 1993
- [36] **Pachl, J.:** Steuerlogik für Zuglenkanlagen zum Einsatz unter Stochastischen Betriebsbedingungen
Dissertation, Fachbereich für Bauingenieur- und Vermessungswesen der technischen Universität Braunschweig 1993

- [37] **Pachl, J.:** Standardisierung der Infrastruktur kleiner Knoten
Eisenbahningenieur 1999 (4), S. 14-20
- [38] **Pachl, J.:** Systemtechnik des Schienenverkehrs
Teubner Verlag, Stuttgart-Leipzig 1999
- [39] **Page, E.:** Queuing Theory of Operations Research
Operations Research series, London 1972
- [40] **Potthoff, G.:** Verkehrsströmungslehre
Transpress, VEB Verlag für Verkehrswesen, Bd. 1, Berlin 1964
- [41] **Potthoff, G.:** Verkehrsströmungslehre
Transpress, VEB Verlag für Verkehrswesen, Bd. 4, Berlin 1972
- [42] **Potthoff, G.:** Die Bedienungstheorie im Verkehrswesen
Transpress, VEB Verlag für Verkehrswesen, Berlin 1969
- [43] **Radtke, A.:** Dispositionsmodell für den optimierten Betriebsmitteleinsatz der
Eisenbahn
Institut für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und –Betrieb, Hannover 1995
- [44] **Sauer, W.:** RUT - Rechnerunterstützte Trassenkonstruktion
Eisenbahntechnische Rundschau 1999 (11), S 720-725
- [45] **Schäl, M.:** Markoffsche Entscheidungsprozesse
Teubner Verlag, Stuttgart 1990
- [46] **Schultze, K.:** Modell für die asynchrone Simulation des Betriebes in Teilen
des Eisenbahnnetzes
Dissertation, Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Instituts der
RWTH Aachen 1985
- [47] **Schwanhäuser, W.:** Die Bemessung der Pufferzeiten im Fahrplangefüge der
Eisenbahn
Dissertation, Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Instituts der
RWTH Aachen 1974
- [48] **Schwanhäuser, W.:** Die Ermittlung der Leistungsfähigkeit von großen
Fahrstraßenknoten und von Teilen des Eisenbahnnetzes
Archiv für Eisenbahntechnik 33 (1978), S 7-18
- [49] **Schwanhäuser, W.:** Der Erwartungswert von Zeitverlusten durch Überho-
lungen auf Eisenbahnstrecken
Archiv für Eisenbahntechnik 36 (1981), S. 5-14
- [50] **Schwanhäuser, W., Schultze, K.:** Ermittlung von Qualitätsmaßstäben für
die Berechnung der Leistungsfähigkeit eines Streckenabschnittes und
Entwicklung eines Rechenverfahrens zur Ermittlung von Endverspätungen
Forschungsbericht für die Deutsche Bundesbahn, (unveröffentlicht), Aachen
1982

- [51] **Schwanhäuser, W.:** Wartezeiten und Stauerscheinungen als Qualitätskriterium des Eisenbahnbetriebes
Beitrag zum Eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Kolloquium vom 23.-25.07.1986 in Aachen; Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Instituts der RWTH Aachen, Heft 41, Aachen 1987
- [52] **Schwanhäuser, W., Pohl, M.:** Eisenbahnbetriebswissenschaftliche Untersuchung über die Verbindung Ludwigshafen-Mannheim
Gutachten für die Stadt Ludwigshafen; Aachen 1991
- [53] **Schwanhäuser, W.:** Leistungsfähigkeit und Kapazität
Vortrag auf dem DVWG-Seminar „Kapazitätsreserven der Verkehrsträger“, Aachen 1994
- [54] **Schwanhäuser, W.:** Handbuch zum Programm Kapazit, (unveröffentlicht)
Aachen 1998
- [55] **Schwanhäuser, W.:** Erweitertes wahrscheinlichkeitstheoretisches Verfahren zur Bemessung der Pufferzeiten im Fahrplan der Eisenbahn
Ergänzende Studie zur Neubearbeitung der DS 405 „Leistungsuntersuchungen von Bahnanlagen durchführen“, Aachen 1998
- [56] **Schwanhäuser, W., Vakhtel S.:** ANKE – Analytische Kapazitätsermittlung von Strecken und Knoten, Handbuch
Verkehrswissenschaftliches Institut der RWTH Aachen, 1999
- [57] **Siever, T.:** Kapazitätsreserven im Schienenpersonenfernverkehr
Institut für Verkehrswesen, Eisenbahnbau- und betrieb, Universität Hannover 1998
- [58] **Stemann, H.:** Ermittlung der Kenngrößen im Eisenbahnfahrplan mittels analytischen und simulativen Verfahren
Diplomarbeit, Lehrstuhl für Schienenbahnwesen und Verkehrswirtschaft der RWTH Aachen, 2000
- [59] **Vakhtel, S.:** The Simulated Annealing Method for the Problem about device readiness coefficient having included the checking system in the spacecraft control system
Diploma work, The Chair of System Analysis and Operations Research of Siberian Aerospace Academy, Krasnoyarsk, Russia 1994
- [60] **Vakhtel, S.:** Online-Dokumentation zum PC-System ANKE
Verkehrswissenschaftliches Institut der RWTH Aachen 2000
- [61] **Vakhtel, S.:** Nachweis von Engpässen und Kapazitätsreserven mit Hilfe der analytischen Netz-Kapazitäts-Ermittlung (ANKE)
3. Eisenbahnbetriebswissenschaftliches Kolloquium, RWTH Aachen 2000

- [62] **Weidner, T.:** Prognose der Pünktlichkeit auf angestrebten Fahrplantrassen unter Berücksichtigung der Netzverknüpfungen, der Urverspätungen und der verfügbaren Fahrzeitreserven
3. Eisenbahnbetriebswissenschaftliches Kolloquium, RWTH Aachen 2000
- [63] **Wakob, H.:** Wahrscheinlichkeitsmodell zur Ermittlung von Wartezeiten bei Zugfolgefällen
Archiv für Eisenbahntechnik 36 (1981), S. 5-14
- [64] **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 Instituts der RWTH Aachen 1985
- [65] **Wakob, H.:** Wartemodell zur Ermittlung der planmäßigen Wartezeiten auf Einfädelung; Beitrag zum Eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Kolloquium vom 23.-25.07.1986 in Aachen; Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Instituts der RWTH Aachen, Heft 41, Aachen 1987
- [66] **Wendler, E.:** Analytische Berechnung der planmäßigen Wartezeiten bei asynchroner Fahrplankonstruktion
Dissertation, Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Instituts der RWTH Aachen 1999
- [67] **Wendler, E.:** Verknüpfung simulativer und analytischer Modelle bei der Leistungsberechnung von Bahnanlagen
3.Eisenbahnbetriebswissenschaftliches Kolloquium, RWTH Aachen 2000
- [68] **Wolff, Ronald W.:** Stochastic modelling and the theory of queues
Prentice-Hall Publishing, Englewood Cliffs, NJ 1989
- [69] **Боровков А.А.:** Вероятностные процессы в теории массового обслуживания
Москва, Наука 1972
- [70] **Бхат. Ю.:** Теория массового обслуживания – Исследование Операций, методология и математические методы
П/р Дж. Маудера. Мир, Москва 1981
- [71] **Гнеденко Б. В., Коваленко И. Н.:** Введение в теорию массового обслуживания
Москва, Наука 1987
- [72] **Справочник по теории вероятности и математической статистике. Под ред. В.С.Королюка**
Москва, Наука 1985

Anlage A Numerischer Vergleich der Ansätze zur Ermittlung von Folgeverspätungen

Ein numerischer Vergleich beider Ansätze für die Berechnung von Wartezeiten im Betrieb, der summarischen und der zuggattungsscharfen Formel ((4-11) Seite 56 bzw. (4-17) Seite 58), wurde an einem Beispiel-TFK durchgeführt. Der Teilfahrstraßenknoten wird von insgesamt neun Modellzügen aus sieben Zuggattungen befahren. Die Zugnummern, Rangziffern, Gattungen, Zugklassen und Verspätungsniveaus aller Modellzüge sind in Tabelle A-1 aufgeführt:

Zug Nr.	Gattung	Rangziffer	Zugklasse	tV_m	pV_e
9400	ICE	2	FRz	3,5	0,25
420	D	8	FRz	4,0	0,58
41000	Sg	10	FGz	2,5	0,55
3001	SE	14	NRz	8,0	0,3
3000	SE	14	NRz	8,0	0,3
8000	RB	16	NRz	8,0	0,3
8001	RB	16	NRz	8,0	0,3
61000	Dg	18	NGz	30,0	0,5
68000	Üg	22	NGz	33,0	0,65

Tabelle A-1: Charakteristische Daten der Modellzüge

Tabelle A-2 enthält die vom Programm ermittelten Mindestzugfolgezeiten.

Zug Nr.	9400	420	41000	3001	3000	8000	8001	61000	68000
9400	2,16	1,13	1,98	2,77	1,13	1,13	2,77	1,97	2,24
420	4,94	3,41	3,41	2,88	3,41	3,41	2,88	3,41	2,53
41000	5,58	5,16	3,70	3,26	4,43	4,39	3,02	2,95	3,46
3001	1,39	1,39	1,39	4,46	1,39	1,39	4,46	1,39	1,33
3000	3,88	3,46	2,01	8,20	3,69	2,23	8,20	1,41	2,11
8000	6,86	6,44	4,81	2,77	6,03	4,58	2,77	4,14	2,05
8001	1,37	1,37	1,37	8,59	1,37	1,37	4,43	1,37	1,41
61000	7,61	7,02	5,01	3,60	2,46	2,22	3,36	4,04	3,99
68000	9,15	8,73	7,27	2,83	8,15	7,86	2,54	6,53	4,92

Tabelle A-2: Mindestzugfolgezeiten [min]

Die mittleren Längen der Warteschlangen werden nach beiden Verfahren in sieben Varianten so berechnet, dass die Gesamtanzahl aller Fahrten im TFK konstant bleibt (180 Fahrten pro Tag). Die Anzahl der in Modellzügen enthaltenen Fahrten wird

indessen so variiert, dass die mittlere Rangziffer und das Mischverhältnis des Systems von Variante zu Variante steigen (siehe Tabelle A-3).

Zug Nr.	Gat- tung	Varianten						
		1	2	3	4	5	6	7
9400	ICE	180	90	60	45	36	30	20
420	D	0	90	60	45	36	30	20
41000	Sg	0	0	60	45	36	30	20
3001	SE	0	0	0	22	18	15	20
3000	SE	0	0	0	23	18	15	20
8000	RB	0	0	0	0	18	15	20
8001	RB	0	0	0	0	18	15	20
61000	Dg	0	0	0	0	0	15	20
68000	Üg	0	0	0	0	0	15	20

Tabelle A-3: Anzahl der Fahrten für die Varianten der Berechnung

Für alle Varianten wurden folgende Standardkenngrößen ermittelt:

- Belegungsgrad ρ
- mittlere Warteschlangenlänge nach der summarischen Formel Elw_s
- mittlere Warteschlangenlänge nach der zuggattungsscharfen Formel Elw_z
- mittlere Warteschlangenlänge nach der zuggattungsscharfen Formel mit teilweisem Vorrang Elw_z^* . Dispositionsquotient $m_f=4$ nach Formel (10-2) Seite 176

In Tabelle A-4 sind neben den berechneten Standardgrößen die Mittelwerte folgender statistischer Kenngrößen enthalten:

- der Rangziffer Rg_m
- der quadratischen Abweichung der Rangziffer σ_{Rg}
- der Pufferzeit tP_m [min]
- der Einbruchsverspätung tV_m [min]
- der Wahrscheinlichkeit der Einbruchsverspätung pV_e
- der Wahrscheinlichkeit des Gleichranges pV_g
- der Mindestzugfolgezeit tZ_m
- der Mindestzugfolgezeit beim Gleichrang tZ_{mg}

Variante	ρ	Elw_s	Elw_z	Elw_z^*	Rg_m	σ_{Rg}
1	0,270	0,013	0,013	0,013	2,000	0,000
2	0,363	0,042	0,064	0,064	5,000	3,000
3	0,437	0,074	0,118	0,094	6,667	3,399
4	0,403	0,073	0,098	0,086	8,500	3,464
5	0,418	0,088	0,108	0,094	10,000	4,899
6	0,455	0,136	0,162	0,151	11,667	5,878
7	0,459	0,145	0,170	0,158	17,143	5,578

Variante	tP_m	tV_m	pV_e	pV_g	tZ_m	tZ_{mg}
1	5,84	3,50	0,25	1,00	2,16	2,16
2	5,09	3,75	0,42	0,50	2,91	4,17
3	4,50	3,33	0,46	0,33	3,50	4,60
4	4,77	4,50	0,42	0,25	3,23	4,66
5	4,66	5,20	0,40	0,20	3,34	4,38
6	4,36	9,58	0,43	0,15	3,64	4,43
7	4,33	11,67	0,41	0,16	3,68	4,14

Tabelle A-4: Ergebnisse der Berechnung von Kenngrößen

Wie erwartet wächst der Belegungsgrad des TFK kontinuierlich in Abhängigkeit vom Anteil der langsamen Züge bzw. von der mittleren Rangziffer. Die mittlere Warteschlangenlänge wächst ebenfalls, mit der zuggattungsscharfen Formel berechnet jedoch erkennbar schneller als mit der summarischen. Lediglich bei Variante 1, in der es nur eine Rangstufe gibt, liefern beide Verfahren (ebenso erwartungsgemäß) absolut identische Ergebnisse. In den anderen Varianten ist Elw_z um 20 bis 30% größer als Elw_s , wobei anscheinend kein Zusammenhang zwischen der Differenz $Elw_z - Elw_s$ und der mittleren Rangziffer Rg_m oder der Wahrscheinlichkeit des Auftretens von gleichrangigen Zugfolgefällen pV_g existiert.

Die Abhängigkeiten der mittleren Warteschlangenlänge von drei weiteren Kenngrößen:

- dem Belegungsgrad,
- der mittleren Rangziffer
- und von der mittleren quadratischen Abweichung der Rangziffer,

sind in Form von Diagrammen in den Abbildungen A-1, A-2, bzw. A-3 dargestellt.

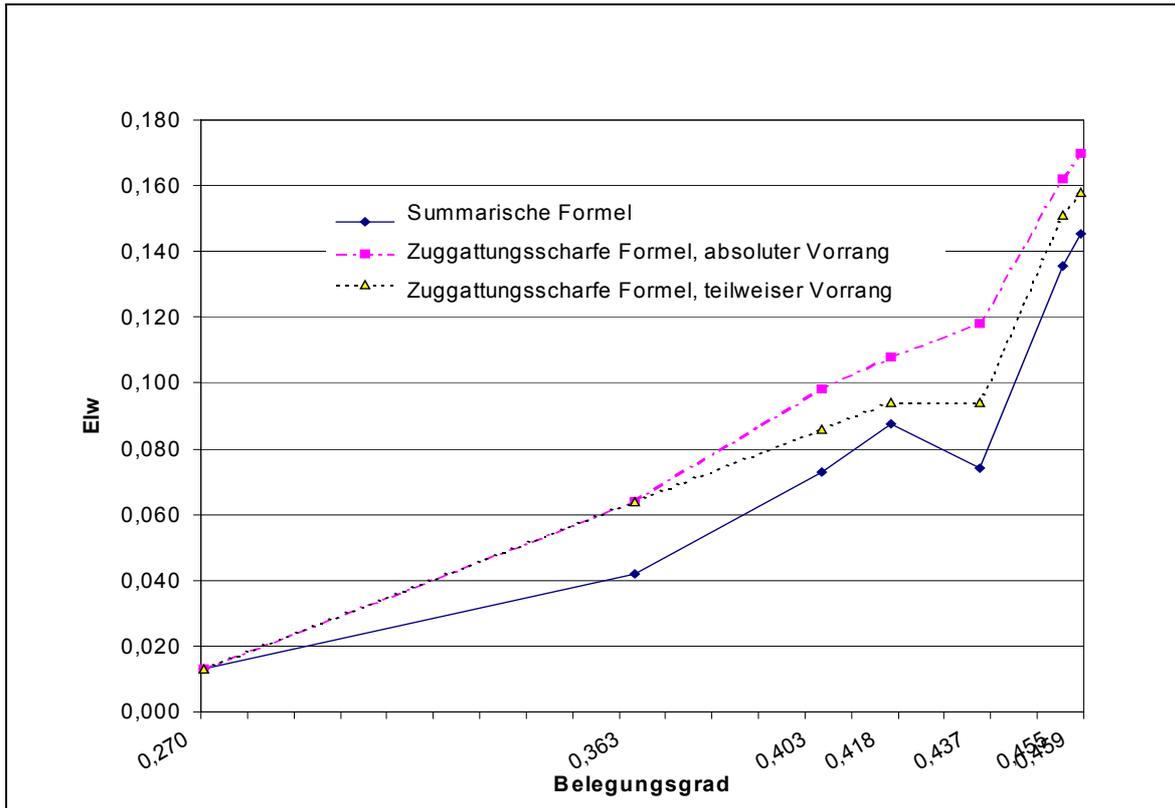


Abbildung A-1: Mittlere Länge der Warteschlange in Abhängigkeit vom Belegungsgrad

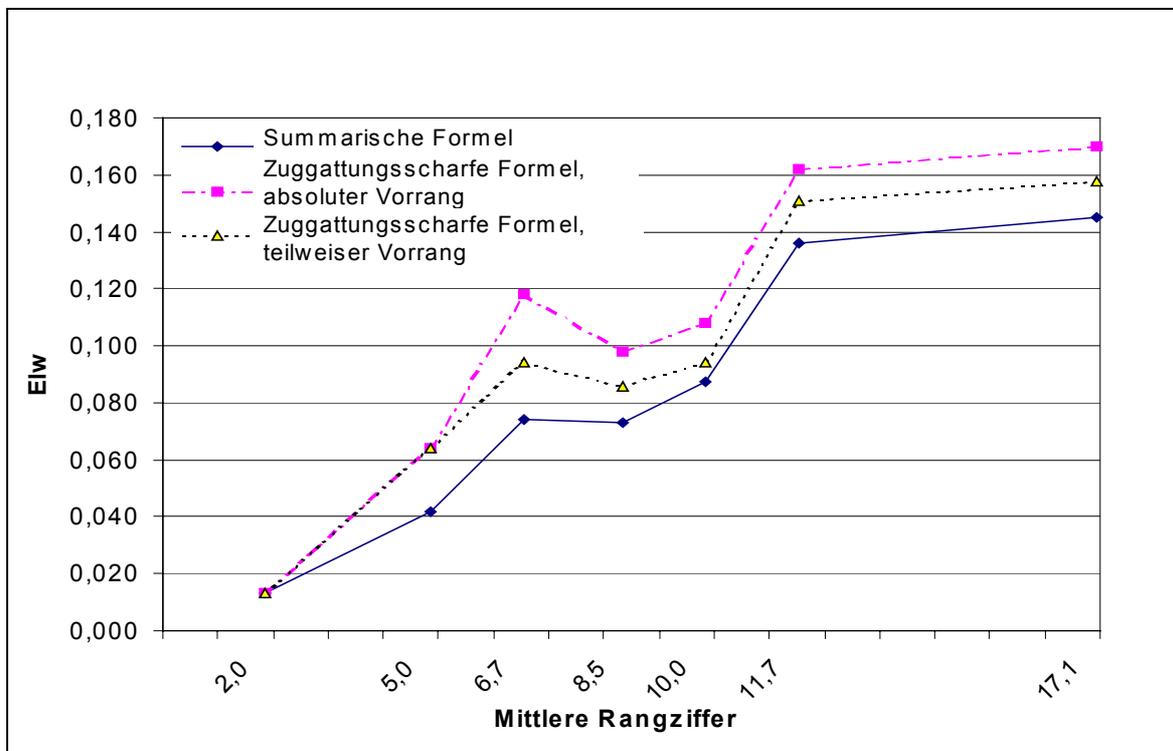


Abbildung A-2: Mittlere Länge der Warteschlange in Abhängigkeit von der mittleren Rangziffer

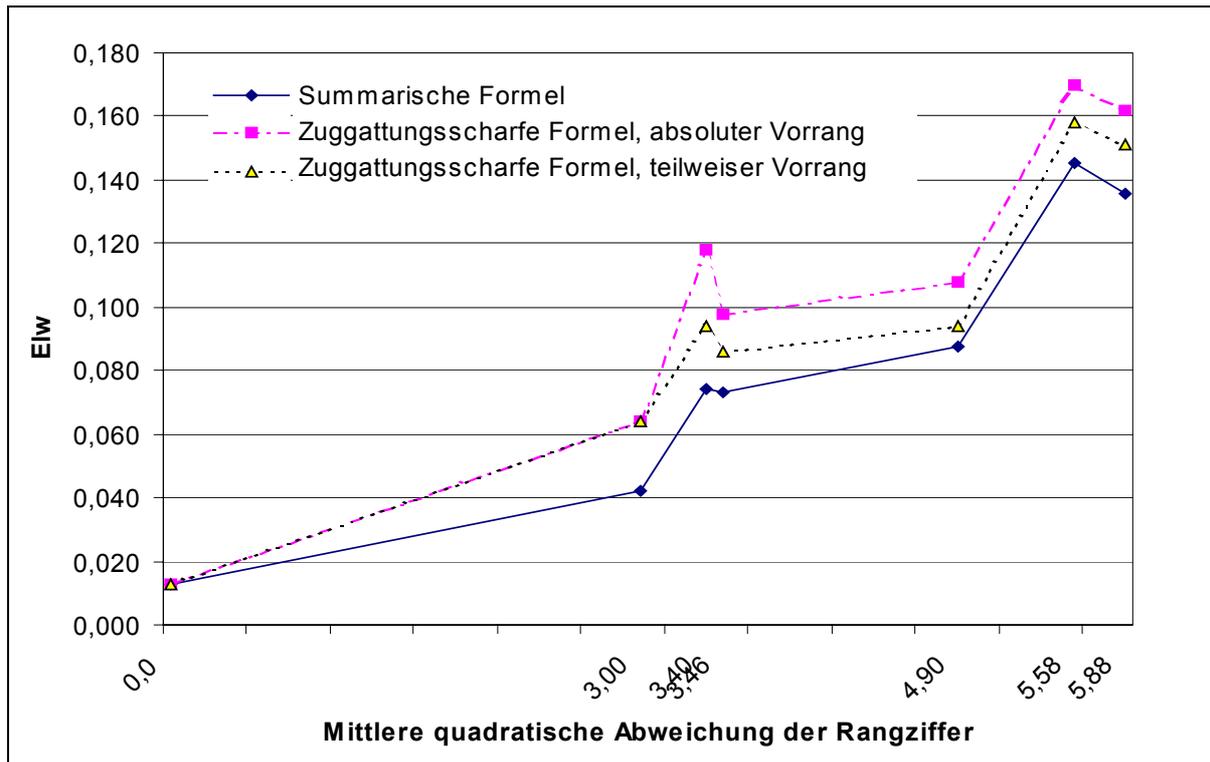


Abbildung A-3: Mittlere Länge der Warteschlange in Abhängigkeit von der mittleren quadratischen Abweichung der Rangziffer.

Die Ursache für unterschiedliche Aussagen der verglichenen Verfahren liegt offenbar vor allem darin, dass in der summarischen Formel die Züge im Stau gleichrangig behandelt werden. In der zuggattungsscharfen Formel werden dagegen die Prioritäten einzelner Züge auch bei Staubildung berücksichtigt, d.h. es wird angenommen, dass auch im Stau aus den Bahnhöfen am Anfang des Streckenabschnittes die Züge noch nach ihrer Rangordnung abgerufen werden. Diese These wird durch die Einführung eines teilweisen Vorranges in der zuggattungsscharfen Formel (Kenngröße Elw_z^*) bestätigt: Wenn die Rangordnung im Betrieb bei kleinen Rangunterschieden vernachlässigt wird, führt dies zur Verminderung der Staus. Im analysierten Beispiel geschieht dies übrigens erst ab der dritten Variante, weil in der ersten nur eine Rangziffer auftritt und in der zweiten der Rangunterschied zwischen dem ICE und dem D-Zug mehr als m_f beträgt, so dass es hierbei beim absoluten Vorrang bleibt.

Vermutlich würden die Ergebnisse der Berechnungen mit den beiden untersuchten Formeln bei $m_f > 20$ ungefähr gleich sein, eine solche Annahme würde jedoch eine inkorrekte Beurteilung des Betriebsgeschehens hervorrufen. Deswegen bringt der Einsatz der zuggattungsscharfen Formel für die Netzkapazitätsermittlung eindeutige Vorteile. Allerdings müssen an das neue Verfahren andere Qualitätsanforderungen gestellt werden (vgl. Kapitel 9 und Formel (9-5) Seite 152).

Anlage B Vergleich der Verfahren ALFA und ANKE

Ein qualitativer Vergleich des EDV-Systems ANKE mit dem SLS-Programm ALFA, um den Nachweis einer identischen Aussagekraft beider Werkzeuge zu erbringen, wurde anhand eines provisorischen Knotenbahnhofs Alfastadt mit fünf Gleisen und drei zweigleisigen Zulaufstrecken durchgeführt.

Da sowohl die Modellstruktur, als auch der Datenaufbau, sowie teilweise die Algorithmen beider Programme unterschiedlich sind, mussten diese aneinander angepasst werden, um die Ergebnisse der Leistungsfähigkeitsrechnung gegenüberstellen zu können. Die Anpassung erfolgt auf folgenden drei Ebenen:

1. Dateneingabe: Infrastruktur- und Modellzugdaten müssen trotz ungleicher Informationsbestände und verschiedener Eingabearten im höchsten Maße übereinstimmen
2. Programmparameter: Durch Steuerungsmöglichkeiten, die in beiden Programmen vorgesehen sind, werden die Modelleigenschaften ausgeglichen
3. Eingriff in die internen ANKE-Algorithmen: Falls in einzelnen Fällen alle Anpassungsmöglichkeiten ausgeschöpft sind, die Handlungsweise von ALFA jedoch aufgrund der Differenzen bei der Modellierung noch andersartig bleibt, werden entsprechende interne Algorithmen von ANKE geändert, wie z.B. die Festlegung einer einheitlichen konstanten Bremsverzögerung

Abbildung B-1 stellt den Test-Knotenpunktbahnhof schematisch dar. Die übersichtliche Struktur dieses Knotens erlaubt, viele nicht übereinstimmenden Aspekte beider Modelle relativ schnell aufzudecken und zu korrigieren.

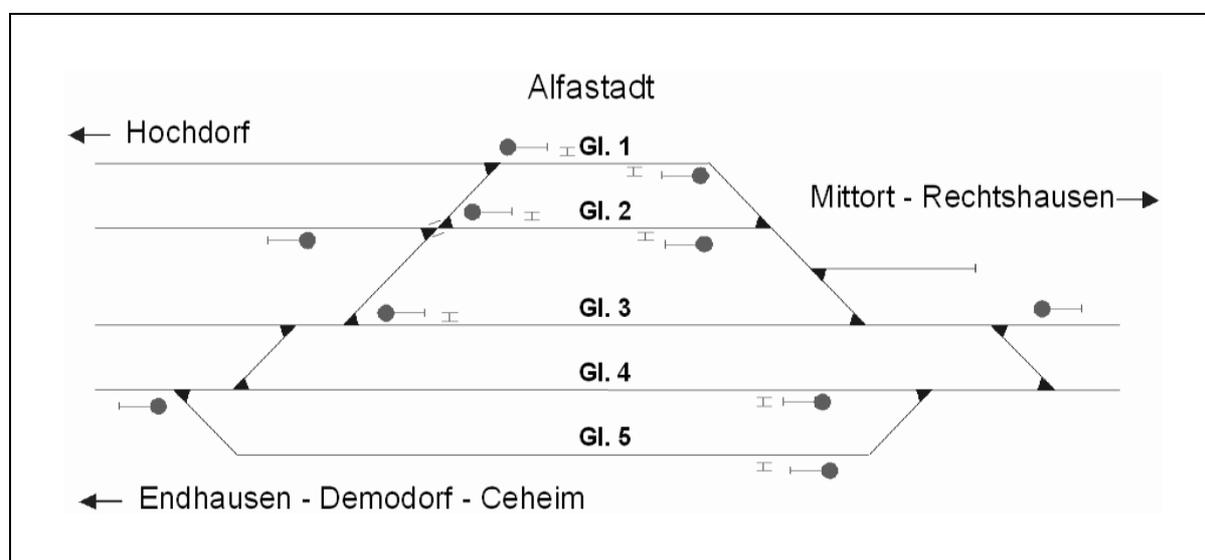


Abbildung B-1: Testbahnhof Alfastadt

Zu den notwendigen Voraussetzungen für die Überprüfung von ANKE-Rechnungsergebnissen zählen nicht nur die korrekte Umsetzung der bedienungstheoretischen Formeln, sondern vor allem auch identische Eingangsdaten, wie Struktur der Teilfahrstraßenknoten, Fahrtenausschlüsse, Anzahl der Fahrtenfolgefälle, Ankunftsabstände und Mindestzugfolgezeiten. Die letztgenannten sind wiederum von einer richtigen Aufteilung der Zugläufe in die Überholungsabschnitte und der

genauen Fahrzeitrechnung abhängig. Ferner lassen sich die Fahrzeiten nur dann exakt berechnen, wenn die Zugcharakteristika, Laufwege und die ihnen zugrundeliegende Streckeninfrastruktur einheitlich sind. Die Abstimmung dieser Eigenschaften erfolgt auf den drei genannten Ebenen.

Bei der Eingabe der **Infrastruktur** ist folgendes zu beachten:

- In der ALFA-Infrastruktur wird zwischen dem eigentlichen Knoten und den Zulaufstrecken unterschieden, wobei im Knoten alle Infrastrukturmerkmale inklusive Weichenlagen und fahrwegeigenen Geschwindigkeiten exakt festgelegt werden, und bei den Strecken in jedem Überholungs- bzw. Endbahnhof lediglich die Gleisanzahl und die betriebliche Funktion der Gleise je Richtung definiert sind.
- Während die SPURPLAN-Betriebsstellen frei definierbar sind, müssen die Kilometrierungsbereiche in beiden Systemen übereinstimmen, denn hierauf beziehen sich alle Infrastrukturelemente und dementsprechend Fahr- und Sperrzeiten. Besonders zu beachten sind die sogenannten Übergangspunkte von ALFA: Dort enden die Streckendaten und es beginnen die Fahrwege im Knotenpunktbahnhof.
- Signalstandorte und die charakteristischen Daten der Stellwerktechnik, von denen die Größe der Sperrzeiten abhängig ist, müssen in ALFA und ANKE genau gleich sein.
- Eine Kompatibilität der Geschwindigkeitsvorgaben muss gewährleistet werden, insbesondere in SPURPLAN durch die Anpassung von zwei Arten der Geschwindigkeitssignale, der „Zulässigen Geschwindigkeit“ und der „Zulässigen Geschwindigkeit ab Signal“.

Bei der Festlegung von **Modellzügen** wurden Züge aus vier unterschiedlichen Klassen definiert, um ein möglichst breites Spektrum potenzieller Zugfahrten in den Modellvergleich einzubeziehen. Alle Modellzüge des Testprojektes sind in Tabelle B-1 angegeben.

Die Zugcharakteristik von ANKE entspricht grundsätzlich der von ALFA. Bei eventuellen Abweichungen werden diejenigen Werte und Optionen verwendet, die in beiden Programmen zur Verfügung stehen. Dies betrifft in ANKE Triebfahrzeugbau-reihen, Wagenanzahl, Brems-hundertstel, Verspätungsniveau, Verkehrszeiten, Takte usw. Modellzüge von ALFA erfordern u.a. bei der Eingabe der Taktzeiten, der Rangziffern und des Regelzuschlages besondere Aufmerksamkeit.

Bei der **Laufwegdefinition** muss selbstverständlich die Betriebsstellenreihenfolge und Haltereihung von ANKE dem Fahrtverlauf von ALFA entsprechen. Durch die ALFA-Haltearten (Verkehrshalt, Überholungshalt und Parallelüberholungshalt im Knoten) werden Überholungsabschnitte vom Benutzer vorgegeben. In ANKE werden nur die Mindesthaltezeiten definiert, die Suche nach Überholungsmöglichkeiten und die Festlegung der Überholungsabschnitte ist dagegen weitgehend automatisiert (siehe Abschnitt 7.4.2 Seite 130).

Gattung	Zugklasse	Laufweg	Anzahl
IC	Fernreisezug	Endhausen - Rechtshausen	2 × 12
D	Fernreisezug	Endhausen - Rechtshausen	2 × 4
IR	Fernreisezug	Endhausen - Rechtshausen	2 × 7
RSB	Nahreisezug	Rechtshausen - Alfastadt	2 × 17
RSB	Nahreisezug	Alfastadt - Endhausen	2 × 17
N	Nahreisezug	Rechtshausen - Alfastadt	2 × 16
N	Nahreisezug	Alfastadt - Hochdorf	2 × 16
RB	Nahreisezug	Rechtshausen - Alfastadt	2 × 19
RB	Nahreisezug	Alfastadt - Endhausen	2 × 19
ICG	Ferngüterzug	Ceheim - Alfastadt	1 × 4
ICG	Ferngüterzug	Alfastadt - Rechtshausen	1 × 4
Üg	Nahgüterzug	Alfastadt - Mittort	1 × 2

Tabelle B-1: Modellzüge des Testprojektes

Bei der **Fahrzeitrechnung** muss beachtet werden, dass in den Modellen

- die Bremsverzögerung unterschiedlich berechnet wird und
- der Regelzuschlag in ALFA für jeden Modellzug einen Festwert bildet, während er in ANKE von der zulässigen Streckengeschwindigkeit abhängig ist.

Auch bei der Ermittlung von **Mindestzugfolgezeiten** unterscheiden sich ALFA und ANKE in einigen Aspekten. Die Mindestzugfolgezeiten werden vor allem durch die bereits erwähnten Überholungsmöglichkeiten beeinflusst. So müssen Überholungshalte in ALFA zur Gewährleistung einer Einheitlichkeit in beiden Programmen dort gesetzt werden, wo in ANKE Überholungsmöglichkeiten gefunden worden sind. Für eine bessere Anpassung kann man auch die Überholungsmöglichkeiten in ANKE mit Eingriffen in die Infrastruktur entfernen oder hinzufügen, indem man die Fahrwege in SPURPLAN überarbeitet oder die Halteplatzlängen verkürzt bzw. neue Halteplätze hinzufügt.

Weitere Abweichungen der Mindestzugfolgezeitenrechnung, die ausführlich im Abschnitt 7.4.1 diskutiert wurden, konnten teilweise nicht korrigiert werden. Sie betreffen den Parallelhalt im ALFA-Knoten und die maßgebenden Mindestzugfolgezeiten. Auch andere bisher nicht aufgezeigte Unterschiede im Modellaufbau von ALFA können die Mindestzugfolgezeiten beeinflussen. Hier ist vor allem das Bilden zusätzlicher Sperrzeitentreppe für Überholungsfälle, Zuschläge zu den Mindestzugfolgezeiten beim Kreuzen der Gegengleise durch Güterzüge und gleichrangige Behandlung der nachrangigen Zugfolgefälle in besonderen Situationen zu nennen.

In Tabelle B-2 ist eine Auswahl der Mindestzugfolgezeiten aus dem Testprojekt, die sich nach dem Abgleich für den Bahnhofskopf Ost ergaben, aufgeführt.

Mo- dell- zug	Laufweg	Mindestzugfolgezeiten [min] ALFA / ANKE						Mittlere Differenz [%]
		IC	D	RSB	N	RB	Üg	
IC	Endhausen -	3,32	2,96	2,58	2,58	2,58	2,58	2,5
	Rechtshausen	3,38	3,03	2,69	2,62	2,69	2,62	
D	Endhausen -	2,94	2,92	2,54	2,54	2,54	2,54	3,2
	Rechtshausen	2,92	2,92	2,68	2,68	2,68	2,68	
RSB	Alfastadt -	2,66	2,66	3,46	2,59	3,46	2,59	0,8
	Rechtshausen	3,23	3,28	2,90	2,68	2,80	2,68	
N	Alfastadt -	4,74	4,72	4,91	4,44	7,89	3,08	2,9
	Rechtshausen	5,24	5,29	5,01	4,16	7,82	3,15	
RB	Alfastadt -	2,67	2,67	2,91	2,60	3,56	2,60	4,2
	Rechtshausen	3,23	3,28	3,00	2,68	2,90	2,68	
Üg	Alfastadt-	6,87	6,86	6,78	5,48	6,78	4,37	1,6
	Mittort	6,96	6,88	6,84	5,56	6,84	4,68	

Tabelle B-2: Vergleich der Mindestzugfolgezeiten

Wegen Abweichungen sind die ermittelten Mindestzugfolgezeiten von ALFA und ANKE nicht genau gleich. Die Unterschiede bis etwa 5% dürften aber weitere Kapazitätsberechnungen nicht entscheidend beeinträchtigen und so zu unterschiedlichen Modellaussagen führen.

Nachdem die zu untersuchenden **Teilfahrstraßenknoten**, deren Nummern von den beiden Programmen automatisch gesetzt worden sind, anhand der Weichenbezeichnungen identifiziert wurden, konnte die Leistungsuntersuchung mit folgenden Vorgaben durchgeführt werden:

- Mindestzugfolgezeiten maßgebend für gesamte Strecke
- Überholungsabschnitte nach dem ALFA-Modell von Halt zu Halt
- Ranggleiche und -niedrigere Überholung nicht erlaubt
- Zugfolgefälle nach dem fahrplanunabhängigen Standardverfahren
- Untersuchungszeitraum von 00:00 bis 24:00 Uhr
- Variationskoeffizient der Ankunftsabstände $VtA=0,8$
- Mischungsabhängige Qualitätsmaßstäbe

Die Ergebnisse der Leistungsfähigkeitsrechnung für Teilfahrstraßenknoten sind in Tabellen B-3 und B-4 in einer einheitlichen für den Vergleich übersichtlichen Form zusammengestellt.

		Ostkopf			Westkopf		
TFK Nr.		1	2	1	2	3	4
Fahrtenanzahl		81	95	63	32	63	56
Belegungsgrad		0,201	0,221	0,160	0,085	0,126	0,113
Fahrplan	Warteschlangenlänge	0,024	0,032	0,013	0,001	0,007	0,006
	Wartezeitensumme [min]	34,700	46,500	19,000	1,800	10,400	8,700
	Zul. Warteschlangenlänge	0,144	0,138	0,142	0,131	0,142	0,143
	Qualitätsfaktor	0,170	0,230	0,090	0,010	0,050	0,040
	Hochrechnungsfaktor	1,935	1,708	2,433	5,560	3,084	3,354
Betrieb	Warteschlangenlänge	0,018	0,022	0,011	0,001	0,007	0,005
	Wartezeitensumme [min]	26,600	32,200	15,600	1,800	10,100	7,500
	Qualitätsfaktor	0,200	0,250	0,120	0,010	0,080	0,060
	Hochrechnungsfaktor	1,974	1,807	2,517	5,870	3,107	3,534

Tabelle B-3: Ergebnisse der Leistungsfähigkeitsrechnung mit ALFA

		Ostkopf			Westkopf		
TFK Nr.		26	11	6	14	12	19
Fahrtenanzahl		81	95	63	16	63	56
Belegungsgrad		0,198	0,220	0,152	0,113	0,141	0,138
Fahrplan	Warteschlangenlänge	0,022	0,030	0,011	0,003	0,008	0,008
	Wartezeitensumme [min]	31,630	42,730	15,330	4,800	11,980	10,810
	Zul. Warteschlangenlänge	0,144	0,149	0,119	0,208	0,119	0,169
	Qualitätsfaktor	0,152	0,199	0,090	0,016	0,070	0,045
	Hochrechnungsfaktor	1,996	1,800	2,468	4,613	2,702	3,157
Betrieb	Warteschlangenlänge	0,018	0,021	0,009	0,002	0,008	0,008
	Wartezeitensumme [min]	25,870	30,440	13,280	2,730	10,930	10,730
	Qualitätsfaktor	0,124	0,142	0,078	0,009	0,064	0,044
	Hochrechnungsfaktor	2,609	2,356	3,584	7,537	4,035	4,748

Tabelle B-4: Mit ANKE ermittelte Kenngrößen

Die Differenzen zwischen den Werten beider Ergebnistabellen sind in Tabelle B-5 eingetragen.

		Ostkopf			Westkopf		
TFK Nr.		1/26	2/11	1/6	2/14	3/12	4/19
Fahrtenanzahl		0	0	0	16	0	0
Belegungsgrad		0,003	0,001	0,008	-0,028	-0,015	-0,025
Fahrplan	Warteschlangenlänge	0,002	0,002	0,002	-0,002	-0,001	-0,002
	Wartezeitensumme [min]	3,070	3,770	3,670	-3,000	-1,580	-2,110
	Zul. Warteschlangenlänge	-0,001	-0,011	0,023	-0,078	0,023	-0,025
	Qualitätsfaktor	0,018	0,031	0,000	-0,006	-0,020	-0,005
	Hochrechnungsfaktor	-0,061	-0,092	-0,035	0,947	0,382	0,197
Betrieb	Warteschlangenlänge	0,000	0,001	0,002	-0,001	-0,001	-0,003
	Wartezeitensumme [min]	0,730	1,760	2,320	-0,930	-0,830	-3,230
	Qualitätsfaktor	0,076	0,108	0,042	0,001	0,016	0,016
	Hochrechnungsfaktor	-0,635	-0,549	-1,067	-1,667	-0,928	-1,214

Tabelle B-5: Vergleich der Rechnungsergebnisse (absolute Differenzen zwischen den mit ALFA und ANKE ermittelten Werten)

Es ist eine relativ gute Übereinstimmung der Ausgaben von ALFA und ANKE erkennbar. Die einzige Ausnahme bildet ein TFK, der in ALFA als TFK Nr. 2 (West) und in ANKE als TFK Nr. 14 aufgeführt ist. Ursache hierfür ist, dass in ALFA zusätzlich der Modellzug N (Rechtshausen-Alfastadt) in diesem TFK als indirekte Belegung eingetragen ist (siehe Kommentar zu Abbildung 8-1 Seite 140). In den übrigen Teilfahrstraßenknoten stimmen die Fahrtenanzahlen von ANKE und ALFA überein. Minimale Differenzen bei den Belegungsgraden gehen aus den genannten Unterschiede der Mindestzugfolgezeiten hervor. Dementsprechend weichen auch die Wartezeiten geringfügig voneinander ab.

Im **Fahrplanzustand** sind alle Werte und Faktoren bis auf einige Nachkommastellen gleich. Das spricht vor allem für eine korrekte Umsetzung des bedienungstheoretischen Ansatzes von WAKOB (Abschnitt 4.2.1 Seite 70) sowie für eine einheitliche Interpretation der DB-Richtlinien für die analytischen Kapazitätsrechnungen in ANKE und ALFA. Die Gründe für die Unterschiede bei den zulässigen Warteschlangenlängen sowie den Qualitäts- und Hochrechnungsfaktoren liegen in verfeinerten rangzifferabhängigen Qualitätsmaßstäben, die in ANKE eingeführt worden sind (siehe Abschnitt 9.1 Seite 151).

Im **Betriebszustand** sind die Abweichungen der Warteschlangenlängen ebenfalls kaum bedeutend, obwohl ANKE eine neue zuggattungsscharfe Formel für die Folgeverspätungen verwendet, die sich von dergleichen in ALFA leicht unterscheidet. Etwas größere, aber dennoch akzeptable Unterschiede weisen die Qualitäts- bzw. Hochrechnungsfaktoren wegen der erwähnten neuen Eichungswerte auf.

Für die **Gesamtfahrstraßenknoten** war im Beispielprojekt kein direkter Vergleich möglich: In ANKE wird die Formel mit bedingten Wahrscheinlichkeiten von WENDLER für GFK eingesetzt (Abschnitt 8.2 Seite 146). Dieses Verfahren erkennt die Situation, wenn die Ausschlussmatrix eines GFK in zwei oder mehrere vollständig getrennte

Bereiche geteilt werden kann. Wenn dies der Fall ist, wird der GFK als unvollständig eingestuft, so dass der Projektbearbeiter diesen GFK manuell teilen soll, was in ALFA nicht erlaubt ist. Im Testprojekt gelten beide Bahnhofsköpfe in ALFA jeweils als Gesamtfahrstraßenknoten. Eine solche Aufteilung ist jedoch nach den im Abschnitt 8.2 dargelegten Erkenntnissen unzulässig. Im Prinzip sind jedoch von beiden Programmen auch für GFK identische Ergebnisse zu erwarten, solange die Mindestzugfolgezeiten und die Qualitätsmaßstäbe vergleichbar sind.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass das neue Programm ANKE für die analytische Kapazitätsermittlung der Eisenbahnnetze anstelle des DOS-Vorgängers ALFA eingesetzt werden kann. Darüber hinaus erlaubt ANKE, die Untersuchung größerer Netze übersichtlich zu gestalten. Es bietet eine umfangreiche Funktionalität, verwendet die neuesten Erkenntnisse der Eisenbahnbetriebswissenschaft und kann sowohl für die Bewertung bestehender Fahrpläne als auch für die Infrastrukturplanung neuer Strecken verwendet werden.

Anlage C Planmäßige Wartezeiten – Vergleich mit der Simulation

Obwohl der in Anlage B vorgestellte Vergleich zwischen ANKE und ALFA ein positives Resultat erbrachte, bedurfte es dennoch einiger essentieller Änderungen in der internen Struktur von ANKE, so dass förmlich ein neues Programm entstand, dessen Komponenten, insbesondere die Fahrzeitrechnung, sich vom ursprünglichen ANKE erheblich unterscheiden. Deswegen erschien es sinnvoll, die Aussagen von ANKE zusätzlich mit Hilfe anderer, auf RUT-0 basierender Werkzeuge zu überprüfen.

Zwar können die meisten Qualitäts- und Leistungskenngrößen, wie z.B. die mittlere Warteschlangenlänge, die Leistungsfähigkeit oder deren Ausnutzungsgrad, nur mit analytischen Modellen berechnet werden, aber eine der grundlegenden Größen, die planmäßige Wartezeit, lässt sich auch mit anderen Verfahren bestimmen. Wenn ein Simulations-Referenzprogramm ebenfalls in der Lage ist, die bei der Fahrplanerstellung entstehenden Wartezeiten zu bestimmen, dann kann ein direkter Vergleich zwischen den Ergebnissen des analytischen Verfahrens und denen der Simulation hergestellt werden.

Eine mittelbare Auswertung von Wartezeiten im Fahrplan ist bereits im Konstruktionsmodul von RUT-0 enthalten. Dort kann nach der Fahrplankonstruktion der Beförderungszeitquotient als Relation der realisierten Fahrzeit zu der Mindestfahrzeit bzw. die planmäßige Wartezeit als deren Differenz für jeden einzelnen Zug vom System automatisch berechnet werden (siehe [6]). Bevor diese Größen mit den Wartezeitensummen von ANKE verglichen werden können, müssen jedoch mindestens vier Arbeitsschritte gemacht werden:

Vor der Wartezeitauswertung:

1. Generierung eines Betriebsprogramms mit zufälligen Wunschabfahrtszeiten in einem vorgegebenen Untersuchungszeitraum
2. Auflösung der Konflikte mit Berücksichtigung der Rangordnung, d.h. Erstellen eines konfliktfreien Fahrplans

Nach der Wartezeitauswertung:

3. Summierung von Wartezeiten über einzelne Züge
4. Zuweisung von Wartezeiten zu den Wartepositionen, da eine Identifizierung von Bereichen, in denen die Wartezeiten entstehen (in ANKE sind das TFK), ohne weiteres nicht möglich ist

Alle vier Arbeitsschritte müssen solange wiederholt werden, bis ein mehr oder weniger statistisch gesichertes Ergebnis erzielt wird. Das einzige geeignete Instrument zur Bewältigung dieses immensen Bearbeitungsaufwandes ist eine asynchrone Fahrplansimulation. Eigentlich wird die Simulation bereits beim Testen der bedienungstheoretischen Modelle (u.a. in [63] und [66]) als Standardmethode zur Überprüfung ihrer Aussagen verwendet. Dabei wird in der Regel nur ein einziger Überholungsabschnitt betrachtet, so dass sich die Konfliktlösung auf die Verschiebung kompletter Sperrzeitentreppe beschränkt. Aussagekräftiger wäre jedoch, die „echten“ planmäßigen Wartezeiten aus Überholen, Einfädeln und Kreuzen auch für größere Systeme mit der asynchronen Simulation zu ermitteln und mit den Aussagen von ANKE zu vergleichen.

Das Programm BABSİ (Bahnablaufsimulation, siehe Abschnitt 2.3 Seite 31), eine weitere Entwicklung des Verkehrswissenschaftlichen Instituts Aachen, erlaubt die Nachbildung der Fahrplanerstellung durch rangordnungsbezogenes Einlegen der Züge durch den Trassenmanager. BABSİ ist vor allem wegen der Kompatibilität zu RUT-0 (und somit auch zu ANKE) für einen Vergleich am besten geeignet, weil die beiden Programme dieselben Spurplan-Infrastrukturdaten verwenden und die gleichen Fahr- und Sperrzeiten berechnen. Außerdem behält BABSİ das Zugfahrten-Datenformat der RUT-0-Konstruktion, so dass die mit BABSİ erstellten Fahrpläne oder Ausgangsbetriebsprogramme in ANKE leicht übernommen werden können.

Für einen Vergleich mit ANKE mussten allerdings in BABSİ einige Erweiterungen gemacht werden:

- In einem externen Modul werden zufällige Abfahrtszeiten im vorgegebenen Zeitraum für ein Betriebsprogramm generiert
- Niederrangige Züge, die nach der Konfliktauflösung so weit verschoben werden, dass sie bei einer normalen Fahrplankonstruktion aus dem Fahrplan entfernt werden müssten, bleiben erhalten, damit ihre Verschiebung als Wartezeit interpretiert werden kann
- Die Wartezeiten in Bahnhöfen oder an den Einbruchsstellen werden aufsummiert, um diese mit den Wartezeiten in Betriebsstellen von ANKE vergleichen zu können

Der Vergleich von planmäßigen Wartezeiten von ANKE und BABSİ verfolgte noch weitere spezielle Ziele. So sollten einige in dieser Arbeit behandelte Probleme anhand der praktischen Beispiele untersucht werden, insbesondere maßgebende Mindestzugfolgezeiten (Abschnitt 7.6.1), Bemessungspunkte der Mindestzugfolgezeiten, Einflüsse des abstrakten und des tatsächlich berechneten Ankunftsstromes (Abschnitt 5.2) und Übergang vom WAKOB'schen zum HERTEL'schen Modell bei $VtA=1$, Einfluss der Warteraumkapazität. Ausführlich ist der ANKE-BABSİ-Vergleich in [58] beschrieben, hier werden neben einer kurzen Vorstellung der Testprojekte lediglich die wichtigsten Erkenntnisse aus dem Vergleich dargelegt.

C.1 Testprojekte

Den Aufbau der verwendeten Testprojekte stellt Abbildung C-1 dar.

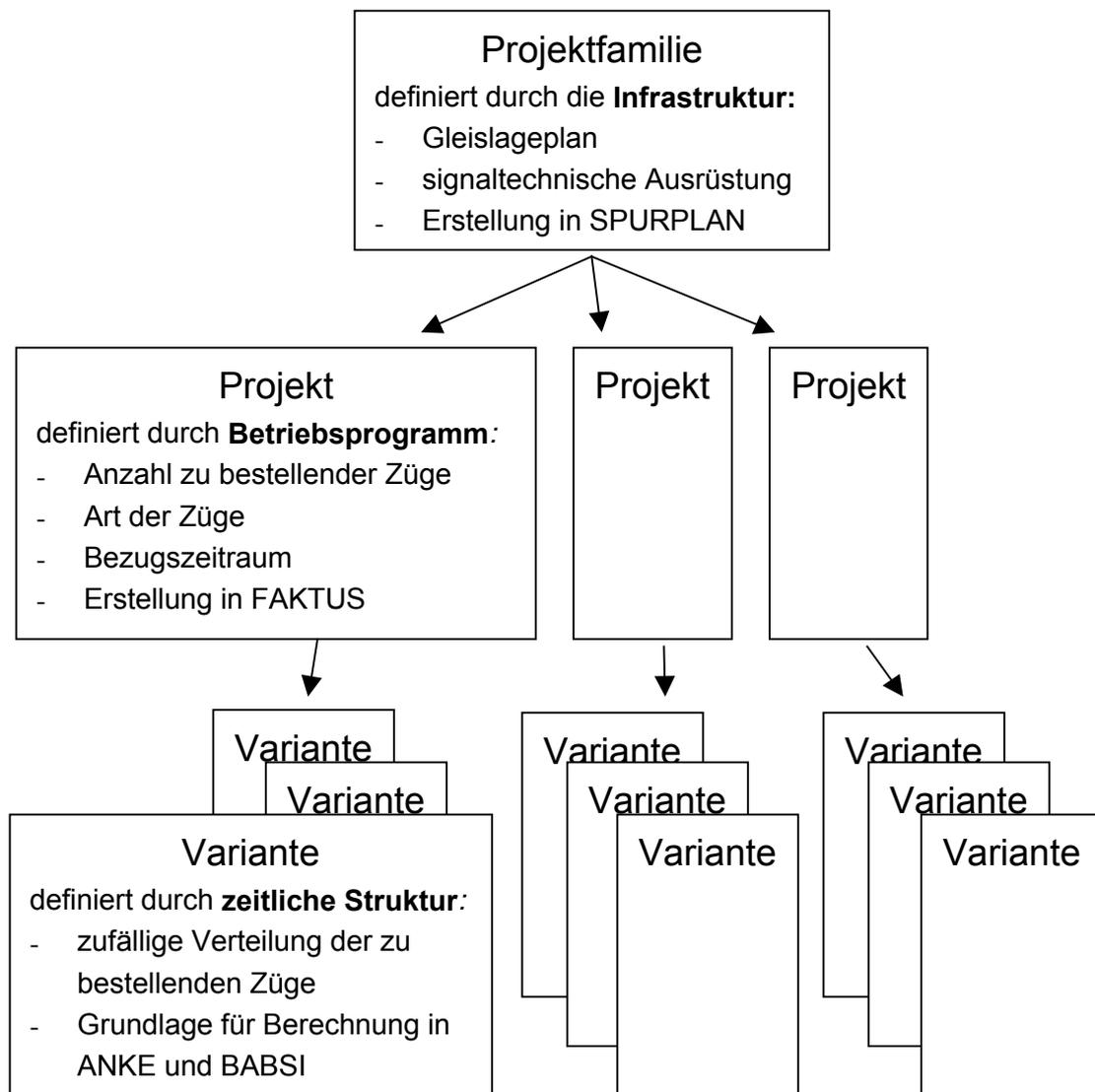


Abbildung C-1: Struktur der Testprojekte und ihre funktionellen Eigenschaften

Eine relativ einfache Infrastruktur bildet die Grundlage der Projektfamilie E (Abbildung C-2).

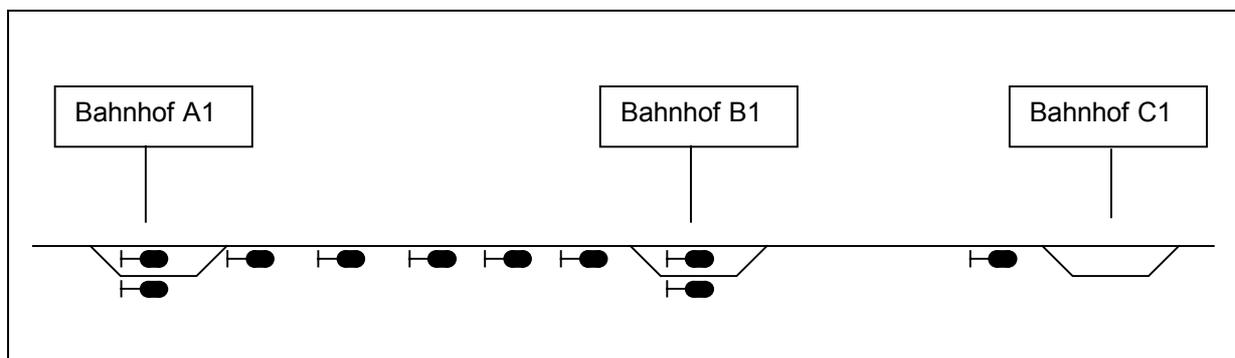


Abbildung C-2: Infrastruktur der Projektfamilie E

Drei Überholungsbahnhöfe rahmen zwei eingleisige Teilstrecken ein, die signaltechnisch nur für den Einrichtungsbetrieb ausgerüstet sind. Durch unterschiedliche Fahrplananforderungen sollen mit dieser Projektfamilie auf übersichtliche Weise aussagekräftige Kennwerte ermittelt werden.

Die Infrastruktur der Projektfamilie F (Abbildung C-3) baut auf dem Gleisplan der Projektfamilie E auf, jedoch wurden in jeder Betriebsstelle die beiden vorhandenen Überholungsgleise um eine dritte Halteposition auf einem weiteren Gleis ergänzt. Die Auswirkung der 1,5-fachen Bahnhofskapazität ist Gegenstand der Untersuchungen bei diesem Projekt.

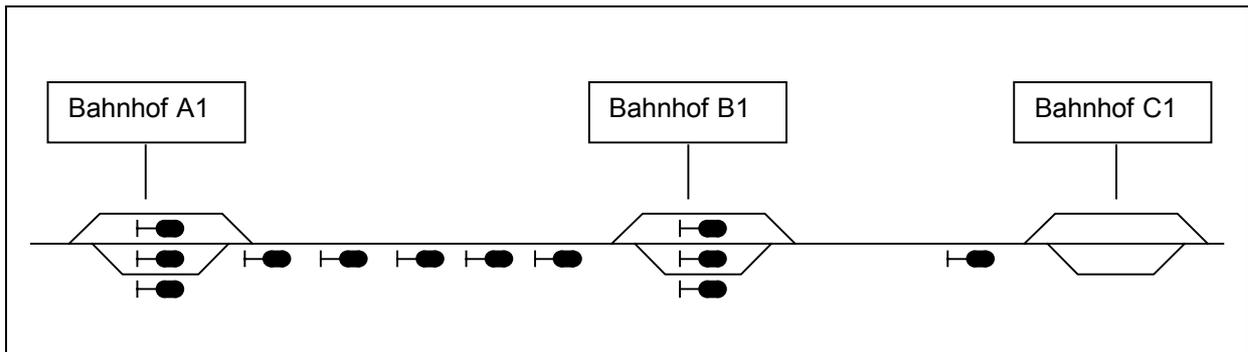


Abbildung C-3: Infrastruktur der Projektfamilie F

In der Projektfamilie T wurde eine größere Modifikation gegenüber der Projektfamilie E durchgeführt: Um einen Anhaltspunkt darüber zu erhalten, wie der Bemessungspunkt für die Mindestzugfolgezeit zu definieren ist, wurde der Bahnhof B1 zu einer Abzweigstelle ohne Überholungsmöglichkeit umgeändert. Zudem wurde die Blocklänge auf den zuführenden Strecken (von den Betriebsstellen A1 und D1 zur Abzweigstelle) gegenüber der Projektfamilie E verringert (siehe Abbildung C-4).

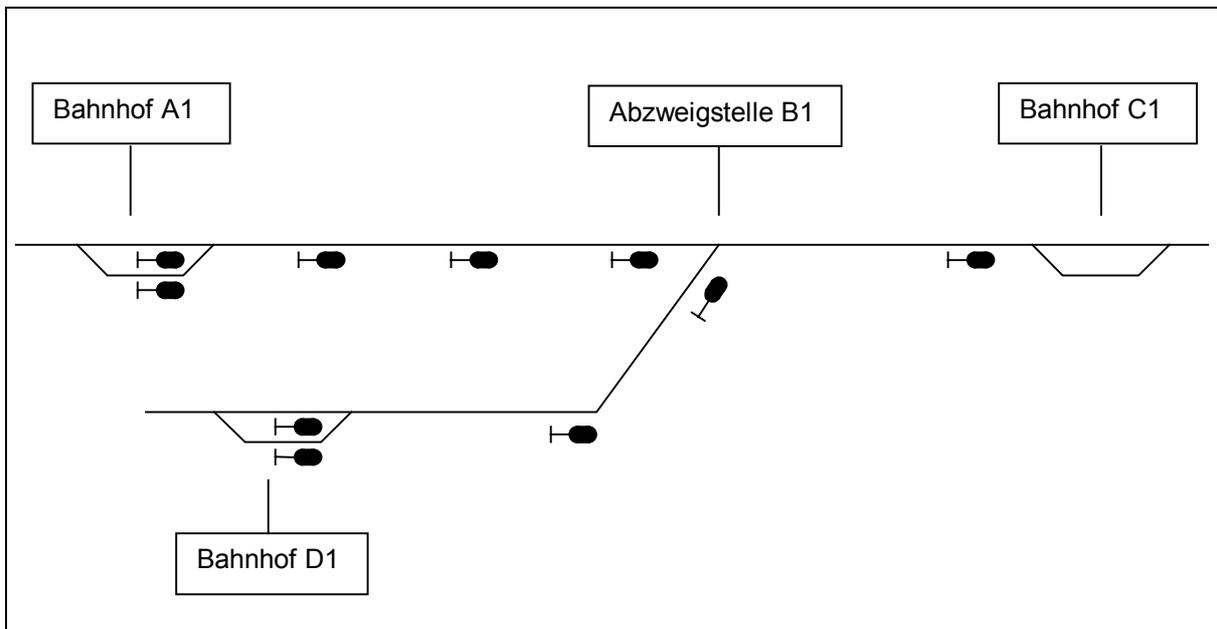


Abbildung C-4: Infrastruktur der Projektfamilie T

Sicherlich ist die signaltechnische Ausstattung der obengenannten Infrastrukturvarianten nicht so modelliert, wie es tatsächlich im Eisenbahnbetrieb vorkommen wird.

Diese Reduzierung ist notwendig, um richtungsweisende Ergebnisse ohne allzu großen Zeitaufwand erhalten zu können. Um jedoch sicherzustellen, dass die Resultate nicht nur für kleine „Laborversuche“ gelten, muss eine Berechnung der Kenngrößen auch an einem größeren Spurplan erfolgen. Deshalb ermöglicht die Infrastruktur der Projektfamilie B abschließend anhand eines realitätsnahen Gleisplans die Überprüfung der Hypothesen, die an den kleinen Infrastrukturvarianten E, F und T gewonnen wurden.

Die Projektfamilie B bietet die Möglichkeit, für verschiedene Modellzüge unterschiedlich lange Fahrten ohne Halt einzurichten und Vorgänge abzubilden, die wie z.B. das Kreuzen von Zügen in den kleinen Projekten nicht berücksichtigt werden. Die Infrastruktur baut auf dem bereits verwendeten hypothetischen Bahnhof „Alfastadt“ auf, der bei dieser Untersuchung für eine bessere Anpassung der Betriebsprogramme umgestaltet wurde (siehe Abbildung C-5).

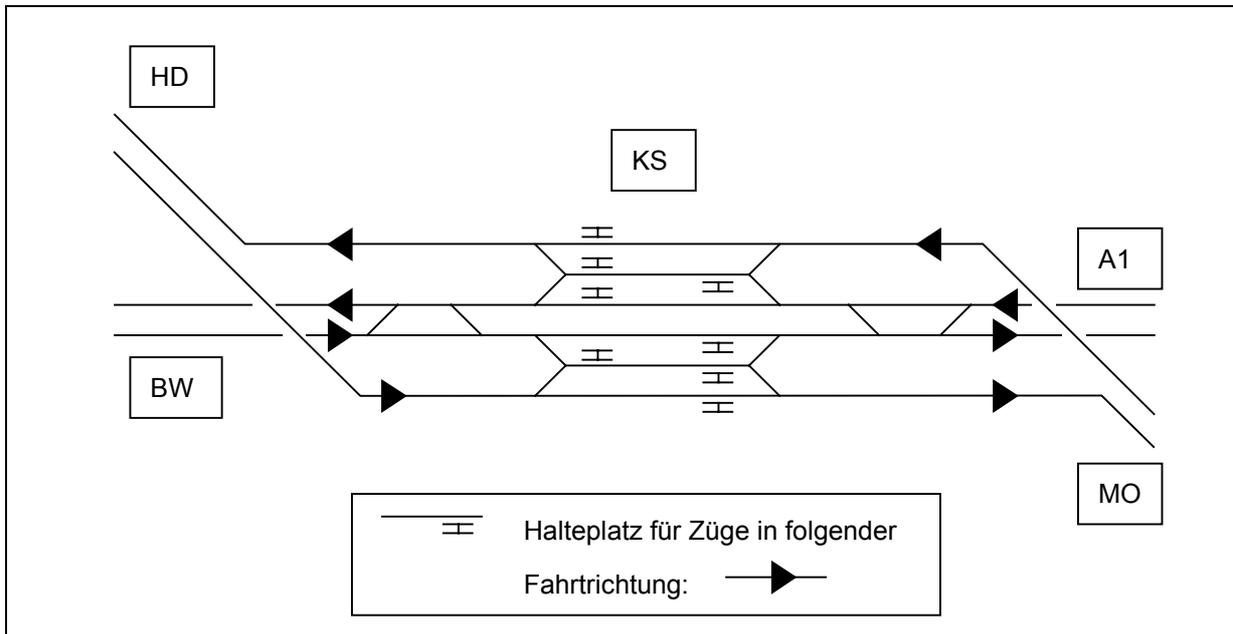


Abbildung C-5: Gleislageplan des Bahnhofs KS der Projektfamilie B

In gleichem Maße wie die Infrastruktur spielt das gewünschte Betriebsprogramm eine wesentliche Rolle. Es müssen mehrere Fahrpläne entworfen werden, um alle Einflüsse auf die entstehenden planmäßigen Wartezeiten abschätzen zu können. Es kann beispielsweise ein Fahrplan gewünscht werden, der über Züge mit nur wenigen Rangordnungen und ungefähr gleichen Geschwindigkeiten verfügt; im Gegensatz dazu kann es sich aber auch um einen sehr unterschiedlichen Fahrplan handeln, der sich aus langsamen (Güter-)Zügen und einigen Hochgeschwindigkeitszügen zusammensetzt.

Während eine Projektfamilie immer dieselben Infrastrukturdaten besitzt, sind die Projekte, die zu ihr gehören, durch das gewünschte Betriebsprogramm definiert. Innerhalb eines Projektes wird stets dieselbe Anzahl an Zügen bestellt. Der Betrachtungszeitraum, der Laufweg und die Charakteristika der Züge sind ebenfalls identisch. Unterschiedlich ist jedoch die zeitliche Verteilung der Bestellungen einzelner Züge innerhalb des Betrachtungszeitraums, was in mehreren Varianten festgehalten ist (vgl. Abbildung C-1).

C.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse des Vergleiches zwischen BABSI und ANKE sind hier bezüglich der am Anfang der Anlage C genannten Aspekte zusammengefasst präsentiert. Hierbei wird auf die in vorigen Abschnitt vorgestellten Projektfamilien verwiesen.

C.2.1 Unterschiede in Warteschlangemodellen

Die erste Aufgabe der Vergleichsstudie war die Untersuchung einer gleichzeitigen Verwendung zweier bedienungstheoretischer Ansätze. Alle analytischen Modelle enthalten im Bereich um $VtA \approx 1$ eine erhebliche Unschärfe. Bei $VtA=1$ findet in ANKE ein Übergang vom quasi-exakten bedienungstheoretischen Modell nach WAKOB (Abschnitt 4.2.1) zum Wartemodell GI/GI/1 von HERTEL (Abschnitt 4.2.2) statt. Der Nachteil dieses Übergangs besteht in der unterschiedlichen Ermittlung der planmäßigen Wartezeit der beiden Modelle. Um die Größe des Sprunges der Wartezeitfunktion am Grenzpunkt einzuschätzen, wurden aus einem Projekt der Projektfamilie E Wartezeiten entnommen, die in verschiedenen Teilfahrstraßenknoten durch die Veränderung des Variationskoeffizienten der Ankünfte beim unveränderten Betriebsprogramm ermittelt wurden.

Wie die Abbildungen C-6 und C-7, die den Einfluss von VtA in zwei verschiedenen TFK darstellen, belegen, ist tatsächlich ein Sprung an der Modellübergangsgrenze zu verzeichnen. Dessen relative Größe variiert in Abhängigkeit vom Belegungsgrad, wobei der Unterschied oft beachtlich ist.

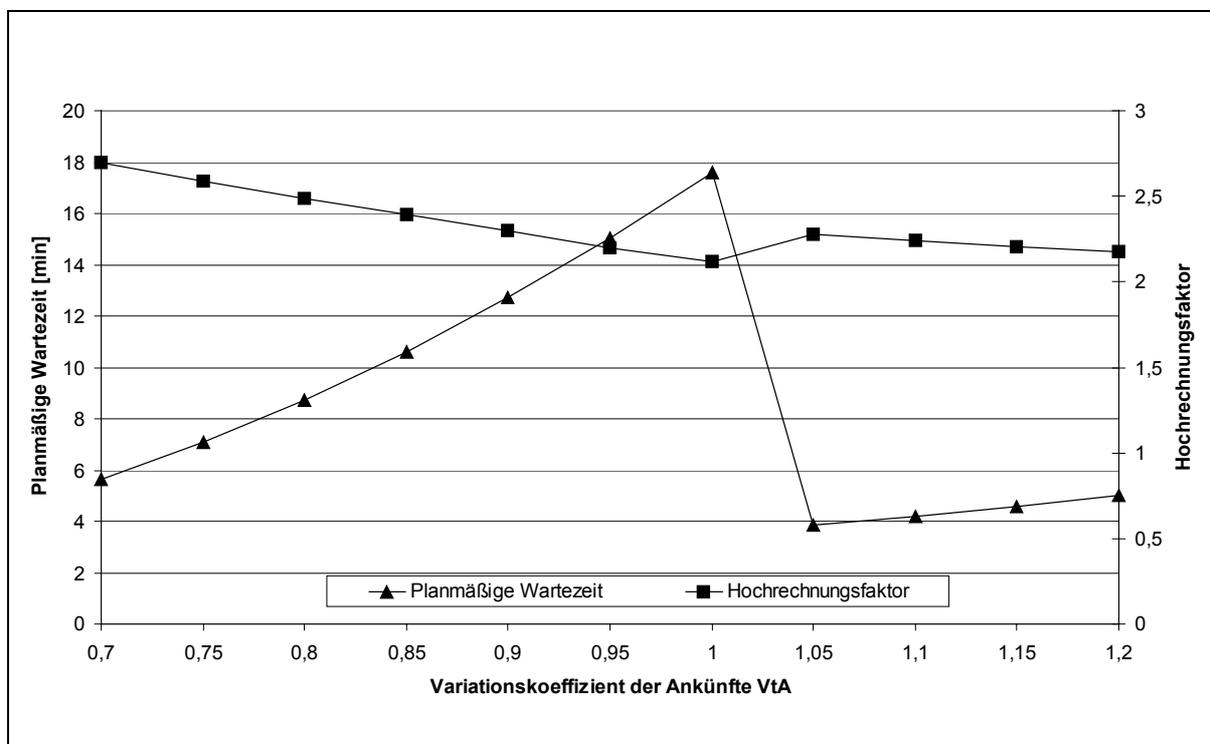


Abbildung C-6: : Einfluss des VtA auf die planmäßige Wartezeit (TFK 2)

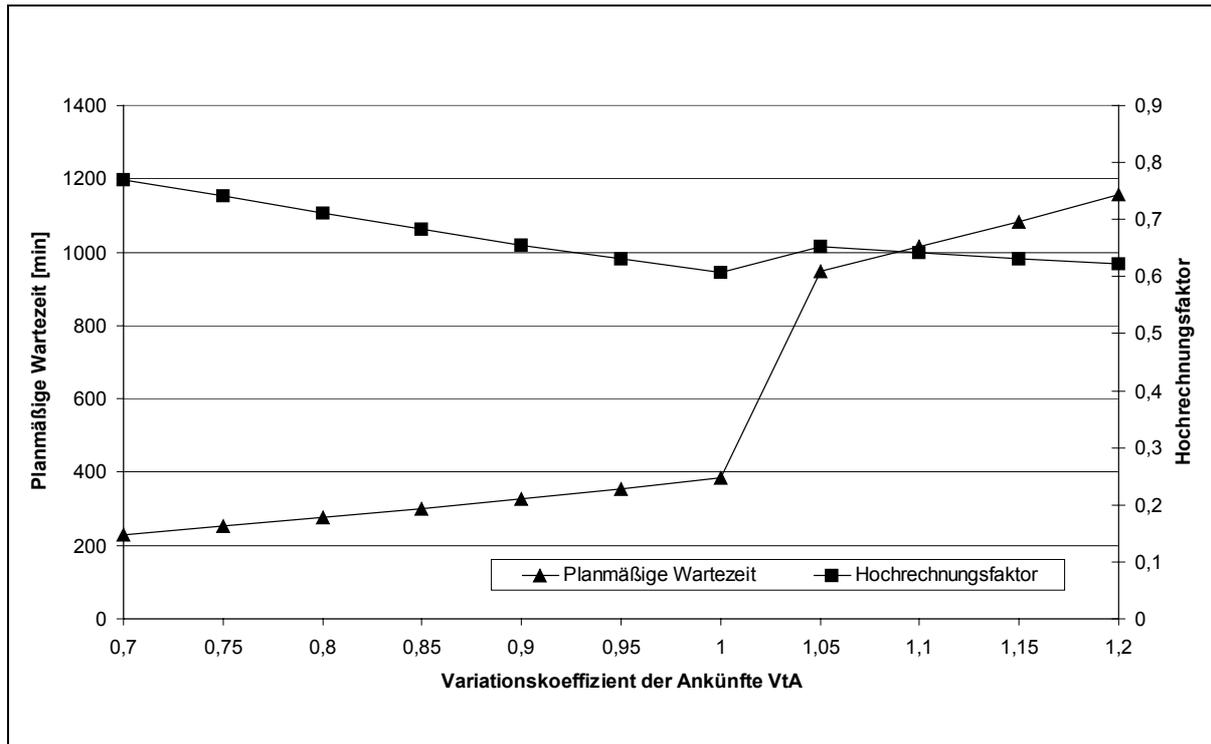


Abbildung C-7: Einfluss des V_{tA} auf die planmäßige Wartezeit (TFK 3)

Betrachtet man jedoch den Hochrechnungsfaktor, eine absolute Kenngröße, die durch eine iterative Anpassung des Belegungsgrades an die optimale Warteschlangenlänge ermittelt wird, fällt der Sprung nicht mehr so deutlich aus.

In dem Übergangsbereich würde noch Forschungsbedarf bestehen, wenn man den Wartezeiten im Fahrplan mehr Gewicht zumessen würde. Da dies nicht der Fall ist und $V_{tA} > 1$ nur in stark vertakteten Fahrplänen auftritt, kann die Unschärfe hingenommen werden. Es empfiehlt sich also, bei den Leistungsuntersuchungen mit ANKE nur eines der vorgesehenen bedienungstheoretischen Modelle zu benutzen, und nicht beide gleichzeitig (Dies kann durch eine Vorgabe des Variationskoeffizienten der Ankunftsabstände gewährleistet werden).

C.2.2 Abstrakter oder berechenbarer Ankunftsprozess

In Abbildung C-8 ist die Wartezeitenkurve eines TFK in Abhängigkeit vom V_{tA} dargestellt. Sie verdeutlicht noch einmal, dass die mit den bedienungstheoretischen Modellen berechneten Kenngrößen sehr stark von der Wahl des Ankunftsprozesses beeinflusst werden.

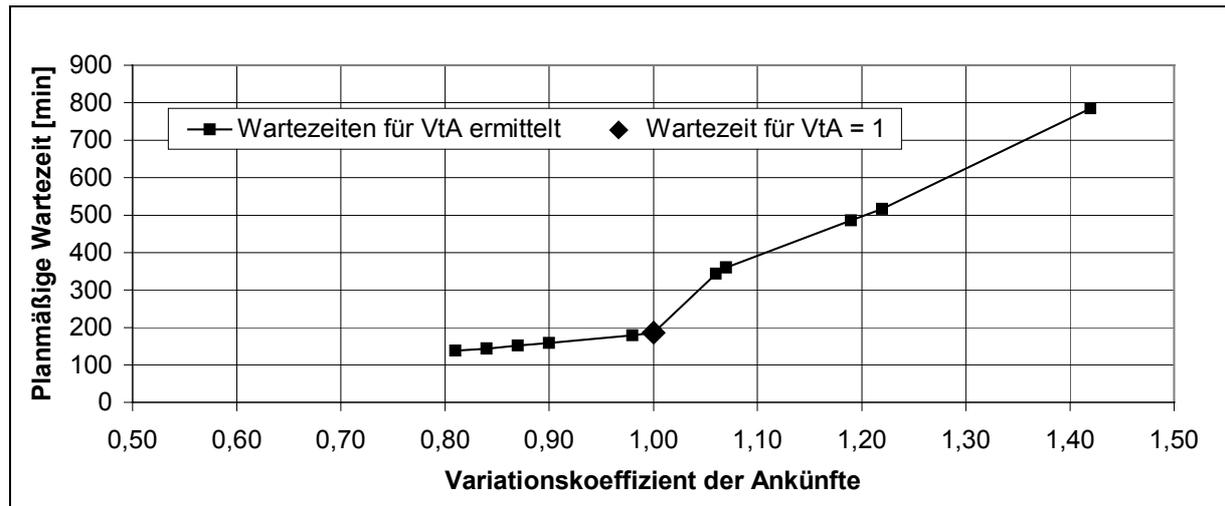


Abbildung C-8: Verteilung des VtA in Varianten des Projekts E1 – TFK 3

Auch im Zusammenhang mit dem anderen Problem – dem Einfluss von maßgebenden Mindestzugfolgezeiten – ist die Wirkung des abstrakten Ankunftsprozesses nicht zu unterschätzen. In Tabelle C-1 sind die Gesamtsummen von Wartezeiten aus zwei Testprojekten aufgeführt. Daraus wird im übrigen nicht eindeutig ersichtlich, ob die Annahme eines abstrakten Ankunftsprozesses zu zu optimistischen oder zu pessimistischen Aussagen führt.

Projekt	Mindestzugfolgezeit				Ver- gleich: BABSİ
	aus den Überholungsabschnitten		maßgebend für ganze Strecke		
	VtA ermittelt	VtA = 1	VtA ermittelt	VtA = 1	
E1	329,8	194,7	653,3	372,8	400,5
B1	329,3	501,4	598,3	829,9	673,3

Tabelle C-1: Einfluss des VtA auf planmäßige Wartezeiten in den Projekten E1 und B1

In der rechten Spalte sind hier die Wartezeitensummen aus BABSİ enthalten, die über zehn Varianten des jeweiligen Projektes gemittelt werden.

Eindeutiger sind dagegen die Ergebnisse der Wartezeitenberechnung aus einem Projekt der Projektfamilie T, die im Diagramm (Abbildung C-9) schematisch im Vergleich zur Simulation dargestellt werden. Die Balken illustrieren hier die Wartezeitensummen aus BABSİ, und die Kurven charakterisieren das Verhältnis zwischen den Wartezeiten aus ANKE zu den von BABSİ ermittelten Werten. In diesem Fall stimmen die Ergebnisse im Bereich von VtA=1 mit den Wartezeiten aus BABSİ sehr genau überein. Mit einer Abweichung von -16,1% lässt sich von einer recht guten Korrelation der Modelle ANKE und BABSİ sprechen.

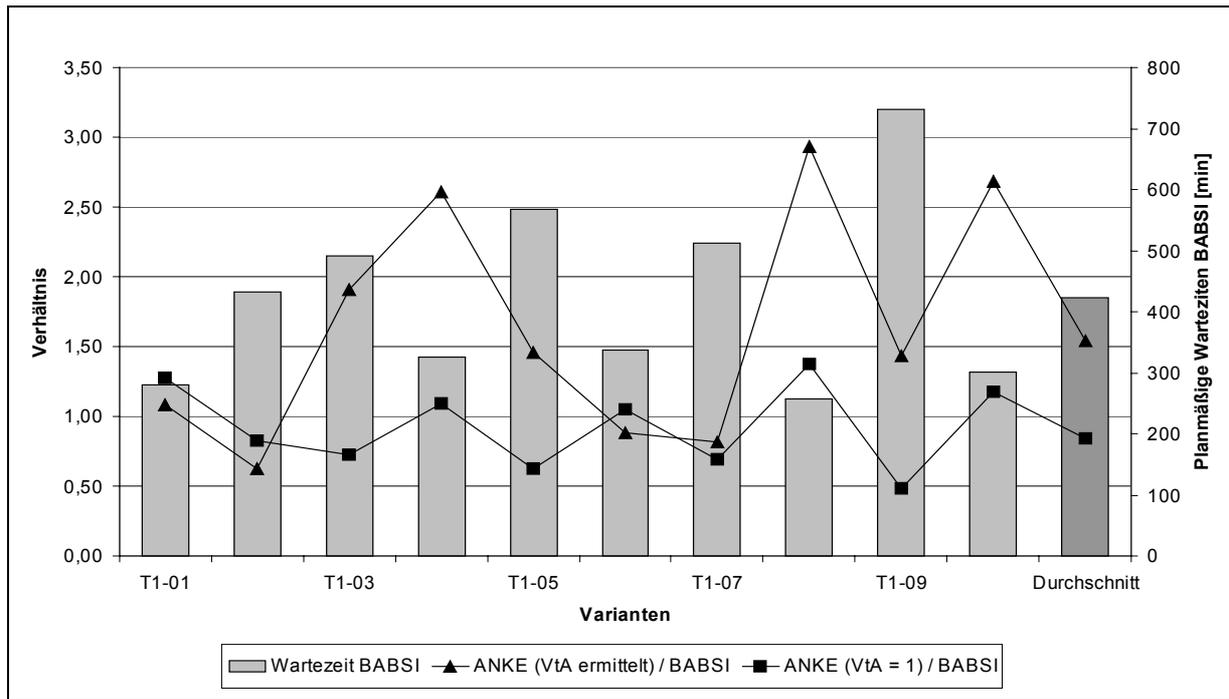


Abbildung C-9: Planmäßige Wartezeiten im Projekt T1 (Mindestzugfolgezeiten aus Überholungsabschnitten)

C.2.3 Art der Mindestzugfolgezeiten

Die folgenden zwei Diagramme (Abbildung C-10 und Abbildung C-11), sowie Tabelle C-2 zeigen, dass die theoretisch begründete Verwendung von Mindestzugfolgezeiten aus Überholungsabschnitten auch in der Praxis Bestätigung findet.

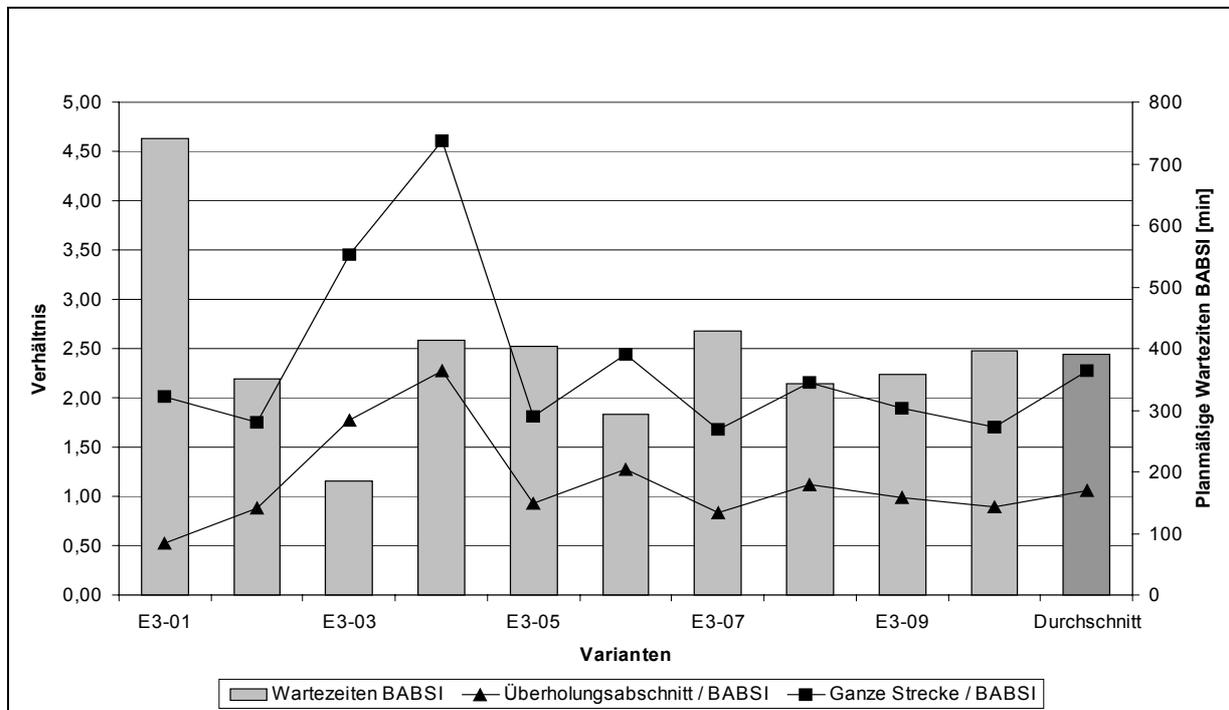


Abbildung C-10: : Art von Mindestzugfolgezeiten – Wartezeitensumme (Projekt E3)

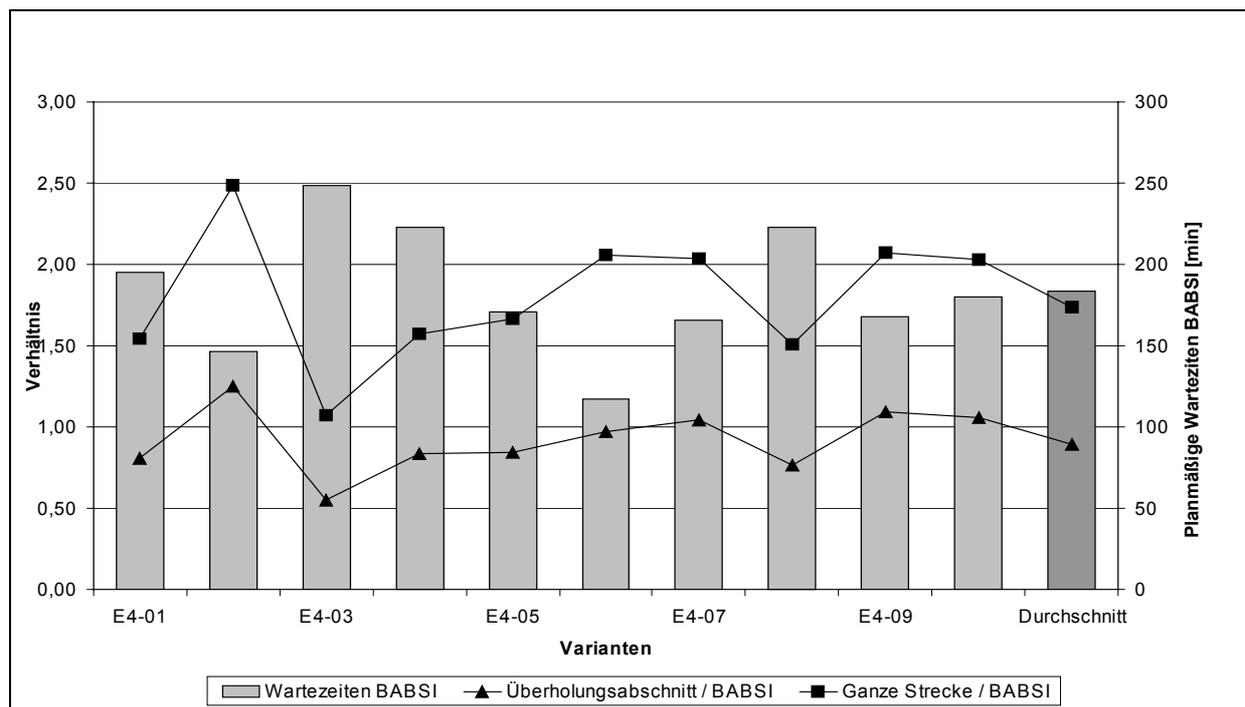


Abbildung C-11: Art von Mindestzugfolgezeiten – Wartezeitensumme (Projekt E4)

Bei den Schwankungen in Tabelle C-2 (hier wird VtA automatisch berechnet) erscheint allerdings eine Betrachtung der einzelnen Varianten nicht aussagekräftig genug zu sein, um das Verhalten der beiden Verfahren miteinander zu vergleichen. Dies erklärt sich aus der Berücksichtigung des in den einzelnen TFK ermittelten VtA , dessen Werte stark streuen. Die Betrachtung des Mittelwertes zeigt jedoch, dass eine Definition der Mindestzugfolgezeiten aus dem jeweiligen Überholungsabschnitt Werte liefert, die näher an der Simulation liegen. Die Abweichung liegt in diesem Fall bei -17,7%.

	ANKE		BABSİ
	Überholungsabschnitt	Ganze Strecke	
Mittelwert	329,8 min	653,3 min	400,5 min
Spannweite	645,5 min	1293,3 min	667,7 min
Standardabweichung	215,6 min	432,9 min	193,4 min

Tabelle C-2: Zusammenstellung der Ergebnisse aus dem Projekt E1

Nicht mehr so deutlich sind die Vergleichsergebnisse für das umfangreichere Projekt B1 (Abbildung C-12, $VtA=1$).

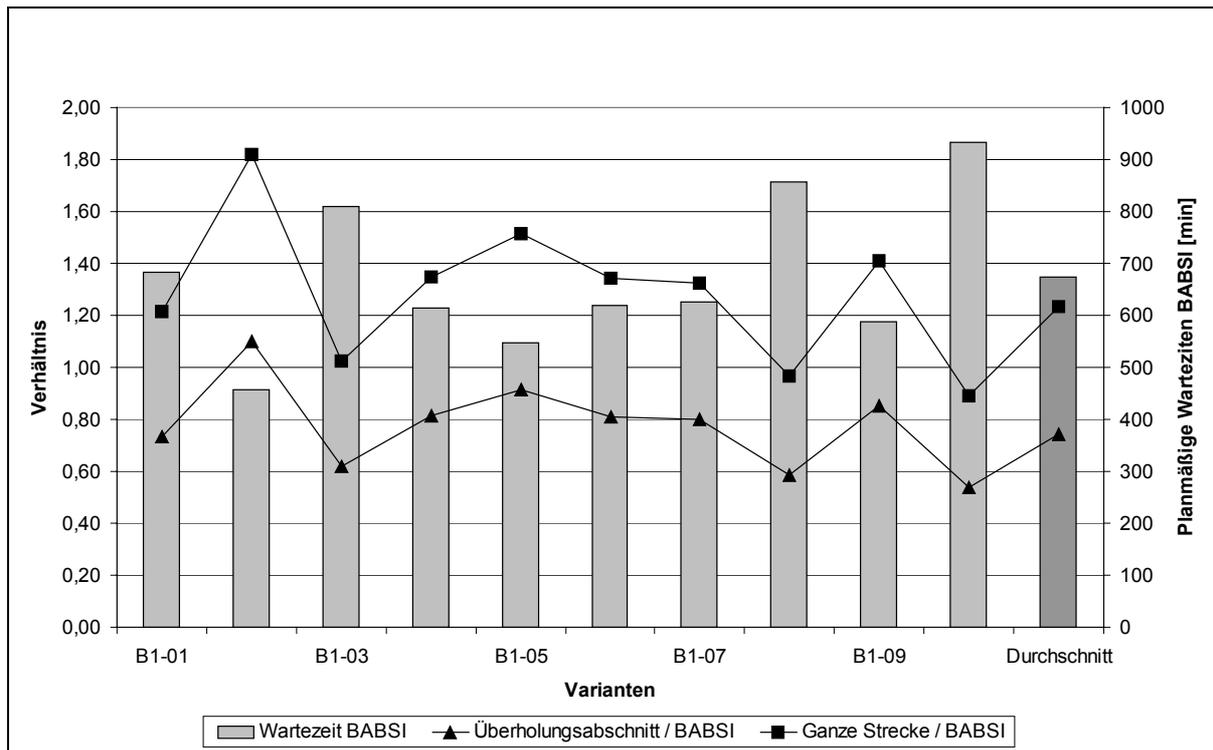


Abbildung C-12: Art von Mindestzugfolgezeiten – Wartezeitensumme (Projekt B1)

In diesem Projekt, in dem ein kleiner Netzausschnitt abgebildet ist, zeigt sich, dass die Wartezeiten, die mit der maßgebenden Mindestzugfolgezeit aus dem gesamten gemeinsam befahrenen Abschnitt berechnet werden, von den Simulationsergebnissen durchschnittlich etwa genauso geringfügig abweichen, wie die Wartezeiten bei der Verwendung von Mindestzugfolgezeiten aus Überholungsabschnitten. Die analytisch ermittelte Wartezeit weicht für den Fall „Überholungsabschnitt“ um -25,6% vom Simulationsergebnis ab, für den Fall „Gesamte Strecke“ um 23,3%. Dafür sind unter anderem folgende Begründungen möglich:

- Der Belegungsgrad, der im Projekt B1 in der Option „Überholungsabschnitte“ bei durchschnittlich 0,17 liegt und somit halb so groß ist, wie z.B. im Projekt E1, hat einen entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis der Wartezeitenrechnung. Durch die besondere Infrastruktur steigt der Belegungsgrad im leistungsfähigeren TFK des Projekts E1 inkorrekt um das 3,5-fache, wenn anstelle der Mindestzugfolgezeit aus Überholungsabschnitten die maßgebende aus der gesamten Strecke verwendet wird.
- Die Simulationsergebnisse dürfen nicht in allen Fällen für absolut korrekt gehalten werden, denn die Größe der mit der asynchronen Simulation ermittelten Wartezeit ist in gewisser Hinsicht von der gewählten Strategie zur Konfliktlösung abhängig. Außerdem ist die Anzahl der Simulationsläufe (in dieser Studie waren es zehn für jedes Projekt) auf jeden Fall zu gering, um ein statistisch gesichertes Ergebnis zu erzielen.

C.2.4 Einfluss der Warteraumkapazität

In der Projektfamilie F wurde der Einfluss der Überholungsgleisanzahl auf die in der Simulation ermittelten planmäßigen Wartezeiten überprüft. Die Zahl der Überho-

lungsgleise repräsentiert nämlich die Zahl der Bedienungsstellen im Bedienungssystem, die bei den hier verwendeten analytischen Wartezeitmodellen als unendlich groß angenommen wird.

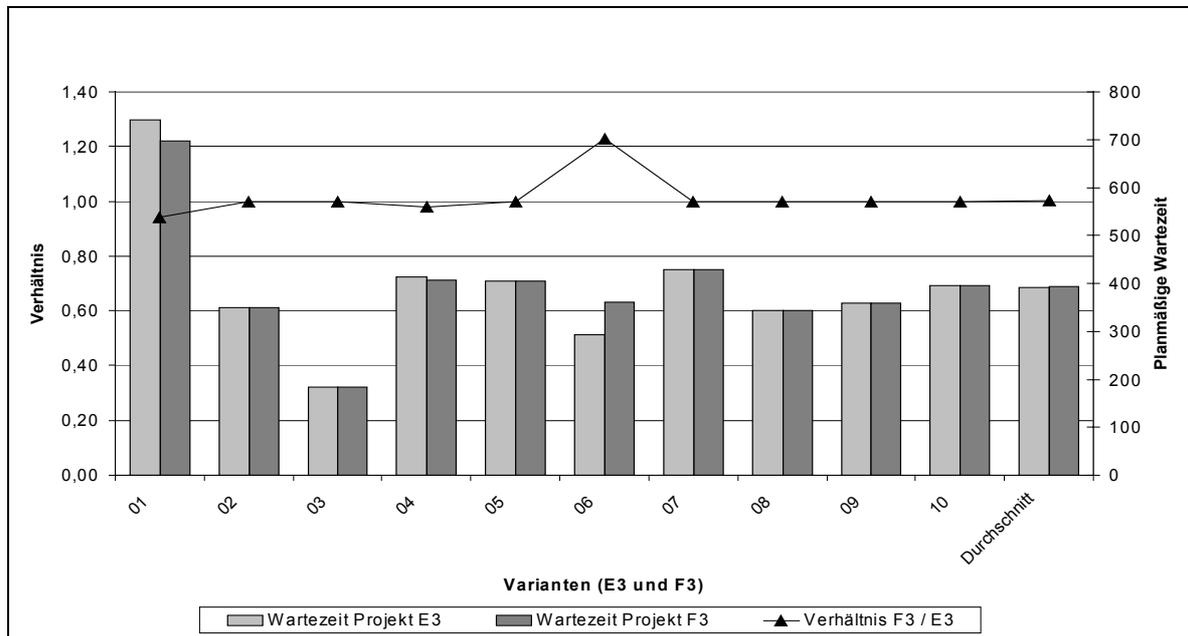


Abbildung C-13: Einfluss der Überholungsgleiskapazität

Die Simulation reagiert überraschenderweise kaum auf die Erhöhung der Überholungskapazität, wie Abbildung C-13 zeigt. Es zeigt sich, dass die größere Gleisanzahl keinen entlastenden Einfluss auf die bei der Fahrplankonstruktion entstehende Gesamtwartezeit hat. Dieses Verhalten bestätigt einerseits die Aussagen der analytischen Modelle, die ebenfalls keine Verringerung der Wartezeit berechnen können. Andererseits spricht es eher für einen Verbesserungsbedarf im verwendeten Simulationsprogramm als für eine Gesetzmäßigkeit.

C.3 Fazit aus dem Testvergleich

Die Ergebnisse aus der Berechnung der planmäßigen Wartezeiten durch das analytische Programm ANKE und die Bahnablaufsimulation BABSİ bewegen sich beim Mittelwert der untersuchten Projekte in derselben Größenordnung. Da die Wartezeit eine wichtige Berechnungsgrundlage für weitere Kenngrößen im Eisenbahnfahrplan ist, kann auch dort eine Übereinstimmung erwartet werden. Trotz aller Gemeinsamkeit der Ergebnisse bleibt klar, dass die Simulation bei bekanntem Fahrplan und bei besonders zu berücksichtigenden Strukturen die verlässlicheren Ergebnisse liefern wird. Die analytischen Verfahren dagegen werden auch zukünftig ihre Stärke in der schnellen Bewertung von Infrastrukturmaßnahmen haben, bei denen ein zukünftiges Betriebsprogramm noch nicht genau vorhergesehen werden kann.

Lebenslauf

Name:	Sergey Vakhtel
Geburtstag, -ort:	30.03.1971, Gemeinde Tselinnyj, Schirinsker Bezirk, Land Krasnojarsk der UdSSR (heute Autonome Republik Chakasia, Russische Föderation)
Familienstand:	verheiratet seit 26.10.1991, zwei Kinder
Staatsangehörigkeit	russisch
Schulbildung:	
1978-1986	Hauptschule Nr.19 der Stadt Krasnojarsk
1986-1988	Abitur an der Hauptschule Nr.19 der Stadt Krasnojarsk
Berufsausbildung:	
1988-1994	Studium an der „Akademie für Luft- und Weltraumforschung Sibiriens“ (SAA) in Krasnojarsk, Russland
Während des Studiums	
August bis Dezember 1989	Praxissemester am Krasnojarsker Maschinenbauwerk
September 1991 bis Mai 1992	Praxissemester als Assistent am Lehrstuhl für Systemanalyse und Operations Research der SAA
Oktober bis Dezember 1993	Praxissemester am Forschungsinstitut für anwendungsorientierte Wissensverarbeitung an der Universität Ulm, Deutschland
Fortbildung und Berufserfahrung:	
Juni 1994 bis Juli 1995	Promotionsstudium an der Aspirantur der SAA
August 1994 bis Juli 1995	Tätigkeit am Lehrstuhl für Maschinenbau der SAA als Assistent - Softwareentwickler
Januar bis Juli 1995	Teilnahme im Projekt zur Entwicklung des Automatisierungssystems am Forschungsinstitut für Wärmekraftwerke in Krasnojarsk
August 1995 bis Juli 1996	Forschungsarbeit bei dem Lehrstuhl für Angewandte Mathematik insbesondere Informatik (Prof. Dr. W. Oberschelp) der RWTH Aachen im Rahmen eines Stipendiums des Deutschen akademischen Austauschdienstes
August 1996 bis September 2000	Promotionsstudium und Arbeit am Projekt „Analytische Netzkapazitätsermittlung“ am Verkehrswissenschaftlichen Institut der RWTH Aachen (Univ. -Prof. Dr. Ing. W. Schwanhäuser).
Seit Oktober 2000	Beschäftigung an der Firma TLC-Transport-, Informatik- und Logistik-Consulting GmbH, Deutsche Bahn Gruppe