

Von der Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“  
an der Technischen Universität Dresden  
**genehmigte Dissertation**  
zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

**Ein Beitrag zur Nutzbarmachung  
Genetischer Algorithmen  
für die optimale Steuerung und Planung  
eines flexiblen Stadtschnellbahnbetriebes**

von Dipl.-Ing. Thomas Albrecht  
geboren am 11. Juli 1975 in Dresden

Eingereicht am 13. Dezember 2004  
Tag der Verteidigung: 4. Mai 2005

Promotionskommission:

Prof. Dr. rer. nat. habil. Karl Nachtigall (TU Dresden, Vorsitzender)

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.h.c. Horst Strobel (TU Dresden, Betreuer der Arbeit, 1. Gutachter)

Prof. Dr.-Ing. Eckehard Schnieder (TU Braunschweig, 2. Gutachter)

Prof. Dr.-Ing. Arnd Stephan (Institut für Bahntechnik GmbH, TU Dresden, 3. Gutachter)

Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut Biesenack (TU Dresden)



# Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der Technischen Universität Dresden, dem Lehrstuhl für Verkehrsleitsysteme und -prozessautomatisierung unter der Leitung von Herrn Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. H. Strobel.

Inhalt dieser Tätigkeit war die Mitwirkung an dem von Prof. Strobel initiierten Forschungsprojekt „intermobil Region Dresden“, das als Teil des nationalen Forschungsprogramms „Mobilität in Ballungsräumen“ vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unter der Projektnummer 19 B 9907 A 8 gefördert worden ist.

Für die Durchsetzung dieses Forschungsprojekts, ohne das diese Arbeit nicht entstanden wäre, und insbesondere für die intensive Betreuung dieser Arbeit gebührt Herrn Professor Strobel außerordentlicher Dank. Durch die ständig neue Motivation und die wertvollen Hinweise zum Aufstöbern und Erkunden der entscheidenden „Tiefbohrlöcher“ wurden Ideen verwirklicht, an die zu Beginn dieser Tätigkeit nicht im Entferntesten zu denken war.

Nicht minder herzlicher Dank gebührt Herrn Prof. Schnieder und Herrn Prof. Stephan für die Erstellung der weiteren Gutachten sowie Herrn Prof. Nachtigall für die Übernahme des Vorsitzes der Promotionskommission. Als weiterem Mitglied der Promotionskommission danke ich Herrn Prof. Biesenack. Ihm und Prof. Stephan bin ich besonderem Dank verpflichtet für die wichtigen Hinweise und Ratschläge zu Verständnis und Modellierung von Anlagen der Bahnenergieversorgung. Weiterhin danke ich Jean-Michel Erbin, Christian Beche und Ghislain Descarpentries aus dem französischen Verkehrsunternehmen KEOLIS, dem weltweit größten Betreiber automatischer U-Bahnen, für ihre Unterstützung bei der praxisnahen Simulationserprobung der gewonnenen Erkenntnisse für die fahrerlose Metro VAL in Lille (Nordfrankreich).

Den Herren Steffen Oettich, Sven Scholz und Burkhard Richter danke ich für die gute fachliche Zusammenarbeit in der Arbeitsgruppe *Eisenbahn* des Lehrstuhls und auch allen anderen Kollegen für die freundliche und inspirierende Arbeitsatmosphäre.

Schließlich danke ich meiner Familie und meinen Freundinnen und Freunden, ohne die ich kaum die Kraft gefunden hätte, diese Arbeit zu ihrem Ende zu bringen.

Thomas Albrecht  
Delft, 30. Juni 2005



# Inhaltsübersicht<sup>1</sup>

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Die Ausgangssituation . . . . .	1
1.2	Nachfrageorientierte Optimierung der Zugfolgezeiten und die automatische Ermittlung flexibler Fahrpläne: Der angestrebte Beitrag zur Optimierungsebene 2 . . . . .	4
1.3	Die Energiekosten und Störungen minimierende Flexibilisierung von Anfahr- und Bremsvorgängen: Der angestrebte Beitrag zur Optimierungsebene 3 . . . . .	8
1.4	Der gewählte Lösungsweg . . . . .	11

## Teil I Analyse des internationalen Entwicklungsstands

<b>2</b>	<b>Bisher bekannt gewordene Verfahren zum Entwurf flexibler Betriebsregime</b>	<b>15</b>
2.1	Automatische Berechnung flexibler Fahrpläne für Stadtschnellbahnen . . . . .	15
2.2	Flexibilisierung und Synchronisierung von Anfahr- und Bremsvorgängen bei Stadtschnellbahnen . . . . .	17
2.3	Konsequenzen für das Untersuchungsgebiet dieser Arbeit . . . . .	21
<b>3</b>	<b>Genetische Algorithmen: Das methodische Instrumentarium und die bisher bekannt gewordenen Anwendungen zur Optimierung des Eisenbahnbetriebs</b>	<b>23</b>
3.1	Methodische Grundlagen . . . . .	23
3.2	Bisher bekannt gewordene Ansätze zur Nutzbarmachung Genetischer Algorithmen für die Optimierung des Eisenbahnbetriebs . . . . .	33
3.3	Schlussfolgerungen für die Präzisierung der Aufgabenstellung dieser Arbeit . . . . .	37

<sup>1</sup>Im Interesse der Übersichtlichkeit erfolgt hier eine Beschränkung auf die Angabe der mit zwei Ziffern gekennzeichneten Abschnitte.

**Teil II**  
**Ein neues Verfahren zur automatischen Ermittlung flexibler Fahrpläne im  
nachfrageorientierten S-Bahn-Betrieb**

<b>4</b>	<b>Gütekriterien für die Fahrplangestaltung im flexiblen Betrieb</b>	<b>41</b>
4.1	Gütekriterien aus Fahrgastsicht . . . . .	41
4.2	Mögliche Gütekriterien für den Betreiber . . . . .	43
4.3	Weitere mögliche Gütekriterien allgemeiner Art . . . . .	45
4.4	Einführung einer mehrkriteriellen Gütefunktion . . . . .	47
<b>5</b>	<b>Ein mehrstufiges Verfahren unter Verwendung Genetischer Algorithmen</b>	<b>49</b>
5.1	Ein- und Ausgabedaten sowie Anwendungsgebiete des Verfahrens . . . . .	49
5.2	Ablauf des Verfahrens . . . . .	53
5.3	Transformation des Verkehrsaufkommens anhand der Reisezeiten . . . . .	54
5.4	Ermitteln von Fahrtenhäufigkeit und Kapazität der einzelnen Linien anhand des Verkehrsaufkommens . . . . .	61
5.5	Herausfiltern und Festlegen eines invarianten Mindestangebots . . . . .	71
5.6	Finden von Abfahrtszeiten der zu disponierenden Fahrten unter Verwendung Ge- netischer Algorithmen . . . . .	75
5.7	Umlaufplanung und Disposition von Leerfahrten . . . . .	91
<b>6</b>	<b>Fallstudien zur S-Bahn Dresden</b>	<b>95</b>
6.1	Grundständige Flexibilisierung eines Angebots: Erstellung eines flexiblen Be- triebsregimes für das Szenario M2-PZB (Langzeitstrategie nach Abschluss des In- frastrukturausbaus und Realisierung eines Fahrzeugneubeschaffungsprogramms, ALFa-S) . . . . .	97
6.2	Parameteroptimierung für den Einsatz ALFa-J/S . . . . .	98
6.3	Angebotsflexibilisierung als operative Planung: Wochenendausflugsverkehr als Beispiel für kurzfristige Modifikationen vorhandener Betriebsregime (ALFa-E) . .	103
6.4	Das Simulationswerkzeug SIMflex-S . . . . .	107

## Teil III

### Neue Ansätze zur störungs- und energiekostenminimierenden Flexibilisierung von Anfahr- und Bremsvorgängen in einem System von Stadtschnellbahnzügen

<b>7 Gütekriterien und Modellierung des elektrischen Stadtschnellbahnbetriebs</b>	<b>115</b>
7.1 Verfahren zur Preisbildung für elektrische Energie im Stadtschnellbahnbetrieb: Ableitung der Gütekriterien . . . . .	115
7.2 Modellierung der Fahrt eines Zuges auf einem Streckenabschnitt zwischen zwei Halten . . . . .	118
7.3 Modellierung des elektrischen Verhaltens des Triebfahrzeugs . . . . .	125
7.4 Modellierung der Anlagen der Bahnenergieversorgung . . . . .	127
<b>8 Flexibilisierung und Synchronisierung von Anfahr- und Bremsvorgängen mit Hilfe Genetischer Algorithmen</b>	<b>139</b>
8.1 Reduktion von Energiekosten in Phasen mit konstanter Zugfolgezeit . . . . .	140
8.2 Optimierung von Übergängen zwischen verschiedenen Zugfolgezeiten . . . . .	150
<b>9 Fallstudien: Die vollautomatische Metro VAL in Lille und die S-Bahn Berlin</b>	<b>157</b>
9.1 Optimierung von Fahr- und Haltezeiten in Phasen konstanter Zugfolgezeit . . . . .	157
9.2 Analyse von Übergängen zwischen verschiedenen Zugfolgezeiten für die Linie 1 der Metro vom Typ VAL in Lille . . . . .	182

## Teil IV

### Zusammenfassung und Anlagen

<b>10 Zusammenfassung und weiterer Untersuchungsbedarf</b>	<b>189</b>
Literaturverzeichnis	191
Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Formelzeichen	A - 1
Struktogramme für die Beseitigung von Konflikten (Anlagen zu Kapitel 5)	A - 3
Über den Autor	A - 7



# 1 Einleitung

## 1.1 Die Ausgangssituation

Die Vollautomatisierung von Stadtschnellbahnen schafft zwei neuartige Zugänge zur Optimierung von Systemgestaltung und Betrieb:

1. Die Entkopplung von Fahr- und Dienstplangestaltung bietet die Möglichkeit der **Minimierung und nachfrageorientierten Flexibilisierung der Zugfolgezeiten**.
2. Durch die Präzision einer vollautomatischen Zugsteuerung können Leistungsgrenzen der Fahrzeugführer überwunden werden: Die (nahezu sekundengenaue) **Flexibilisierung der Fahrweisen sowie der Fahr- und Haltezeiten** ist eine der Aufgaben, die menschliches Fahrpersonal überfordern würden.

Wie Abb. 1.1 veranschaulicht, lassen sich hieraus vier Optimierungsaufgaben ableiten, die als Ebenen einer Planungs- und Steuerungshierarchie zu begreifen sind (vgl. [166]):

1. **Optimierung der Systemgestaltung** (strategische Planung bezüglich Fahrzeugauswahl und Auslegung der Anlagen) [151, 163, 165, 166]
2. **Nachfrageorientierte Optimierung des Beförderungsangebotes, insbesondere der Zugfolgezeiten** (betriebliche Planung, Ermittlung flexibler Fahrpläne) [10]
3. **Energiekosten minimierende und Störungen vermeidende Flexibilisierung und Synchronisierung von Anfahr- und Bremsvorgängen** (Optimale Planung und Steuerung von Fahr-, Halte- und Zugfolgezeiten für ein System von Zügen) [5, 6]
4. Echtzeitsteuerung einzelner Zugfahrten zur **anschlussoptimierenden und traktionsenergiesparenden Flexibilisierung der Fahrweisen** [7, 124, 125]

**Die vorliegende Arbeit will einen Beitrag zur Lösung von Optimierungsproblemen der zweiten und dritten Ebene leisten.**

Hierbei soll insbesondere gezeigt werden, dass diese sehr komplizierten Optimierungsaufgaben, die recht unterschiedlich zu sein scheinen, durch das gleiche methodische Instrumentarium, nämlich durch die Nutzung Genetischer Algorithmen, erfolgreich gelöst werden können.

Vollständig erschließen lassen sich die Optimierungspotenziale naturgemäß nur unter den Bedingungen der Vollautomatisierung [162]. Die vorliegende Arbeit will allerdings auch möglichen Zwischenstufen auf dem Weg dahin, d.h.

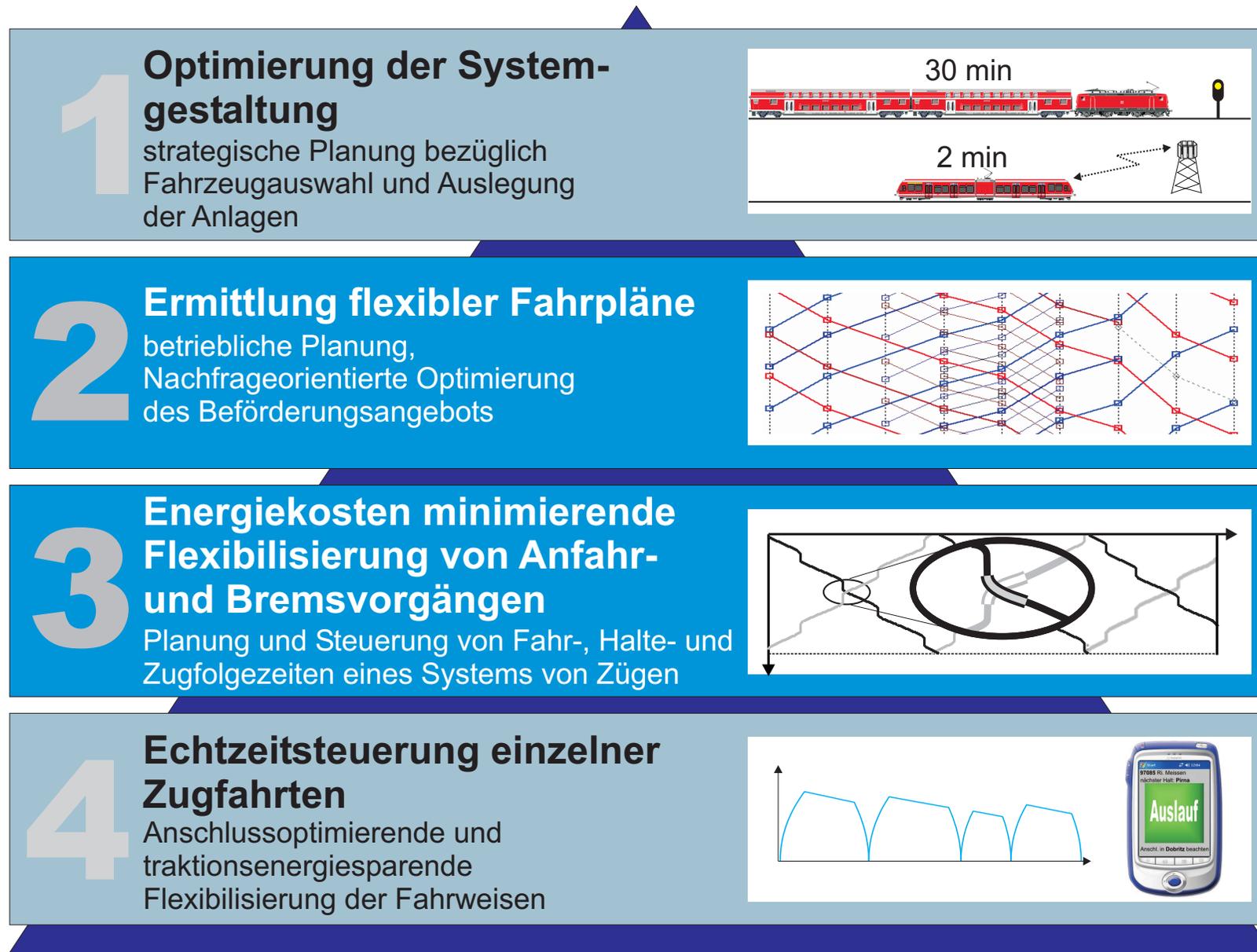


Abbildung 1.1: Hierarchie der Optimierungsaufgaben bei der Planung und Steuerung eines flexiblen S-Bahn-Betriebes

- von der konventionellen Betriebsweise
- über die Nutzung von innovativen Fahrerassistenzsystemen (vgl. Abb. 1.2)<sup>1</sup> [125, 126]
- bis zum fahrer- und begleiterlosen Betrieb [153, 166]

Beachtung schenken (vgl. Portfolio nach Abb. 1.3).

#### Erprobung am Fahrsimulator der TU Dresden



#### Einsatz im Fahrgastbetrieb auf der S-Bahn Dresden



Abbildung 1.2: Das entwickelte Fahrerassistenzsystem: Der Bordrechner ermittelt aus gespeicherten und über GSM-R übermittelten Daten das jeweils optimale Fahrregime. Es kommen dabei nur die Anweisungen Antrieb mit voller Leistung, Beharrungsfahrt an der Geschwindigkeitsgrenze, Auslauf und Bremsen mit maximaler Bremsverzögerung in Betracht, die dem Triebfahrzeugführer optisch und akustisch signalisiert werden.

<sup>1</sup>Ein solches Fahrerassistenzsystem ist unter maßgebender Mitwirkung des Verfassers am Lehrstuhl für Verkehrsleitsysteme und -prozessautomatisierung der TU Dresden entwickelt und bei der S-Bahn Dresden erprobt worden.

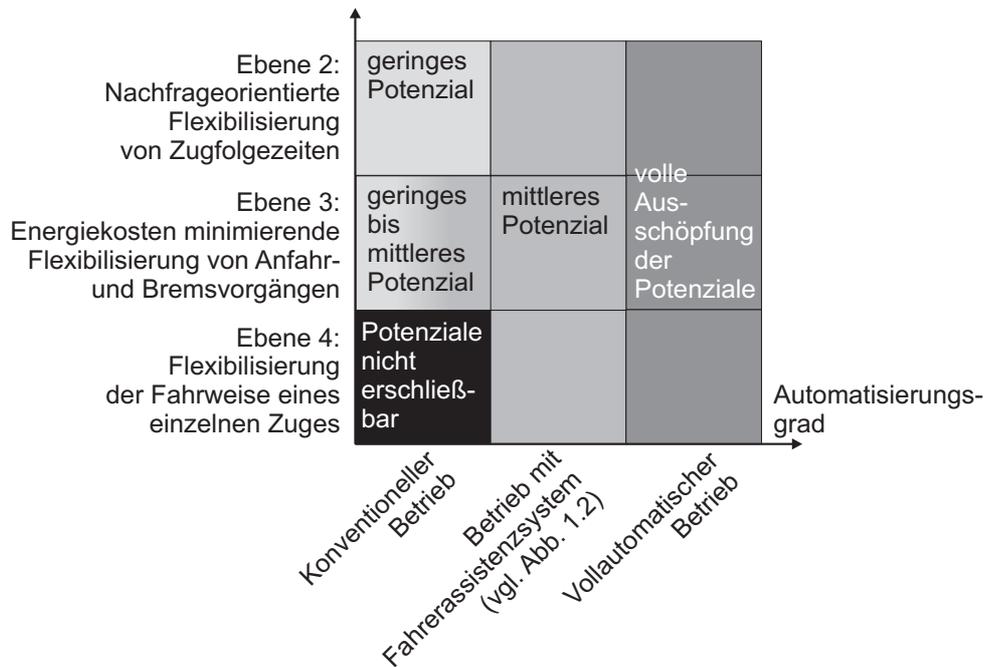


Abbildung 1.3: Erschließbare Optimierungspotenziale bei unterschiedlichen Automatisierungsgraden

## 1.2 Nachfrageorientierte Optimierung der Zugfolgezeiten und die automatische Ermittlung flexibler Fahrpläne: Der angestrebte Beitrag zur Optimierungsebene 2

Im konventionellen Stadtschnellbahnbetrieb wird traditionell im starren Taktfahrplan gefahren, d.h. mit konstanten Zugfolgezeiten während langer Zeiträume des Tages. Aus Betreibersicht ist es für die Realisierung eines solchen Fahrplans notwendig, die Zuggröße so zu wählen, dass in der Hauptverkehrszeit die Verkehrsmittel eine vorgegebene Auslastung nicht überschreiten. Während der anderen Stunden des Tages wird die vorgehaltene Kapazität nur unzureichend genutzt, gleichzeitig verursacht deren Vorhaltung Kosten.

Im flexiblen Betrieb geht man vom festen Takt und den dafür notwendigen großen Fahrzeugen weg: Kleine Fahrzeuge werden so eingesetzt, dass ihre Auslastung während großer Zeiträume des Tages gleichmäßig hoch ist.

Für die zeitliche Angebotsflexibilisierung wird, wie Abb.1.4 veranschaulicht, eine Doppelstrategie angestrebt (vgl. [166]):

1. Die längste Zugfolgezeit  $T_{S,max}$ , die in den Schwachverkehrszeiten anzuwenden ist, wird mit 6 - 10 Minuten noch so kurz gewählt, dass der Fahrgast den Fahrplan nicht zu kennen braucht (**Attraktivitätsmaximierung**).
2. Während der übrigen Tageszeit werden die Zugfolgezeiten weiter verkürzt, aber nur so weit, dass sich das Beförderungsangebot bestmöglich der Verkehrsnachfrage anpasst. Hier-

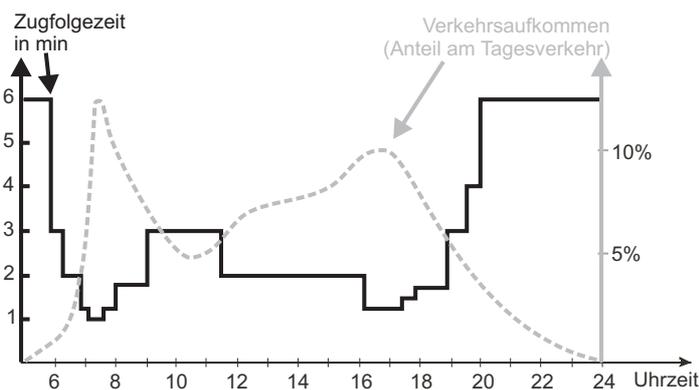


Abbildung 1.4: Das Grundkonzept einer nachfrageorientierten Flexibilisierung des Beförderungsangebots (Beispiel: System VAL in Lille [152, 163])

durch wird erreicht, dass die Züge während der maßgebenden Betriebsstunden immer gut mit (zahlenden) Fahrgästen ausgelastet sind (**Sicherung einer hohen Wirtschaftlichkeit**).

Ein flexibler Betrieb wird heute ausschließlich auf vollautomatisierten U-Bahn-Linien durchgeführt (vgl. fahrerlose Stadtschnellbahnen in Lille, Toulouse, Lyon, Rennes, etc.)<sup>2</sup> Für solche einzelnen Linien können die optimalen Zugfolgezeiten und damit das Betriebsregime anhand der Zahl der im maßgebenden, d.h. im höchstbelasteten Streckenabschnitt beförderten Fahrgäste und der gewünschten Auslastung der Fahrzeuge ermittelt werden. Dies kann im Sinne einer Planung oder einer Echtzeit-Regelung geschehen. Verfahren dazu sind in der Literatur (u.a. [13, 42], vgl. auch Kapitel 2) beschrieben und werden praktisch eingesetzt.

Wesentlich schwieriger gestaltet sich der Entwurf flexibler Fahrpläne bei sich überlagernden Linien, die - wie Abb. 1.5 verdeutlicht - in die Region hineinreichen.

Die einzigen vollautomatischen und flexiblen Systeme, die neben den Stadtzentren auch noch den erweiterten Ballungsraum bedienen sind die Linie 2 der Metro VAL in Lille sowie das System SkyTrain in Vancouver [149]. Während bei SkyTrain im Zentrumsbereich die Überlagerung zweier verschiedener Linien durchgeführt wird werden in Lille Kurzläufer im Sinne einer räumlichen Angebotsflexibilisierung eingesetzt [116].

Die Überlagerung von mehr als zwei Linien findet in der Praxis ausschließlich im S-Bahn-Betrieb statt, insbesondere auf Streckenabschnitten im Zentrumsbereich der Ballungsräume (vgl. Abb. 1.5). Dabei handelt es sich prinzipiell um Linien im starren Taktfahrplan. Solche Systeme sind besonders in Großstädten erfolgreich, wenn ein hohes Verkehrsaufkommen zur Verfügung steht. Durch Überlagerung mehrerer Linien, die in einem 10-min-Takt verkehren, wird oft auf dem zentralen Streckenabschnitt an der Kapazitätsgrenze gefahren, die durch die minimale Zugfolgezeit bestimmt wird.<sup>3</sup>

<sup>2</sup>Eine Übersicht über sämtliche zum Zeitpunkt dieser Arbeit im Einsatz befindlichen automatisch gesteuerten und flexibel verkehrenden U-Bahnen wurde durch SCHOLZ vorgelegt [149].

<sup>3</sup>Zur weiteren Verbesserung des Angebots kann dann nur ein Ausbau der Infrastruktur (vgl. S-Bahn München [138]) oder eine Erhöhung der Zugkapazität (vgl. Einführung von Doppelstockzügen auf der RER A Paris [38]) erfolgen.

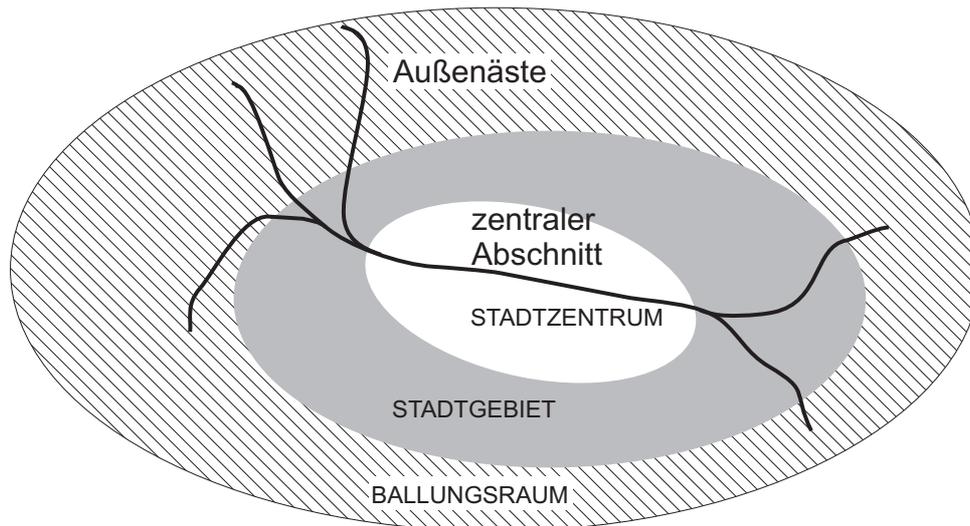


Abbildung 1.5: Typische Netzstruktur eines mittleren Ballungsraums

In mittleren Ballungsräumen verkehren die einzelnen, sich überlagernden Linien mit deutlich längeren Zugfolgezeiten, so dass trotz Überlagerung von wenigen Linien ein unattraktives Angebot entsteht<sup>4</sup>.

Die Streckennetze haben in dieser Ballungsraumkategorie meist sowohl auf dem zentralen Abschnitt als auch auf den Außenästen Kapazitätsreserven. Die Außenäste werden deshalb auch durch andere Verkehre im Mischbetrieb genutzt, z.B. durch den Güterverkehr oder Personenfernverkehr.

Durch die Abkehr vom ganztägig festen Takt in solchen Netzen (vgl. fiktives Beispiel nach Abb. 1.6) und die Einführung eines flexiblen Betriebsregimes mit kleineren Fahrzeugen kann ein S-Bahn-System an Attraktivität und damit zusätzliche Fahrgäste gewinnen [149–151, 163].

**Methoden zur Gestaltung eines nachfrageabhängigen Angebots bei mehreren, sich überlagernden S-Bahn-Linien nach Abb. 1.6 sind allerdings ebensowenig bekannt geworden wie praktische Realisierungen.**

**Die vorliegende Arbeit will deshalb zur Überwindung des in methodischer Hinsicht bestehenden Defizits beitragen.** Dabei wird der Entwurf flexibler Betriebsregime als ein zweistufiger Prozess begriffen:

1. Die **Angebotsbemessung**, d.h. die Ermittlung der Fahrtenhäufigkeit auf den einzelnen Linien (vgl. Abb. 1.6).
2. Die **automatische Ermittlung der zugehörigen optimalen (flexiblen) Fahrpläne**, was für Beispiele gemäß Abb. 1.6 eine hochgradig komplexe Aufgabe darstellt.

Hierbei erfolgt eine Konzentration auf die bei S-Bahnen anzutreffenden Bedingungen (vgl. Abb. 1.6).

<sup>4</sup>Beispiele dafür finden sich u.a. in Dresden: Die Überlagerung zweier, im Halbstundentakt verkehrender Linien führt auf 15 min Zugfolgezeit, Rhein-Neckar-Gebiet: Die Überlagerung von 4 Linien im 60 min-Takt ergibt ebenfalls 15 min [16, 145], Hannover: Die Überlagerung von 3 Linien im 30-Minuten-Takt ergibt einen 10 min-Takt [70]

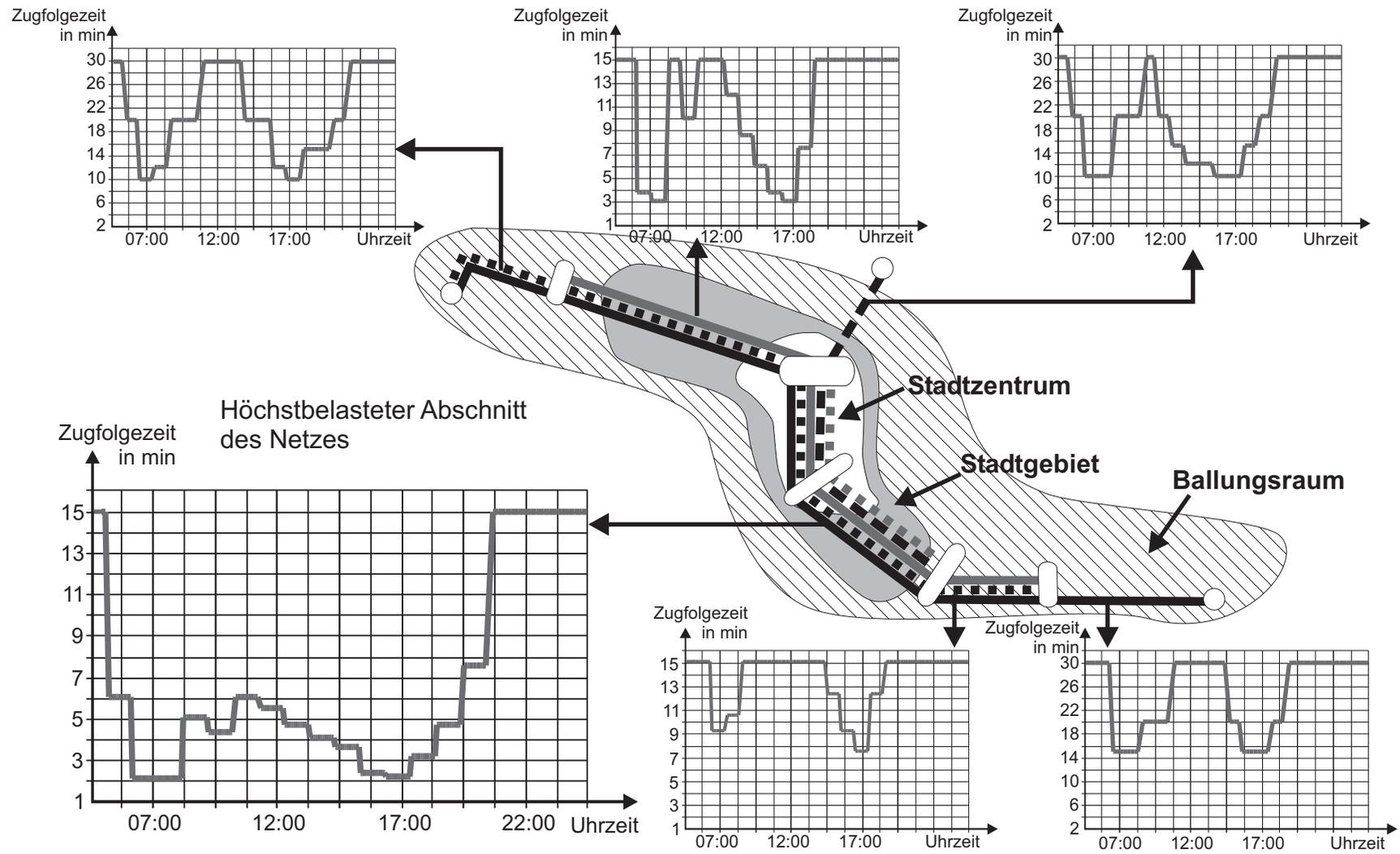


Abbildung 1.6: Nachfrageorientierte (flexible) Angebotsbemessung bei mehreren sich überlagernden S-Bahn-Linien als Grundlage für die Ermittlung flexibler Fahrpläne: Die zeitliche und räumliche Flexibilisierung des Beförderungsangebotes als komplexes Optimierungsproblem (fiktives Beispiel).

### 1.3 Die Energiekosten und Störungen minimierende Flexibilisierung von Anfahr- und Bremsvorgängen: Der angestrebte Beitrag zur Optimierungsebene 3

Eine unmittelbare Verbindung zwischen den Optimierungsebenen 2 und 3 nach Abb. 1.1 ergibt sich durch folgenden Sachverhalt:

Bei einem flexiblen Betriebsregime mit sehr kurzen Zugfolgezeiten (vgl. Abb. 1.4) kann es vorkommen, dass eine größere Zahl von Zügen nahezu gleichzeitig anfährt, was zu hohen elektrischen Strömen zwischen den Unterwerken und den Fahrzeugen führt und damit zwangsläufig hohe Spannungsabfälle in den Leitern (vgl. Abb. 1.7) nach sich zieht.

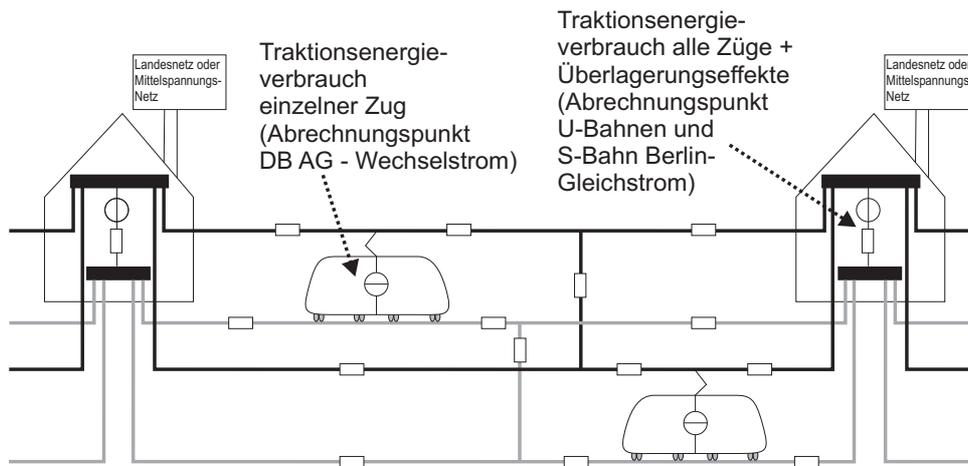


Abbildung 1.7: Unterschiedliche Arten der Preisbildung im elektrischen Bahnbetrieb: Motivation für die Flexibilisierung von Anfahr- und Bremsvorgängen bei Bahnen mit Abrechnungspunkt im Unterwerk

Wie ERBIN [54] berichtet, gehören derartige Spannungsabfälle zu den häufigsten Störungsursachen der automatischen Metro VAL in Lille (vgl. Abb. 1.4). Moderne Triebfahrzeuge verfügen über Schutzeinrichtungen, mit denen bei geringen Spannungen die Leistungsaufnahme des Fahrzeugs begrenzt wird, was aber naturgemäß das Beschleunigungsvermögen der Züge herabsetzt und demzufolge Verspätungen nach sich ziehen kann. Wenn eine Mindestspannung unterschritten wird, dann führt dies meist zur vollständigen Abschaltung des Fahrzeugs [139, 178] und damit zu Betriebsstörungen, die bei sehr kurzen Zugfolgezeiten (vgl. Abb. 1.4) erhebliche negative Wirkungen auf das flexible Betriebsregime insgesamt nach sich ziehen können. Verbunden damit ist naturgemäß auch eine deutliche Beeinträchtigung der Attraktivität des Bahnsystems. Ein Abschalten bei voller Leistung hat darüberhinaus negative Auswirkungen auf die Lebensdauer elektrischer Komponenten des Zuges wie den Hauptschalter, in dem Lichtbögen auftreten [19].

Gleichzeitig mit dem Abfallen der Fahrleitungsspannung steigt die Gleis-Erde-Spannung. Damit verbunden ist bei Gleichstrombahnen die Gefahr der Streustromkorrosion sowie der Überschreitung von gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerten.

**Diesen Problemen kann bei Gleichstrombahnen<sup>5</sup> mit flexiblem Beförderungsangebot, d.h. sehr kurzen Zugfolgezeiten (vgl. Abb. 1.4), nur durch bestmögliche Synchronisierung der Anfahr- und Bremsvorgänge begegnet werden.**

Dieses Konzept hat offenbar auch Bedeutung als Instrument der Energiekostensenkung sowohl im flexiblen als auch im konventionellen Stadtschnellbahnbetrieb. Dabei ist zwei Gegebenheiten besondere Aufmerksamkeit zu schenken:

- Die Abgabe elektrischer Leistung in ein Netz kann nur dann erfolgen, wenn dafür Verbraucher vorhanden sind. So können Züge ihre während des Bremsens aus der kinetischen Energie gewandelte elektrische Energie nur dann in das Fahrleitungsnetz zurückspeisen, wenn Abnehmer im Sinne von beschleunigenden Zügen vorhanden sind. Ist dies nicht der Fall, dann muss die elektrische Energie über Bremswiderstände an Bord verbraucht werden. Diese Energie geht für das Gesamtsystem verloren und kann daher vom Bahnbetreiber nicht zur Kosteneinsparung genutzt werden.
- Bei der gleichzeitigen Anforderung hoher Leistungen durch mehrere Züge treten hohe Spitzen bei Leistung und Strom in den Unterwerken der Bahnenergieversorgung auf. Diese Spitzen müssen durch den Energieversorger bereitgestellt werden, der also Erzeugungs-, Verteilungs- und Übertragungskapazitäten für die größte mögliche Spitze vorhalten muss. Teile der damit verbundenen Investitionen und Kosten werden dem Bahnbetreiber bei der Ermittlung der Energiekosten in Form eines Leistungsanteils in Rechnung gestellt. Nach einer Studie des Internationalen Verbands für das Öffentliche Verkehrswesen UITP [3] beträgt dieser Anteil durchschnittlich 21% der Gesamtkosten für elektrische Energie.

Die diesen Phänomenen zugrundeliegenden Ursache-Wirkung-Zusammenhänge sind in Abb. 1.8a für beschleunigende Züge und 1.8b für bremsende Züge veranschaulicht.

Für alle beschriebenen Effekte muss das Gesamtsystem „Elektrische Bahn“ betrachtet werden [21]: Neben der Dimensionierung der Energieversorgungsanlagen und der Konfiguration der Züge spielt der durchzuführende Fahrplan, z.B. der in der Optimierungsebene 2 nach Abb. 1.1 zu ermittelnde, eine entscheidende Rolle.

Für die Reduktion von Energiekosten durch Synchronisierung und Flexibilisierung der Anfahr- und Bremsvorgänge bietet sich in Phasen konstanter Zugfolgezeit, die, wie in Abb. 1.9 dargestellt, auch im flexiblen Betrieb einen Großteil des Betriebstags einnehmen, als Steuergröße die Nutzung von Fahr- und Haltezeitreserven an, die in jedem Fahrplan enthalten sein müssen. Durch Flexibilisierung von Zugfolgezeiten können Übergänge zwischen aufeinanderfolgenden Phasen mit unterschiedlichen Zugfolgezeiten ebenfalls für eine bestmögliche Synchronisierung von Anfahr- und Bremsvorgängen optimiert werden.

**Praktikable Methoden zur Nutzung dieser Steuergrößen für eine Störungen minimierende und Energiekosten reduzierende Flexibilisierung und Synchronisierung der Anfahr-**

---

<sup>5</sup>Die koordinierte Steuerung eines Systems von Zügen kann nur zu Einsparungen von Traktionsenergiekosten beitragen, wenn diese nicht unmittelbar am Zug, wie z.B. im Wechselstromnetz der DB AG [14], sondern im Unterwerk ermittelt werden (vgl. Abb. 1.7).

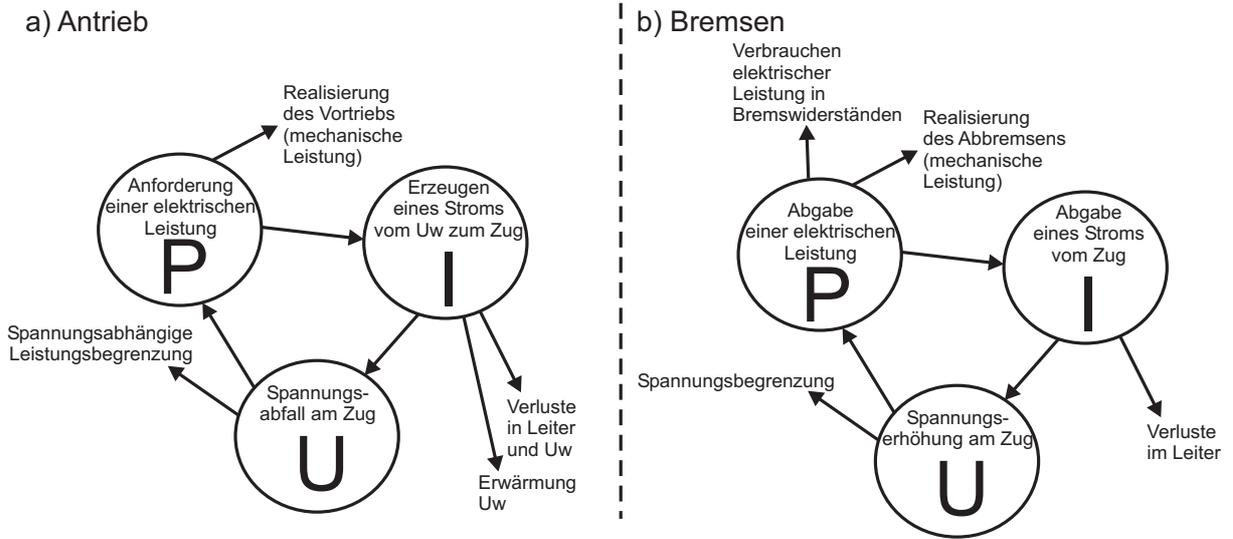


Abbildung 1.8: Wirkungszusammenhang Energieentnahme (a, links)/ Energierückspeisung (b, rechts)

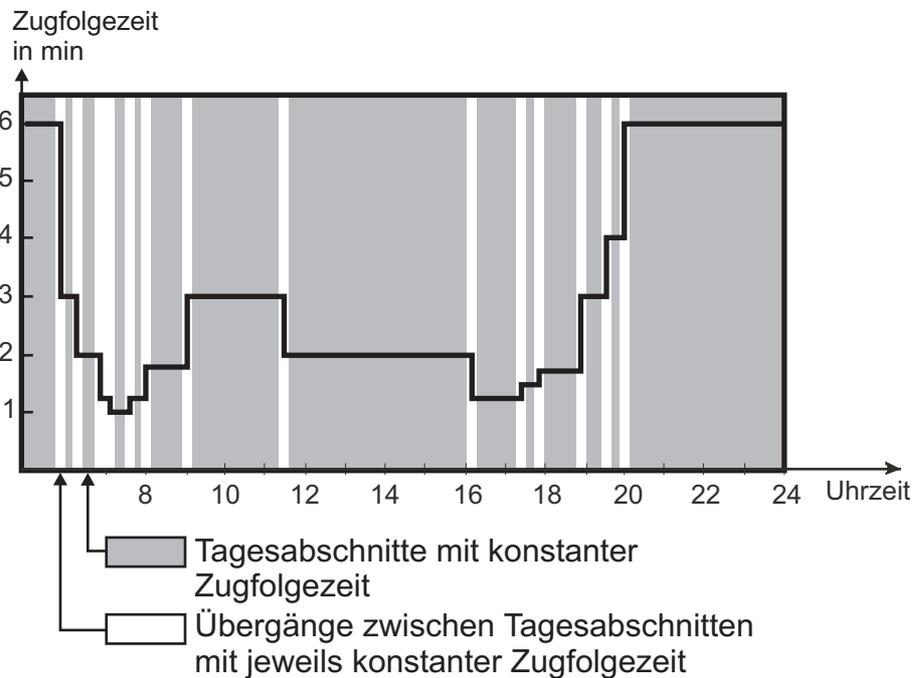


Abbildung 1.9: Tagesverlauf der Zugfolgezeiten im flexiblen Stadtschnellbahnbetrieb: Die Zugfolgezeit wechselt sehr häufig

und Bremsvorgänge in einem System von Zügen sind allerdings bisher nicht bekannt geworden. Diese Lücke schließen zu helfen bildet deshalb ein zweites Hauptanliegen der vorliegenden Arbeit.

## 1.4 Der gewählte Lösungsweg

Die beschriebenen Probleme der Steuerung und Planung des Stadtschnellbahnbetriebes (vgl. die Optimierungsebenen 2 und 3 in Abb. 1.1) sind in ihrer hohen Komplexität sehr ähnlich und wohl auch aus diesem Grunde in der Literatur bisher nicht behandelt worden:

- Die Gütefunktionen lassen sich nicht durch mathematisch geschlossene Ausdrücke darstellen, sondern nur mit Hilfe von Simulationen ermitteln.
- Die Zahl der freien Variablen ist in beiden Fällen sehr hoch, was demzufolge auch auf die Größe des Suchraums zutrifft.
- Es ist zu erwarten, dass die Suchräume viele lokale Optima aufweisen, d.h. traditionelle, gradientenbasierte Optimierungsverfahren würden mit hoher Wahrscheinlichkeit nur ein lokales Optimum finden, das sich vom globalen Optimum deutlich unterscheiden kann.
- Durch Auflösen der komplexen Probleme in mehrere Teilaufgaben ist nicht gewährleistet, dass ein globales Optimum gefunden werden kann.

**Deswegen soll in dieser Arbeit - nach Kenntnis des Autors erstmalig - versucht werden, Genetische Algorithmen zur Lösung dieser praktisch bisher nicht gelösten Probleme der Steuerung und Planung des flexiblen Stadtschnellbahnbetriebes nutzbar zu machen.**

Dazu wird zunächst im ersten Teil der Arbeit (Kapitel 2) eine Analyse des internationalen Entwicklungsstands beim Entwurf flexibler Betriebsregime für Stadtschnellbahnen vorgelegt. **Dabei wird deutlich, dass für die hier zu untersuchenden, ganzheitlichen Ansätze nicht auf existierende Methoden und Konzepte zurückgegriffen werden kann.**

In Kapitel 3 wird deshalb das Optimierungsverfahren der **Genetischen Algorithmen** vorgestellt, wobei ein Hauptaugenmerk auf den vom Ingenieur festzulegenden Parametern liegt. Anhand erfolgreicher praktischer Anwendungen Genetischer Algorithmen zur Optimierung im Eisenbahnverkehr soll deren prinzipielle Eignung für die Bearbeitung von komplexen Problemen und das in methodischer Hinsicht noch bestehende Defizit gezeigt werden.

Teil II der Arbeit ist der Optimierungsebene 2 nach Abb.1.1 gewidmet, wobei die spezifischen Bedingungen des S-Bahn-Betriebes besondere Beachtung finden. Er stellt dazu **einen neuartigen, mehrstufigen Zugang zur Erstellung flexibler Betriebsprogramme bei strikter zeitlicher und räumlicher Flexibilisierung der Zugfolgezeiten** vor (vgl. Abb. 1.6). Während die Ermittlung der Zahl notwendiger Fahrten noch durch vollständige Enumeration oder Baumsuchverfahren durchgeführt werden kann, führen bei der Bestimmung optimaler Abfahrtszeiten der Züge nur Genetische Algorithmen zum Erfolg. In Kapitel 4 wird zunächst auf mögliche

Gütekriterien eingegangen, bevor in Kapitel 5 die einzelnen Stufen des Verfahrens detailliert beschrieben werden. **Ergebnisse von Fallstudien für die Dresdner S-Bahn sowie der zu deren praxisnaher Überprüfung entwickelte Simulator SIMflex-S** werden im Kapitel 6 vorgestellt<sup>6</sup>.

Die Optimierungsebene 3 nach Abb. 1.1 bildet den Gegenstand von Teil III der Arbeit: **Geschaffen wurde ein neuartiges methodisches Instrumentarium zur störungsminimierenden und energiekosteneinsparenden Flexibilisierung und Synchronisierung von Anfahr- und Bremsvorgängen bei Stadtschnellbahnen**. Hierzu wird in Kapitel 7 zunächst auf die Ermittlung dieser Kosten und die dafür notwendige Modellierung des Gesamtsystems Elektrische Bahn eingegangen. Kapitel 8 behandelt verschiedene Möglichkeiten der Minimierung dieser Kosten, u.a. durch optimale Verteilung von Fahr- und Haltezeitreserven in Phasen konstanter Zugfolgezeiten sowie die energieorientierte Gestaltung von Übergängen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Zugfolgezeiten auf einzelnen Linien. Die Wirksamkeit der entwickelten Verfahren wird im Kapitel 9 anhand von **zwei Fallstudien** demonstriert:

1. **Vollautomatischer flexibler Betrieb (im Sinne der Optimierungsebene 2 nach Abb. 1.1): Die fahrerlose Metro VAL in Lille**
2. **Konventioneller Betrieb: Die Linie S1 der S-Bahn Berlin**

Der abschließende Teil IV dieser Arbeit fasst wesentliche Erkenntnisse der Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick über mögliche und notwendige Weiterentwicklungen.

---

<sup>6</sup>Diese Arbeiten wurden im Rahmen des BMBF-Leitprojekts „intermobil Region Dresden“, Teilprojekt „Die flexible S-Bahn“ durchgeführt.

## **Teil I**

# **Analyse des internationalen Entwicklungsstands**



## 2 Bisher bekannt gewordene Verfahren zum Entwurf flexibler Betriebsregime

Die in den Optimierungsebenen 2 und 3 der Aufgabenhierarchie nach Abb. 1.1 in dieser Arbeit zu untersuchenden Probleme wurden bisher in der Fachliteratur nicht systematisch behandelt. Die nachfolgend dargestellte Schrifttumsanalyse soll dies sichtbar machen.

### 2.1 Automatische Berechnung flexibler Fahrpläne für Stadtschnellbahnen

Die automatische Erstellung von Fahrplänen hat sich im Bereich traditioneller Regional- und Fernbahnen bis heute nicht durchgesetzt, der Hauptteil der Fahrplanung wird immer noch durch menschliche Planer bzw. Disponenten erledigt [183]. Das liegt insbesondere an den zahlreichen Zwängen des Betriebs, die von erfahrenen Disponenten zwar beherrschbar, aber nicht in Formeln zu bringen sind. Die meisten Fahrpläne werden daher nur computergestützt, d.h. im interaktiven Betrieb zwischen einem Bediener und einem Rechnerprogramm erstellt.

Im U-Bahn-Bereich, in dem meist jede Linie auf eigenem Fahrweg verkehrt und die benötigten Fahrpläne dadurch eine deutlich geringere Komplexität aufweisen, haben sich hingegen Werkzeuge zur automatischen Fahrplanerstellung bewährt [156], auch wenn hier ebenfalls noch häufig rechnergestützte Verfahren zum Einsatz kommen [179].

Für S-Bahnen, die in der Komplexität ihres Betriebs eher Regionalbahnen als U-Bahnen ähneln, ist nicht bekannt, dass vollautomatische Systeme zur Fahrplanung existieren.

UEBE [172] stellt in seiner Monographie die Anwendung verschiedener klassischer Optimierungsverfahren vor, die insbesondere bei der Gestaltung von Flugplänen verwendet werden. Dazu zählen u.a. Lineare, Dynamische und Ganzzahlige Programmierung, mit denen Teilaspekte der Fahrplanung gelöst werden können. Als Gütekriterien kommen für den Personenverkehr, der hier behandelt werden soll,

- die Minimierung der Transportkosten, von Wartezeiten und der Fahrzeugzahl sowie
- Kombinationen verschiedener dieser Kriterien

in Frage. In der Praxis hat sich keine eindeutige Entscheidung durchgesetzt, wohl auch, weil meistens mehrere, wenn nicht alle dieser Ziele gleichzeitig erfüllt werden sollen.

Publikationen zu Methoden der flexiblen Betriebsführung, d.h. der optimalen Anpassung des Verkehrsangebots an die Nachfrage, sind in der Literatur erst mit dem Aufkommen von Systemen zur automatischen Zuststeuerung in den 1980er Jahren zu finden.

Die wohl am häufigsten zitierte Arbeit zur Erstellung flexibler Fahrpläne im U-Bahn-Bereich ist die von CURY, GOMIDE und MENDES [42]. Darin wird erstmalig ein Verfahren zur strikten zeitlichen Flexibilisierung einer geschlossenen U-Bahn-Linie am Beispiel der Metro in São Paulo (Brasilien) beschrieben, mit dem das Verkehrsangebot optimal an die Nachfrage angepasst und dafür ein Minimum an Fahrzeugen und damit an Betriebsleistung benötigt wird. Zur Lösung dieses Problems wird die Dynamische Programmierung in einer abgeänderten Form verwendet, um dem Problem der Dimension zu begegnen. ASSIS und MILANI [12, 13] erweiterten später diesen Ansatz und verwenden Verfahren der prädiktiven Regelung (Model Predictive Control) zu dessen Lösung.

MINCIARDI, PAOLUCCI, PESENTI et. al. [23, 118] befassen sich ebenfalls mit der Optimierung von Fahrplänen in hochleistungsfähigen Stadtschnellbahnsystemen. Dabei werden für einzelne Linien insbesondere der Einfluss der Sicherungstechnik auf die Fahrplanung [23] sowie der spezielle Aspekt ungleichmäßiger Fahrgastankunftsdaten untersucht [118].

GROSSE beschreibt ein Verfahren zur Echtzeitsteuerung des U-Bahn-Betriebes für die Optimierung der Effizienz des Betriebes [69]. Dabei erfolgt neben der Steuerung von Zugfolgezeiten auch eine Variation von Fahrzeuggröße sowie die Einführung von Kurzfahrten auf hoch belasteten Abschnitten. Die Betrachtung des Problems als Online-Regelung setzt die Vollautomatisierung für die Anwendung der von der Autorin vorgeschlagenen heuristischen Verfahren voraus.

Weitere Verfahren zur Flexibilisierung des Verkehrsangebots sind aus dem Busverkehr bekannt. Hier untersucht GREGA [68] insbesondere, wie Übergänge zwischen aufeinanderfolgenden Perioden unterschiedlicher fester Takte auf einer einzelnen Linie effektiv gestaltet werden können. Dazu zählen insbesondere die Länge der Übergangsintervalle vor Erreichen des neuen Takts sowie die Zuordnung von Fahrzeugen zu den Umläufen der neuen Taktperiode. Das Problem der Fahrplanung für einen gesamten Betriebstag wird damit zurückgeführt auf die Optimierung von Phasen konstanter Fahrzeugfolgezeiten sowie den Übergängen dazwischen. Durch Zusammensetzen der einzelnen, lokal optimierten Bausteine ergibt sich der Gesamtfahrplan. Dieses Verfahren ist allerdings nur sinnvoll, wenn die Dauer eines Fahrzeugumlaufs kürzer als die Länge der Anwendung eines konstanten Takts ist, was im S-Bahn-Bereich mit seiner großen räumlichen Ausdehnung nicht der Fall ist.

CEDER hat sich ebenfalls ausgiebig dem flexiblen Betrieb von Buslinien gewidmet (vgl. [30,31] und die dort enthaltenen Referenzen zu weiteren Arbeiten des Autors). Ihm geht es hauptsächlich darum, auf Buslinien Fahrten mit verkürzter Linienführung einzuführen, um die benötigte Fahrzeuganzahl für ein bereits feststehendes Betriebsprogramm zu reduzieren.

Dieser Ansatz nutzt Quelle-Ziel-Matrizen von Verkehrsströmen, um mögliche Zwischenendhaltepunkte festzulegen. Anhand der sogenannten Defizitfunktion wird ermittelt, ob das verkehrlich mögliche Kürzen einer Fahrt am Zwischenhaltepunkt zu einer Reduktion der benötigten Zahl Fahrzeuge führt. Leerfahrten können ebenfalls eingeführt werden, um eine weitere Reduk-

tion der erforderlichen Fahrzeugzahl herbeizuführen.

In einem letzten Schritt wird dann versucht, aus den Kurzfahrten wieder Langläufer zu machen, ohne dass die Fahrzeuganzahl ansteigt, was den hier verfolgten Überlegungen einer höchstmöglichen Effizienz der eingesetzten Verkehrsmittel entgegen steht, wird doch dadurch verkehrlich nicht notwendige Betriebsleistung erzeugt.

Das Problem der Überfüllung von Langläufern bei gleichzeitiger schlechter Auslastung der Kurzfahrten wird von CEDER [30, 31] als Problem der Fahrplanung begriffen und durch ungleichmäßige Zugfolgezeiten gelöst.

**Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass Methoden zur automatischen Berechnung flexibler Fahrpläne für räumlich stark gegliederte S-Bahn-Netze der durch Abb. 1.6 veranschaulichten Form nicht verfügbar sind. Diese Lücke soll im Teil II dieser Arbeit geschlossen werden.**

## 2.2 Flexibilisierung und Synchronisierung von Anfahr- und Bremsvorgängen bei Stadtschnellbahnen

Die Senkung von Energiekosten durch Synchronisierung von Anfahr- und Bremsvorgängen wird (mit einer Ausnahme) erst seit Beginn der 90er Jahre des zwanzigsten Jahrhunderts in der Literatur diskutiert. Die wichtigsten Veröffentlichungen sind in Tabelle 2.1 zusammengefasst.

Sie betreffen naturgemäß vor allem den Nahverkehr, wo durch häufiges Anfahren und Bremsen eine effiziente Nutzung rückgespeicherter Bremsenergie von hoher Bedeutung ist genauso wie das Vermeiden gleichzeitiger Anfahrvorgänge zur Senkung von Leistungsspitzen. Alle in den Veröffentlichungen untersuchten Nahverkehrsbahnen sind Gleichstrombahnen.

Einzig FIRPO und SAVIO befassen sich in [58] mit der Koordination von Zügen des Fernverkehrs. Die spezielle Motivation der Autoren ist begründet durch das System der 25-kV-50-Hz-Energieversorgung in Italien, in denen nur die jeweils im gleichen Speiseabschnitt befindlichen Züge Bremsenergie absorbieren können. Außerdem beruht das Preissystem für die untersuchte Eisenbahnstrecke in Italien auf einer Abrechnung im Unterwerk, bei der rückgespeiste Energie nicht vergütet wird, wenn sie im Fahrleitungsnetz des entsprechenden Unterwerksabschnitts nicht genutzt werden kann<sup>1</sup>.

Von den zitierten Arbeiten lassen sich alle in das Gebiet der Offline-Planung oder der Echtzeit-Steuerung einordnen. Bei den Verfahren zur Offline-Planung wird als Steuergröße die Synchronisationszeit verwendet, d.h. der Unterschied zwischen den Abfahrtszeiten von den beiden Endhaltestellen in den beiden Fahrtrichtungen bezüglich eines Taktes (RATP [40, 75], MELLITT und GOODMAN [115]). FIRPO et al. nutzen für ihre bereits oben erwähnten theoretischen Studien zur optimalen Planung im Fernverkehr zusätzlich die Beharrungsgeschwindigkeit sowie die Haltezeiten und Antriebsbeschleunigungen für die Offline-Optimierung. Die Verwendung der Steu-

---

<sup>1</sup>Im Wechselstromnetz kann diese Energie aufgrund der rein transformatorischen Kopplung auf Unterwerksebene in übergeordnete Netze gespeist werden und steht damit anderen Verbrauchern außerhalb des Fahrleitungsnetzes zur Verfügung.

Autor	Art der Optimierung	Motivation	Steuergröße	Verfahren	Modellierung Energieversorgung	Anwendung/ Jahr der Publikation
CHANG et al. [34, 36, 37]	Echtzeit-Steuerung	Energieeinsparung	Haltezeit, Zündwinkel Unterwerke	Fuzzy-Steuerung	Simulation	theoretisch, Nahverkehr, DC/ 1994-1998
FIRPO et al. [58]	Planung	Energiekosten: Nutzung Bremsenergie	Beschleunigung, Beharrungsgeschwindigkeit, Haltezeit	Direkte Suche (Steilster Abstieg)	Simulation	theoretisch, Fernverkehr, AC/ 1995
FIRPO et al. [57]	Steuerung	Energiekosten, Lastausgleich	Spannungen Unterwerke	Direkte Suche	Simulation	theoretisch, Nahverkehr, DC/ 1994
SANSÒ et al. [143, 144]	Echtzeit-Steuerung	Leistungsspitzen	Haltezeit	Heuristik (Suchverfahren)	einfaches Überlagerungsverfahren	praktisch, Nahverkehr, DC, Métro Montréal/ 1995-1997
GORDON et al. [63-66]	Echtzeit-Steuerung	Spannungsabfälle	Antriebsbeschleunigung	Heuristik	KNN, Simulation	praktisch, Nahverkehr, DC, BART-Schnellbahn, San Francisco/ 1998-2000
GUO et al. [72]	Planung	Rückspeisegrad	Haltezeit	Heuristik	Simulation/Dreiecksmethode	theoretisch, Nahverkehr, DC/ 1999
ELBAS GMBH [51]	Echtzeit-Steuerung	Energieverbrauch	Haltezeit	Heuristik	Simulation	praktisch, Nahverkehr, DC, Berliner U-Bahn, Linie U8/ 1999
RATP [40, 75]	Planung	Nutzung rückgespeicherter Bremsenergie	Synchronisationszeit	Analyse	Simulation	praktisch, Nahverkehr, DC, Métro Paris, Linie 14 (Météor)/ 2003
TAKEUCHI et al. [169, 170]/ BART [65]	Echtzeit-Steuerung	Leistungsspitzen	Antriebsbeschleunigung	Heuristik	Vereinfachte Addition	theoretisch, Nahverkehr/ 1998
MELLITT et al. [115]	Planung	Energieverbrauch	Synchronisationszeit, Takt	Analyse	Simulation	praktisch, Nahverkehr, DC, London Underground, Jubilee Line/ 1978

Tabelle 2.1: Übersicht über Verfahren zur Koordination von Anfahr- und Bremsvorgängen

ergröße Beharrungsgeschwindigkeit ist im Nahverkehr nicht sinnvoll, da hier andere optimale Fahrregime zur Anwendung kommen als im Fernverkehr [85]. Auch die Haltezeit ist im Nahverkehr in der Regel knapp bemessen und kann nicht in so großem Maße variiert werden, wie es die Autoren vorschlagen. GUO et al. schlagen ebenfalls die Verwendung der Haltezeit als Steuergröße zur Offline-Planung vor [72], allerdings geht es in deren Untersuchungen hauptsächlich um den theoretischen Einfluss dieser Steuergröße unter besonderer Berücksichtigung der Anwendung des von den Autoren entwickelten Verfahrens zur Dreiecks-Überlagerung von Leistungsspitzen, das anstelle komplexer Simulationen der Anlagen der Energieversorgung eingesetzt wird.

Die Verfahren zur Echtzeit-Steuerung verwenden drei Steuergrößen: die Haltezeit an den Stationen, die Antriebsbeschleunigung und die Spannungen der Unterwerke. Die Haltezeit eines unmittelbar vor der Abfahrt stehenden Zuges wird dabei von CHANG [34,37], SANSÒ [143,144] und der Ingeniergesellschaft ELBAS [51] so modifiziert, dass eine bestmögliche Synchronisation zwischen dessen Anfahrvorgang und einem in der Nähe befindlichen bremsenden Zug stattfindet. Dieses Verfahren ist in Abb. 2.1a dargestellt.

Die maximal mögliche Haltezeitverlängerung liegt dabei im Bereich von 5-10 Sekunden. Die verzögerte Abfahrt wird in keinem der Fälle durch eine kürzere Fahrzeit kompensiert, so dass sich diese Verspätungen an den entsprechenden Endhaltestellen summieren. CHANG schlägt deshalb einen mehrkriteriellen Fuzzy-Regler vor, der die Abfahrt nur verzögert, wenn dadurch die Regelmäßigkeit des Betriebs nicht gestört wird. Mit Ausnahme des von SANSÒ vorgeschlagenen Verfahrens, das kurzzeitig auftretende Leistungsspitzen vermeiden helfen soll, haben die anderen hier erwähnten Arbeiten das Ziel der Senkung des Systemenergieverbrauchs. Die Steuerungsvariable Haltezeit wird ebenfalls von BIELLA für eine Leitreechner-Koordination von Ankünften und Abfahrten vorgeschlagen [20], ohne dass dieser konkrete Angaben zu einer möglichen Umsetzung macht.

Man muss davon ausgehen, dass durch die Beschränkung der Optimierung auf die kurzfristige Haltezeitverlängerung eines einzelnen Zuges keine wesentlichen Einsparungen des Systemenergieverbrauchs zu erzielen sind. Die von ELBAS [51] prognostizierten Werte von 3 bis 6% stellen hierfür wohl eine maximale Größenordnung dar. Die Reduktion von kurzfristigen Leistungsspitzen im Sekundenbereich, wie sie von SANSÒ [143,144] durch Haltezeitmodifikation erreicht wurde, kann dazu beitragen, die Belastung der Anlagen der Energieversorgung zu verringern und eventuell kritische Spannungsabfälle zu vermeiden, eine maßgebliche Senkung der Energiekosten ist nach Aussage der Autorin davon nicht zu erwarten.

Die Reduktion der Antriebsbeschleunigung von Zügen wird vorgeschlagen, um Leistungsspitzen und hohe Spannungsabfälle zu vermeiden. TAKEUCHI und GOODMAN [169,170] befassen sich dabei insbesondere mit dem Problem des gleichzeitigen Anfahrens mehrerer, aufeinanderfolgender Züge beim Fahren im wandernden Raumabstand. Neben diesem sehr speziellen Problem wird von GORDON auch für andere Situationen eine Methode zur Vermeidung hoher Spannungsabfälle beschrieben [63–66], die für das „Bay Area Rapid Transit“-Schnellbahnsystem in San Francisco (USA) entwickelt wurde. Praktisch ist dieses Verfahren vor allem durch die geo-

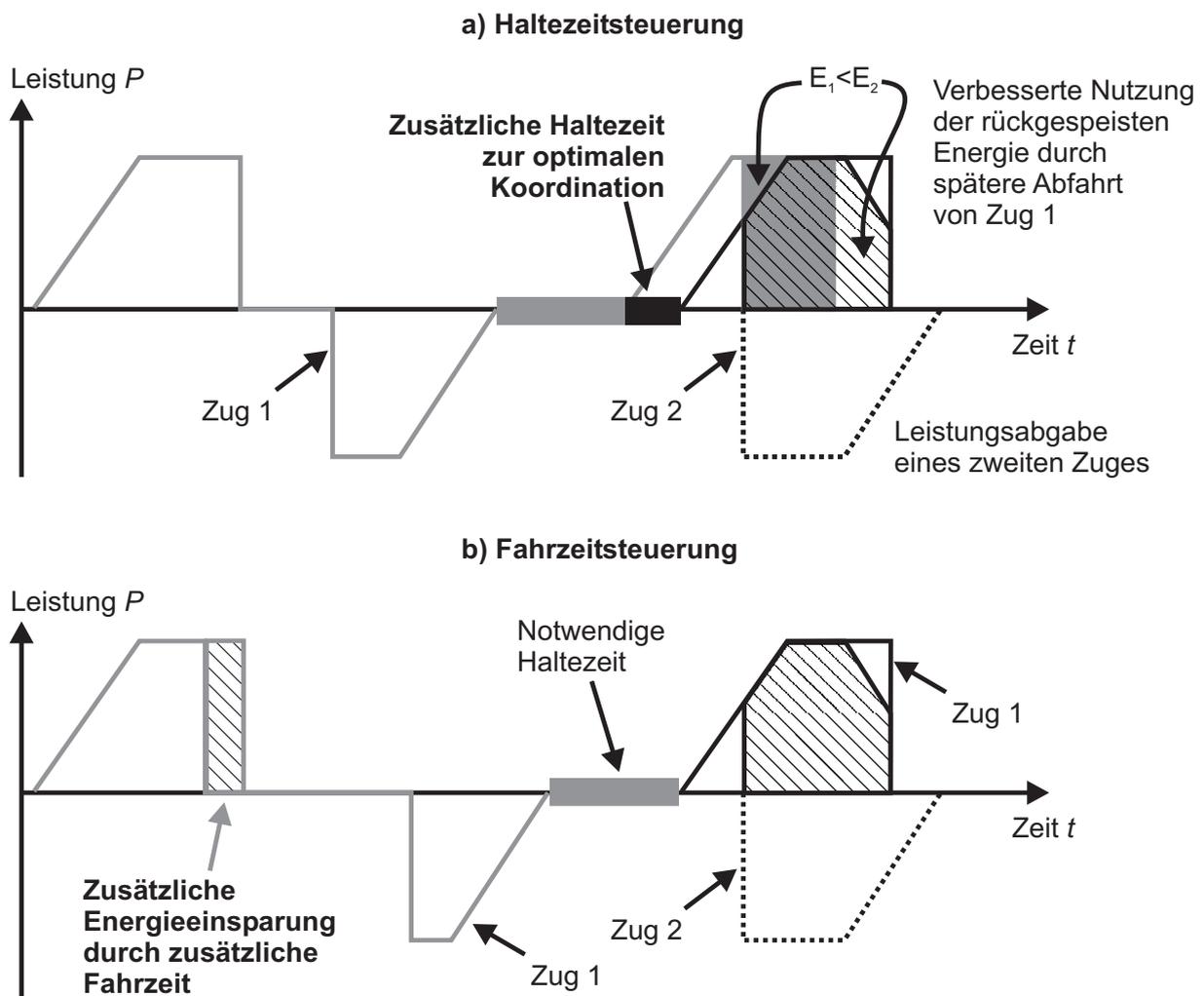


Abbildung 2.1: Haltezeit- und Fahrzeitsteuerung

graphische Lage dieser Bahn motiviert, wo lange, unter dem Meer befindliche Tunnelabschnitte die Installation von zusätzlichen Anlagen zur Energieversorgung finanziell unmöglich machen. Der vorgeschlagene, heuristische Ansatz basiert daher auf einer Reduktion der Antriebsbeschleunigung im Falle zu niedriger, durch ein künstliches neuronales Netz prognostizierter Spannungen.

CHANG et al. [34, 36, 37] sowie FIRPO und SAVIO [57] nutzen in ihren vorgeschlagenen Verfahren die Möglichkeit der Spannungsregelung von Gleichspannungsunterwerken, um in einer gegebenen Situation der Leistungsanforderung von Zügen eine optimale Bremsrückspeisung zu erlauben. Gleichzeitig wird die Problematik der Lastverteilung auf verschiedene Unterwerke untersucht, die aus Sicht der Energieversorger ebenfalls von Bedeutung ist.

Problematisch bei den Verfahren zur Online-Steuerung scheint deren Echtzeitfähigkeit. Außer dem praktisch bereits erprobten Verfahren von ELBAS [51] und den Ansätzen zur spannungsabhängigen Antriebssteuerung von BART [63] gibt es keine verlässlichen Aussagen, ob die vorgestellten Ansätze in Echtzeit realisierbar wären. Der von SANSÒ et al. für die Metro in Montréal

entwickelte Ansatz hat nach [143] das Potenzial, bedarf aber einer weiteren Entwicklung.

Neben den in Tabelle 2.1 beschriebenen Verfahren finden sich weitere Quellen, die eine Optimierung der Bremsenergieerückspeisung beschreiben, ohne die dazu verwendeten Verfahren zu erläutern. Hierzu zählt eine Arbeit von MIZAN und KARWOWSKI [120], die verschiedene Optimierungsstrategien für die Metro von Warschau vorstellen. Dabei wird neben einer Untersuchung der Synchronisationszeit als planerischer Maßnahme auch eine Online-Steuerung in Abhängigkeit der Fahrleitungsspannung und anderer Werte der Energieversorgung und des Zugsystems erwähnt, ohne dass diese Steuerungen genauer vorgestellt werden. Das Simulations- und Planungswerkzeug „FALKO - Fahrplankonstruktion und Validierung“ der SIEMENS Transportation Systems [156] ist nach seiner Produktbeschreibung in der Lage, Fahrpläne für eine bestmögliche Nutzung der rückgespeisten Bremsenergie zu optimieren. Allerdings werden weder die dafür genutzten Verfahren noch die erschließbaren Potenziale erläutert.

**Auf der Grundlage des hier skizzierten Analyseergebnisses lässt sich feststellen, dass die Nutzung von Fahr- oder Haltezeitreserven<sup>2</sup> als Steuergröße für die energiekosten- und störungsminimierende Flexibilisierung der Anfahr- und Bremsvorgänge bisher nicht vorgeschlagen worden ist. Gleiches gilt für die energieorientierte Flexibilisierung von Übergängen zwischen verschiedenen Zugfolgezeiten (vgl. Abb. 1.9). Da eine optimale Planung dieser Größen für den ungestörten Betrieb eines Systems von Zügen zu einer Reduktion von Energiekosten ohne Einsatz von aufwändigen Echtzeit-Steuerungen führen könnte, soll das dabei in methodischer Hinsicht bestehende Defizit im Teil III geschlossen werden.**

## 2.3 Konsequenzen für das Untersuchungsgebiet dieser Arbeit

Die durchgeführte Schrifttumsanalyse hat sichtbar werden lassen, dass keines der Verfahren zur Flexibilisierung von Zugfolgezeiten sowie Fahr- und Haltezeiten (vgl. Ebenen 2 und 3 in Abb. 1.1 auf S. 2) für die Lösung der unter 1.2 und 1.3 beschriebenen Aufgabenstellungen geeignet ist, da mit diesen immer nur Teilaspekte der vorliegenden Probleme gelöst wurden.

**Nur durch eine grundständige Optimierung können die Vorteile der Vollautomatisierung von Stadtschnellbahnen auch praktisch umgesetzt werden. Die vorliegende Arbeit will durch Entwicklung von neuen Verfahren für eine solche grundständige, systembezogene Optimierung einen Beitrag zur Schließung der offensichtlich bestehenden Lücken leisten.**

---

<sup>2</sup>Der Unterschied zwischen den Ansätzen ist in Abb. 2.1 dargestellt.



# 3 Genetische Algorithmen: Das methodische Instrumentarium und die bisher bekannt gewordenen Anwendungen zur Optimierung des Eisenbahnbetriebs

Bei Genetischen Algorithmen handelt es sich um Optimierungsverfahren, die zwar schon seit den 1950er Jahren theoretisch untersucht werden, deren praktische Anwendbarkeit für die komplexen Probleme der Steuerung und Planung eines flexiblen S-Bahn-Betriebs allerdings erst aufgrund der heute verfügbaren Rechenleistungen möglich wird. In diesem Kapitel sollen zunächst die für die praktische Anwendung des Verfahrens wesentlichen theoretischen Grundlagen dargestellt werden, wobei den vom Ingenieur festzulegenden Parametern besondere Beachtung geschenkt wird.

Anschließend werden bisher bekannt gewordene Anwendungen Genetischer Algorithmen für unterschiedliche Probleme des Eisenbahnwesens vorgestellt, um deren Eignung für die Lösung komplexer Optimierungsaufgaben sichtbar zu machen.

## 3.1 Methodische Grundlagen [61, 134]

Optimierungsaufgaben im Eisenbahnverkehr sind oftmals durch eine hohe Komplexität und Nichtlinearität der Gütefunktion gekennzeichnet. Für Optimierungsverfahren, die Probleme dieser Art lösen sollen, stellen sich folgende Fragen:

- Wo im Suchraum wird mit der Suche begonnen (Initialisierung)?
- Wird mit mehreren Punkten gleichzeitig gearbeitet?
- Wie wird aus den bisherigen Punkten der folgende berechnet?
- Wann ist die Suche beendet (Abbruchkriterium)?

Häufig verwendet werden Methoden, die beginnend von einem Ausgangspunkt mit Hilfe der Ableitungen der Zielfunktion in Richtung des Optimums vorzudringen suchen (Gradientenverfahren). Andere Verfahren untersuchen den Suchraum vollständig oder an zufällig ausgewählten Punkten. Die erste Gruppe von Verfahren birgt das Risiko einer frühzeitigen Konvergenz in einem lokalen Minimum, die zweite Methode fordert einen hohen Rechenaufwand, der eine praktische Anwendung in der Regel unmöglich macht.

Daher werden für solche Probleme in zunehmendem Maße Genetische Algorithmen (GA) eingesetzt. Diese wurden von HOLLAND [84] theoretisch eingeführt und ausführlich von GOLDBERG [61] beschrieben. Sie bilden heute die praktisch am häufigsten verwendete Unterklasse der sogenannten Evolutionären Algorithmen [134], die seit den 1950er Jahren erforscht werden, in den 1980er Jahren populär wurden und bis heute eine rasante Entwicklung genommen haben.

Mit Evolutionären Algorithmen wird der aus der Natur bekannte Prozess der Evolution auf ein zu lösendes Problem meist technischer Natur angewendet. Da hierbei auch der in der Natur vorkommende Einfluss des Zufalls modelliert wird, handelt es sich um ein stochastisches Suchverfahren. Lösungen für ein Problem werden als Individuen betrachtet, die sich in einem Suchraum, nämlich dem gegebenen Problem, gegen andere Individuen behaupten müssen. Jedes Individuum ist dabei durch seinen Genotyp, d.h. die Zusammensetzung der Gene auf einem Chromosom gekennzeichnet. Die Ausprägung dieser Gene, der Phänotyp, hat einen wesentlichen Einfluss, wie gut das Individuum an seine Umgebung angepasst ist. Der Phänotyp stellt damit eine Einstellung von Variablen dar, für die ein Zielfunktionswert bestimmt werden kann. Die Zielfunktion ist Lebensraum des Individuums, der Zielfunktionswert die Überlebenschance im Lebensraum. Ein besserer Zielfunktionswert steigert die Überlebens- und Fortpflanzungswahrscheinlichkeit.

Verschiedene dieser Individuen bilden eine oder mehrere Populationen. Nach bestimmten Regeln erzeugen Individuen Nachkommen, die Eigenschaften von beiden Eltern aufweisen. Hierbei werden bevorzugt Individuen ausgewählt, deren Phänotyp bestmöglich an die Umgebung angepasst ist. Durch zufällige Mutation werden wenige Allele um geringe Werte geändert. Eine neue Generation entsteht und wird mit der Elterngeneration vereint. Unter bestimmten Voraussetzungen erfolgt ein Austausch zwischen verschiedenen Populationen, die auch, je nach ihrer Eignung, wachsen oder schrumpfen können [50].

Damit lassen sich folgende Unterschiede Genetischer Algorithmen (GA) zu traditionellen Optimierungsverfahren feststellen:

- GA suchen in einer Population von Punkten *parallel*.
- Es werden keine Ableitungen der Zielfunktion benötigt, nur ein Zielfunktionswert.
- GA verwenden Wahrscheinlichkeitsregeln, keine deterministischen Regeln.
- GA können eine Anzahl von möglichen Lösungen anbieten.

Ihr Einsatz kann auch bei stark nichtlinearen oder diskontinuierlichen Zielfunktionen erfolgen. Er sollte vermieden werden, wenn für ein Problem ein spezielles Lösungsverfahren bekannt ist oder die Berechnung der Zielfunktion aufwändig ist. Hierbei ist allerdings die Grenze fließend. Mit der immer besseren und schnelleren Rechentechnik sind heute deutlich kompliziertere Probleme lösbar als noch vor wenigen Jahren. Zusätzlich bieten Genetische Algorithmen aufgrund ihrer gleichzeitigen Suche von Optima an mehreren Stellen ein hohes Potenzial

zur Parallelisierung, was bei verfügbarer Rechentechnik einen zusätzlichen Rechenzeitgewinn erschließt.

In Tabelle 3.1 werden die im Sprachgebrauch der Genetik und der Genetischen Algorithmen verwendeten Begriffe gegenübergestellt. Sie sollen im weiteren Text gleichwertig verwendet werden.

Genetik	Genetische Algorithmen
Chromosom	Zeichenkette, String
Gen	Eigenschaft oder Charakter
Allel	Ausprägung oder Wert einer Eigenschaft
Locus	Position auf der Zeichenkette
Genotyp	Struktur
Phänotyp	Parametersatz, alternative Lösung

Tabelle 3.1: Vergleich der Terminologie der Genetik und Genetischer Algorithmen (nach [61])

### 3.1.1 Ablauf

Anhand Abb. 3.1 sollen die wichtigsten Schritte beim Ablauf der Genetischen Algorithmen beschrieben werden.

Ausgehend von einem Problem muss zunächst die Zielfunktion/ Gütefunktion definiert werden. Wichtigstes Erfolgskriterium für einen wirksamen Einsatz Genetischer Algorithmen ist eine geeignete Kodierung der zu optimierenden Größen, d.h. deren Umsetzung auf eine Zahlen- oder Zeichenfolge, die einem Chromosom entspricht.

Spezialwissen zu günstigen Lösungen und Verfahren, die eine Lösung verbessern können, sollten in den Operatoren des GA sowie bei der Erzeugung der Initialpopulation verarbeitet werden. Nach der Bewertung der Initiallösungen erfolgt die Fitnesszuweisung anhand der Werte der Gütefunktion. Die Fitness der Individuen wird bei der Selektion zugrunde gelegt, in der Individuen zur Rekombination ausgewählt werden. Die dabei entstehenden Nachkommen werden durch Mutation zufällig geringfügig verändert und anschließend bewertet. Sie bilden zusammen mit den besten Individuen der vorigen Generation die neue Generation (Wiedereinfügen). In bestimmten Abständen kann ein Austausch der besten Individuen der einzelnen Unterpopulationen erfolgen (Migration), der Kreislauf der Suche nach einem globalen Optimum wird bei Erfüllung eines Abbruchkriteriums beendet. Einfachstes Abbruchkriterium stellt dabei der Ablauf einer bestimmten Zahl von Generationen dar.

Die einzelnen Schritte in diesem Algorithmus sollen mit den zu parametrierenden Operatoren in einigen häufig verwendeten Ausprägungen im folgenden kurz vorgestellt werden. Dabei lassen sich 9 Schritte unterscheiden:

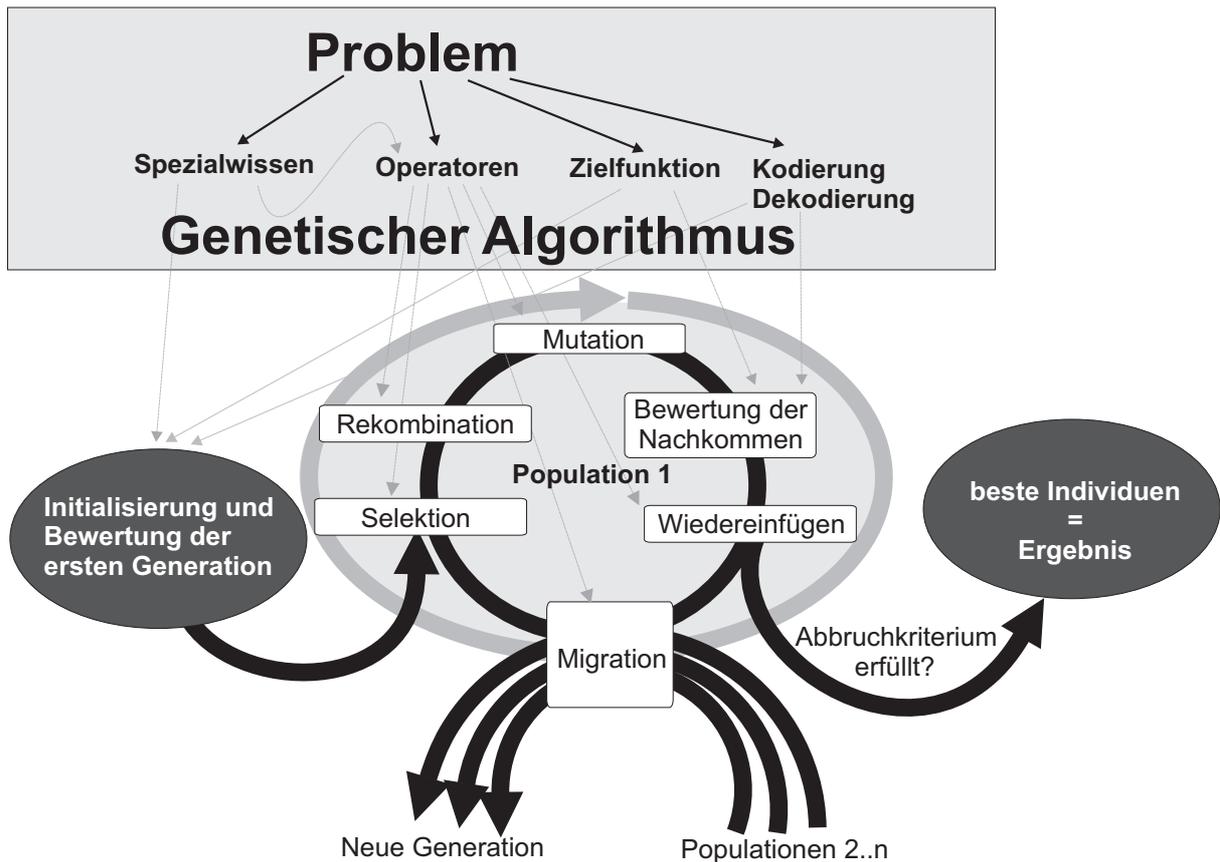


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung des Ablaufs Genetischer Algorithmen

### ① Verwendung von Variablentypen: Kodierung der Lösung

Genetische Algorithmen verwenden eine Präsentation von Variablen durch ein Alphabet minimaler Größe, was in dem von HOLLAND [84] entwickelten Schema-Theorem und der darauf beruhenden Baustein-Hypothese [11, 61] begründet wird. Das einfachste mögliche Alphabet stellen dabei die binären Zahlen dar.

Für die Kodierung reell- oder ganzzahliger Variablen als Binärzahlen hat sich sowohl die klassische binäre Kodierung als auch die GRAY-Kodierung [67] in praktischen Anwendungen als geeignet erwiesen. KELICKI und DE JONG [157] haben gezeigt, dass beide Kodierungen unabhängige Stärken aufweisen, und die gleichzeitige Verwendung von einer unterschiedlichen Kodierung je Subpopulation zu einem verbesserten Konvergenzverhalten führen kann. Nach Aussage von WHITLEY [188] ist die GRAY-Kodierung vorteilhaft, wenn der Operator Mutation verwendet wird. Deshalb soll diese im folgenden genauer vorgestellt werden.

Die aus der Nachrichtentechnik bekannte GRAY-Kodierung beruht darauf, dass bei Änderung eines einzelnen Bits sich der kodierte Wert nur um den Wert 1 ändert (HAMMINGS-Entfernung 1).

Die am häufigsten verwendete GRAY-Kodierung ist der „reflektierte binäre GRAY-Code“, der sich für eine  $n$  Bit lange Zahl rekursiv erzeugen lässt, indem dem GRAY-Code für eine  $n - 1$  Bit lange Zahl eine 0 vorangestellt wird und dieser durch den mit einer 1 vorangestellten, in

Dezimalzahl	Binärkodierung				GRAY-Kodierung			
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	0	0	0	1
2	0	0	1	0	0	0	1	1
3	0	0	1	1	0	0	1	0
4	0	1	0	0	0	1	1	0
5	0	1	0	1	0	1	1	1
6	0	1	1	0	0	1	0	1
7	0	1	1	1	0	1	0	0
8	1	0	0	0	1	1	0	0
9	1	0	0	1	1	1	0	1
10	1	0	1	0	1	1	1	1
11	1	0	1	1	1	1	1	0
12	1	1	0	0	1	0	1	0
13	1	1	0	1	1	0	1	1
14	1	1	1	0	1	0	0	1
15	1	1	1	1	1	0	0	0

Tabelle 3.2: Binärkodierung und GRAY-Kodierung

der Reihenfolge umgekehrten GRAY-Code (für  $n - 1$  Bit) ergänzt wird. In Tabelle 3.2 ist dieser reflektierte binäre GRAY-Kode einer klassischen Binärkodierung gegenübergestellt.

Die Länge eines binären Strings für die Kodierung eines reellen oder ganzzahligen Werts hängt von der Größe dessen Wertebereichs ab, bei reellen Zahlen spielt die geforderte Genauigkeit ebenfalls eine Rolle. Die Kodierung kann linear oder logarithmisch über den Gültigkeitsbereich der Variablen erfolgen, letzteres hat den Vorteil, dass in den unteren Bereichen des Kodierungsintervalls genauer nach Lösungen gesucht werden kann.

Problematisch ist die Verwendung des binären Alphabets im Falle einer ganzzahligen Optimierung, wenn ein fest vorgegebener endlicher Lösungsraum existiert [187]. Hier ist die Anwendung anderer Evolutionärer Algorithmen vorzuziehen, die unmittelbar eine reellwertige bzw. ganzzahlige Kodierung verwenden [134].

## ② Erzeugen einer Startpopulation

Der größte Teil einer Startpopulation wird in der Regel zufällig erzeugt. Ist Wissen zu möglichen guten Lösungen schon vorhanden, so sollte dieses der Startpopulation hinzugegeben werden, indem diese bekannten Lösungen in jeweils einem Chromosom kodiert werden und dann der Start-Population hinzugefügt werden.

Für die Ermittlung der zur Lösung eines Problems benötigten Populationsgröße liegen keine theoretisch begründeten Methoden vor [134]: Obwohl Abschätzungen existieren, erfolgt die genaue Festlegung dieses Parameters meist durch mehrfaches Probieren verschiedener Einstellungen.

Deshalb schlagen z.B. EIBEN et al. eine an das aktuelle Konvergenzverhalten des Algorithmus angepasste Populationsgröße vor [50].

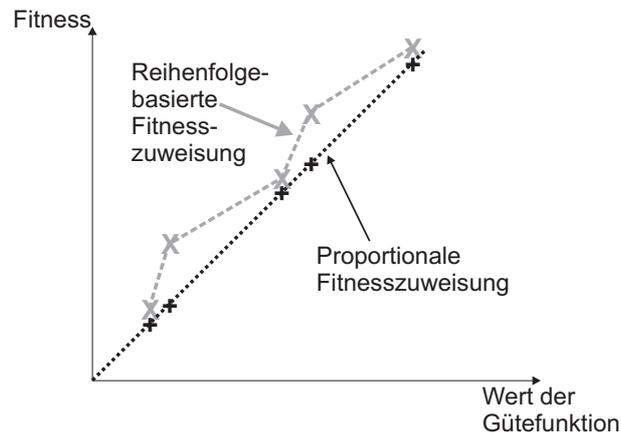


Abbildung 3.2: Proportionale und reihenfolgebasierte Fitnesszuweisung für ein Maximierungsproblem: Das beste Individuum dominiert die anderen Individuen weniger stark bei der reihenfolgebasierten Methode. So besteht eine größere Wahrscheinlichkeit, dass auch diese bei der Selektion in ausreichendem Maße berücksichtigt werden und die genetische Vielfalt in der Population erhalten bleibt.

#### ③ Fitnesszuweisung

Im Rahmen der Fitnesszuweisung wird der Wert der Gütefunktion, der anhand des Inhalts eines Chromosoms ermittelt wird, in einen allgemeingültigen Fitnesswert übersetzt. Dabei spielt naturgemäß auch eine Rolle, ob es sich bei dem zu lösenden Problem um ein Minimierungs- oder Maximierungsproblem handelt.

Die proportionale Fitnesszuweisung, in der die Fitness eines Individuums proportional zu diesem Gütefunktionswert ist, hat sich in praktischen Anwendungen nicht bewährt, deswegen wird in der Literatur größtenteils ein reihenfolgebasiertes Verfahren genutzt: Anhand des Zielfunktionswerts der Individuen werden diese sortiert. Den einzelnen Rängen werden nun unterschiedliche Fitnesswerte zugewiesen, anhand derer die Selektion erfolgen wird. Diese Fitnesszuweisung kann linear oder nichtlinear erfolgen.

Wichtig ist, dass die besten Individuen die höchsten Fitnesswerte und alle Individuen nichtnegative Fitnesswerte erhalten. Letztere Bedingung lässt sich bei proportionaler Fitnesszuweisung in Minimierungsproblemen nur umständlich realisieren.

#### ④ Selektion

Anhand der ermittelten Fitnesswerte wird die Selektion durchgeführt. Diese kann zufällig ähnlich der Selektion in der Natur zum Beispiel mit der sogenannten Roulette-Selektion („Roulette Wheel Selection“) oder der Turnier-Selektion („Tournament Selection“) durchgeführt werden.

In beiden Fällen legt der Fitnesswert die Wahrscheinlichkeit der Auswahl eines Elternindividuums fest. Dabei ist es nicht unwahrscheinlich, dass auch schlechtere Individuen gelegentlich Nachkommen produzieren. Die Roulette-Selektion ist in Abb. 3.3 dargestellt. Die Selektion erfolgt hierbei über ein zufälliges Drehen der dargestellten Roulettescheibe.

Bei der Turnier-Selektion werden zufällig eine vorgegebene Anzahl Individuen aus der Popu-

Individuum Nr.		Fitness der Individuen	Anteil der Lösung
1		85	29,5%
2		79	27,4%
3		52	18,1%
4		27	9,4%
5		16	5,6%
6		14	4,9%
7		10	3,5%
8		5	1,7%
<b>Summe der Fitnesswerte:</b>		<b>288</b>	<b>100,0%</b>

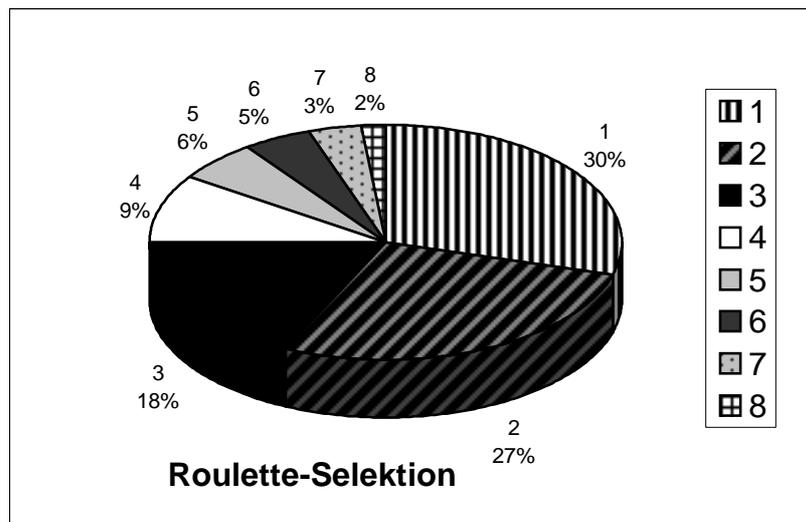


Abbildung 3.3: Roulette-Selektion für ein einfaches Beispiel

lation gewählt. Unter diesen Individuen wird das mit der größten Fitness ausgewählt.

Roulette- und Turnier-Selektion werden so oft durchgeführt, wie viele Individuen für die Rekombination benötigt werden.

Bei der „Stochastic Universal Sampling“-Selektion als Weiterentwicklung der Roulette-Selektion wird mit einem Zufallsversuch eine Anzahl Individuen gleichzeitig ausgewählt. Diese werden, wie in Abb. 3.4, durch Zeiger repräsentiert, die auf einer Strecke in gleichmäßigem Abstand fixiert sind. Diese Strecke wird anhand des Ergebnisses des Zufallsversuchs verschoben, die Zeiger zeigen dabei auf die auszuwählenden Individuen, die wie in der Roulette-Selektion einen ihrer Fitness entsprechenden Raum auf der Auswahlgerade zugewiesen bekommen.

Bei einem großen Suchraum bietet sich die „Truncation“-Selection an, die weniger der natürlichen als der menschlichen Zuchtwahl entspricht. Hierbei wird nur ein gegebener Anteil der besten der Individuen zur Fortpflanzung zugelassen. Es ist dabei zu beachten, dass durch das Vernachlässigen der schlechteren Lösungen für die Erzeugung von neuen Lösungen die Vielfalt im Genpool der Population eingeschränkt wird.

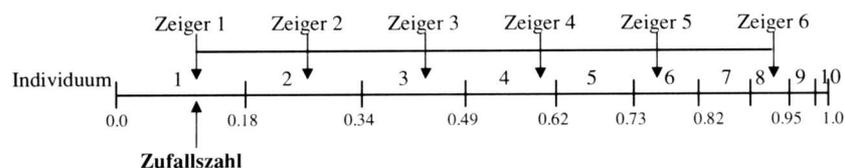


Abbildung 3.4: Selektion durch „Stochastic Universal Sampling“-Selektion (aus [134])

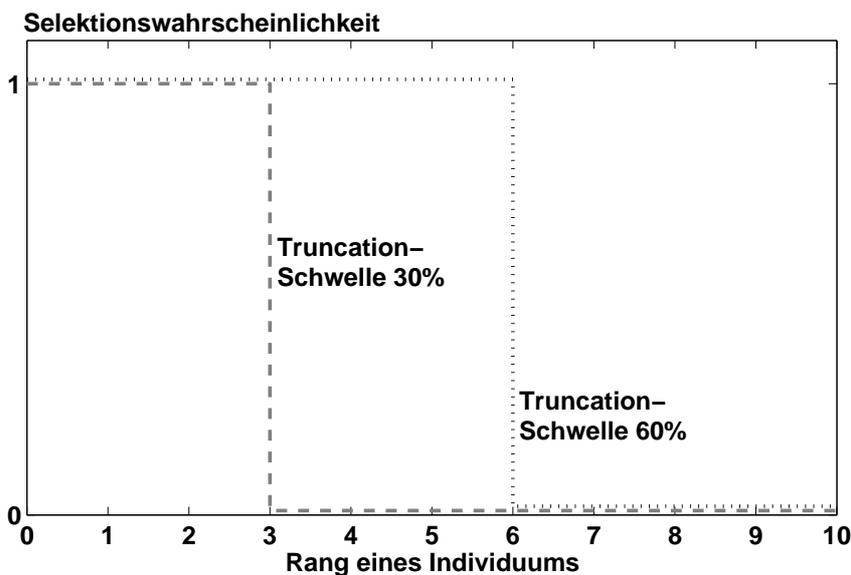


Abbildung 3.5: Prinzip der „Truncation“-Selektion: Selektionswahrscheinlichkeit eines Individuums in Abhängigkeit seines Ranges (nach [134])

### ⑤ Rekombination

Die Rekombination verknüpft Chromosome von während der Selektion ausgewählten Individuen zu neuen Chromosom-Strängen. In der Biologie ist dieses Verfahren unter dem Namen Kreuzung bekannt, in der Fachliteratur zu Genetischen Algorithmen wird der englische Begriff „Crossover“ verwendet.

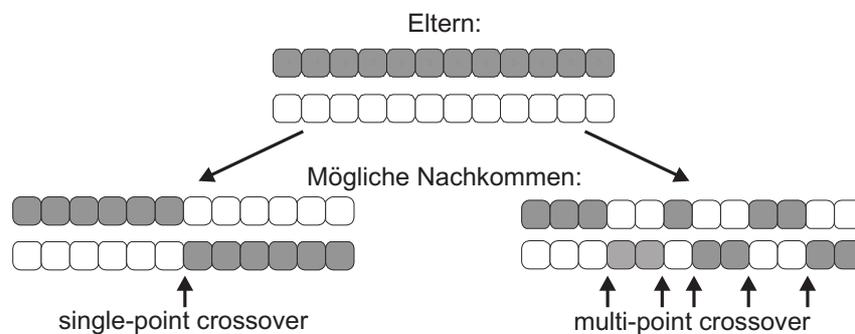


Abbildung 3.6: Verschiedene Möglichkeiten des Crossover (Kreuzung)

Der Austausch der Stränge kann an einem oder mehreren Punkten geschehen, wie es in Abb. 3.6 gezeigt ist, dabei werden die Kreuzungspunkte zufällig ausgewählt. Das Verfahren „Crossover With Reduced Surrogate“ (mit eingeschränktem Ersatz) ist eine Weiterentwicklung des in der Natur vorkommenden Prozesses der Kreuzung. Es beschränkt sich ausschließlich auf Kreuzung an den Stellen, an denen die Eltern nicht übereinstimmen, d.h. es werden immer neuartige Individuen erzeugt. Eine der möglichen Stellen, die dies bewirken, wird zufällig ausgewählt. Dieses Verfahren stellt für sehr große Suchräume die beste Lösung dar.

### ⑥ Mutation

Mutation in der Natur bedeutet eine zufällige und geringfügige Veränderung eines zufällig ausgewählten Gens. Dieses Ereignis tritt nur mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit auf.

Im Rahmen der Nutzung Genetischer Algorithmen kann durch Parametrierung der Mutationswahrscheinlichkeit und der Mutationsschrittweiten ein deutlich von der Natur abweichendes Verhalten erreicht werden, um beispielsweise das Verlassen lokaler Optima zu forcieren.

In der Regel werden aber auch hier nur vereinzelt Inhalte von Genen wenig verändert. Während für die Repräsentation von ganzen oder gebrochenen Zahlen auf Genen spezielle Verfahren entwickelt werden mussten, lässt sich die Mutation bei binär repräsentierten Lösungen einfach realisieren. Die Mutation eines Gens bedeutet hier einfach die Änderung des Inhalts auf den entgegengesetzten Wert. Hier kommt auch die besondere Bedeutung der GRAY-Kodierung bei der Umwandlung von ganzen in binäre Zahlen zur Geltung. Während bei traditioneller binärer Kodierung die Änderung höherwertiger Gene immer große Änderungen des kodierten Werts zur Folge hätten, so hat dies durch die GRAY-Kodierung nur einen geringen Einfluss, nämlich, wie im Abschnitt „① Verwendung von Variablentypen“ oben erläutert, häufig nur eine Änderung des kodierten Wertes um 1.

Die Rolle der Mutation ist bei Genetischen Algorithmen eher untergeordneter Natur, der wesentliche Optimierungsfortschritt wird durch die Rekombination erreicht [187].

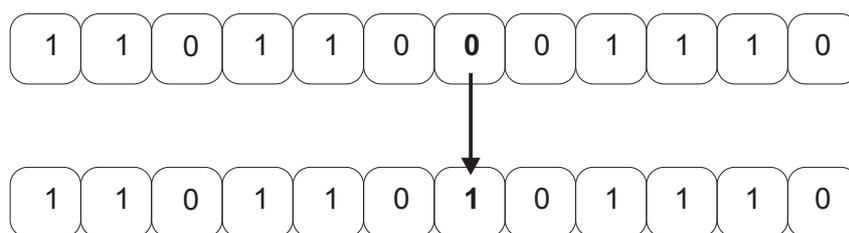


Abbildung 3.7: Mutation eines Chromosoms mit binärem Alphabet

### ⑦ Bewerten der neuen Individuen

Für die aus Rekombination und Mutation neu entstandenen Individuen wird nun der jeweilige Zielfunktionswert ermittelt. Davor muss eine Dekodierung jedes Gens in den entsprechenden Parameter des zu optimierenden Systems erfolgen. Aus jedem Chromosomenstrang muss immer genau ein Parametersatz entstehen.

Die Bewertung anhand des kompletten Parametersatzes ermöglicht eine Modifikation der Zielfunktion, ohne in den Algorithmus eingreifen zu müssen.

#### ⑧ Wiedereinfügen

Beim Wiedereinfügen bezeichnet die sogenannte Wiedereinfügerate, wieviele Individuen der neuen Generationen durch Nachkommen der alten Generation ersetzt werden sollen. Der Parameter Generationslücke („Generation Gap“) bestimmt, wie viele Nachkommen überhaupt erzeugt werden.

Bei einfachen Genetischen Algorithmen wird für beide Parameter der Wert 1 verwendet. Dies bedeutet, dass genauso viele Nachkommen erzeugt werden, wie die Generation Individuen hat und diese vollständig durch die Nachkommen ersetzt werden. Da auch die besten Individuen der alten Generation ersetzt werden, kann nicht garantiert werden, dass die neue Generation ein mindestens ebenso gutes Individuum enthält, es kann auch zu einer potenziellen Verschlechterung kommen.

Um dies zu vermeiden, wählt man beide Parameter im Allgemeinen gleich groß und jeweils kleiner als 1. Dabei bekommt der Genetische Algorithmus die Eigenschaft eines elitären Verfahrens. Die besten Individuen der alten Generation, die Elite, wird automatisch in die neue Generation übernommen. Damit überleben sehr gute Lösungen in der Population so lange, bis bessere Individuen gefunden wurden.

Eine weitere Möglichkeit des Wiedereinfügens besteht darin, mehr Nachkommen zu erzeugen als dann in die Population aufgenommen werden können (Wiedereinfügerate < Generationslücke). Hier muss nach dem Erzeugen der Nachkommen unter diesen eine Selektion ausgeführt werden. Dazu wird meist die „Truncation“-Selektion verwendet.

#### ⑨ Verwendung von Unterpopulationen/ Migration

Eine Verbesserung des Konvergenzverhaltens kann oftmals erreicht werden, wenn man die Philosophie verschiedener Unterpopulationen in den Genetischen Algorithmus integriert, die auch häufig als Insel-Modelle („Multi-Island“) bezeichnet werden. Dabei wird von der Annahme ausgegangen, dass Individuen sich in verschiedenen, voneinander abgeschotteten Gebieten in unterschiedliche Richtungen weiterentwickeln. Ermöglicht man einen Austausch der besten Individuen in bestimmten zeitlichen Abständen, so erlauben die dadurch geschaffenen neuen Kombinationsmöglichkeiten Entwicklungssprünge, die mit einer einzelnen Population nicht erreichbar wären.

### 3.1.2 Rechentechnische Umsetzung

Zur Realisierung der Grundfunktionen Genetischer Algorithmen stehen eine Vielzahl kommerzieller Anwendungen zur Verfügung. In der vorliegenden Arbeit wird die Toolbox „GEATbx“ [135] für das Simulationspaket MATLAB<sup>®</sup> genutzt. In dieser Implementierung sind die meisten der oben beschriebenen Verfahren enthalten. Die Erstellung von benutzerdefinierten Funktionen zur Initialisierung ist vorgesehen und wurde vom Autor genutzt. Hierbei wurde das Verfahren der GRAY-Kodierung zusätzlich rechentechnisch umgesetzt.

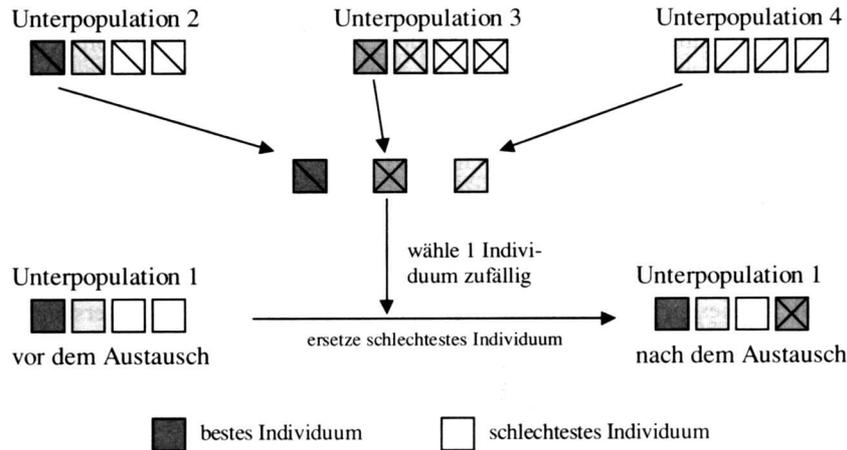


Abbildung 3.8: Migration (aus [134])

### 3.1.3 Andere Evolutionäre Algorithmen

Die zweite große Klasse Evolutionärer Algorithmen stellt die von RECHENBERG eingeführte sogenannte Evolutionsstrategie [137] dar. Hauptsächlicher Unterschied zu Genetischen Algorithmen ist die direkte Verwendung von reellwertigen Variablen als Kodierung auf dem Gen. Die Erzeugung neuer Lösungen, die im Genetischen Algorithmus fast ausschließlich durch die Rekombination realisiert wird, erfolgt bei der Evolutionsstrategie ausschließlich mit Hilfe der Mutation, für die spezielle Operatoren entwickelt wurden. Die Evolutionsstrategie wird hauptsächlich zur lokalen Parameteroptimierung verwendet.

Viele Evolutionäre Algorithmen verwenden Strategien beider Verfahren und kombinieren diese zu neuen Variationen, wie dies auch an den im folgenden Abschnitt vorgestellten Beispielen zu erkennen ist.

## 3.2 Bisher bekannt gewordene Ansätze zur Nutzbarmachung Genetischer Algorithmen für die Optimierung des Eisenbahnbetriebs

Die Bedeutung Genetischer Algorithmen für die Optimierung des Eisenbahnbetriebs ist von mehreren Autoren erkannt worden. Besonders verwiesen wird auf die unter Leitung von SCHNIEDER durchgeführten Arbeiten [180–184] sowie auf Beiträge von KWAN [101, 102, 119], VOGET und KOLONKO [97, 177].

**Berichte zu praxisrelevanten Anwendungen zu der in dieser Arbeit verfolgten Zielsetzung einer automatischen Berechnung flexibler Fahrpläne und einer optimalen Flexibilisierung und Synchronisierung von Anfahr- und Bremsvorgängen im Stadtschnellbahnbetrieb liegen allerdings nicht vor.** Dies wird nachfolgend durch die Analyse der einschlägigen Publikationen sichtbar gemacht.

### 3.2.1 Nutzung Genetischer Algorithmen zur Fahrplanung im engeren Sinne

Ein großer Teil der Anwendungen Genetischer Algorithmen in der Fahr- und Betriebsplanung befasst sich mit der Fahrplanung auf eingleisigen Strecken mit Ausweichstellen [1, 22, 103, 142]. Dieses Problem ist hauptsächlich für lange Gütertransporte relevant, wie sie in Australien und den USA anzutreffen sind.

Jeder Zug muss von seinem Belade- zu seinem Entladebahnhof fahren und dabei an bestimmten Stellen andere Züge überholen oder kreuzen lassen, so dass alle Züge so früh wie möglich an ihrem Ziel ankommen, d.h. dass die Summe der Abweichungen von tatsächlicher und frühestmöglicher Ankunft für alle Züge minimal wird. Eine typische Streckeninfrastruktur ist in Abbildung 3.9 dargestellt.



Abbildung 3.9: Typische Infrastruktur für das zu lösende Problem (nach [103])

Diesem Thema wird auch in der Literatur abseits der Genetischen Algorithmen eine hohe Aufmerksamkeit gewidmet. Theoretisch ist es mit Branch-and-Bound Methoden lösbar, dabei steigt jedoch der Aufwand exponentiell mit der Zahl der Konfliktpunkte an. Deswegen werden auch hier Genetische Algorithmen eingesetzt, um die optimale Reihenfolge der Züge entlang der Strecke zu ermitteln.

Das zu lösende Problem stellt hauptsächlich ein Reihenfolge-Problem dar, d.h. es werden Abfahrtszeiten als gegeben angenommen, Optimierungskriterium soll die Summe der Verspätungen im Ziel darstellen. Andere Kriterien wie Energieverbrauch können ebenfalls verwendet werden.

Zur Fahrplanung im Personenverkehr sind Arbeiten zur Optimierung von Anschlüssen im starren Taktfahrplan bekannt geworden [97, 98, 110, 177].

In Abbildung 3.10 ist das untersuchte Problem für ein einfaches Netz skizziert: In diesem Netz verkehren vier Linien im Stundentakt, die an vier Stationen jeweils Anschlüsse untereinander

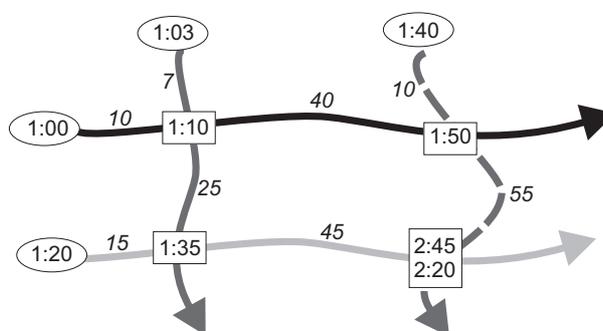


Abbildung 3.10: Optimierung von Anschlüssen im Taktbetrieb: Ein einfaches Beispiel (aus [97])

bilden. Während an drei Stationen keine Wartezeiten beim Umsteigen anfallen, lässt sich an der vierten Station ein Warten von 25 bzw. 35 Minuten nicht vermeiden. Durch Modifikation der Abfahrtszeiten der Linien lassen sich andere Lösungen erzeugen. Auch dieses Problem lässt sich prinzipiell mit Branch-and-Bound-Verfahren lösen, doch erreicht der Suchraum hier schon bei wenigen Linien eine solche Größe, dass eine Anwendung dieser Algorithmenklasse praktisch nicht mehr sinnvoll ist (zu lange Rechenzeiten).

Deshalb wurde von VOGEL [177] die Anwendung Genetischer Algorithmen vorgeschlagen, die dann von LIEBCHEN et al. [110] in die Praxis umgesetzt wurde und aktuell von KOLONKO et al. weiterentwickelt wird [97, 98]. Dies betrifft insbesondere die Betrachtung möglicher Investitionen in das zugrundeliegende Streckennetz, durch die Reisezeiten gesenkt und damit Anschlüsse verbessert werden können.

Für den flexiblen S-Bahn-Betrieb in mittleren Ballungsräumen mit seinem eher linienförmig aufgebauten Netz und häufig wechselnden Zugfolgezeiten (vgl. Abb. 1.6) ist das vorgestellte Verfahren nicht geeignet.

KWAN und MISTRY [101, 102, 119] untersuchen wie SCHNIEDER und WEGELE [180–184] die Anwendung Genetischer Algorithmen zur Trassendisposition in vermaschten Netzen aus betrieblichen Gesichtspunkten.

Dabei haben die vorgeschlagenen Verfahren deutlich von dieser Arbeit abweichende Zielstellungen:

- An der Universität Leeds [101, 102, 119] wurde ein Werkzeug für die Vorplanungsphase eines Netzbetreibers entwickelt, in der einzelne Verkehrsunternehmen ihre Fahrpläne mitteilen. Der Netzbetreiber muss nun aus diesen Wünschen einen Fahrplan als Planungsgrundlage erzeugen, der nicht unbedingt einem betrieblich machbaren Fahrplan entspricht, der aber Konflikte erkennen lässt und damit als Grundlage für weitere Verhandlungen mit den Verkehrsunternehmen dienen kann. Die automatische Generierung eines solchen Planungsfahrplans ist Anliegen der zitierten Veröffentlichungen.

Optimierungskriterium ist die „Minimale Abweichung von Kundenwünschen“. Zur Lösung werden kooperative Genetische Algorithmen verwendet, bei denen die zu optimierenden Parameter jeweils unabhängig voneinander das Evolutionsverfahren durchlaufen.

Da die mit diesem Verfahren erstellten Fahrpläne nur eine erste grobe Näherung für eine Fahrplanung darstellen und damit nicht zwangsweise sicherungstechnisch machbar sein müssen, kann eine Verwendung dieses Verfahrens im Rahmen der hier untersuchten Aufgabenstellung allerdings nicht erfolgen.

- Zur kurzfristigen Trassenplanung im Güterverkehr soll das an der Technischen Universität Braunschweig entwickelte Verfahren [180–184] genutzt werden. Hier gilt es, bei kurzfristig auftretenden Fahrtwünschen eine verfügbare Trasse zu finden, und dabei eventuell existierende Trassen zu modifizieren, so dass ein Verspätungsminimum für alle Aufträge erreicht wird.

Optimierungskriterien ist auch hier die „Minimale Abweichung von Kundenwünschen“. Als Lösungsverfahren werden Genetische Algorithmen verwendet, die auf einer mehrstufigen Kodierung der zu optimierenden Parameter beruhen.

Da das vorliegende Verfahren hauptsächlich zur Online-Disposition entwickelt wurde, liegt sein Hauptaugenmerk auf der konfliktfreien Belegung der Infrastruktur, die u.a. durch zusätzliche Haltezeiten an Betriebsstellen ermöglicht wird. Dies ist im flexiblen S-Bahn-Betrieb unüblich, auch die Untersuchung von Aufhol- und Gegenfahrten spielt hier keine Rolle, so dass sich feststellen lässt, dass auch dieser Ansatz zur Lösung des hier vorliegenden Problems der automatischen Erstellung von Betriebsprogrammen für flexible Stadtschnellbahnen nicht geeignet ist.

#### 3.2.2 Weitere Anwendungen

Neben den Problemen der Fahrplanung werden Genetische Algorithmen für viele weitere Aufgaben bei der Optimierung des Betriebs öffentlicher Verkehrssysteme eingesetzt. Eine Auswahl sei im folgenden vorgestellt:

- Koordinierte Fahrplanung von S-Bahn- und Buslinien [155]
- Personaleinsatzplanung [39, 100, 106]
- Parametersuche bei Eisenbahnsimulatoren [140]
- Mehrkriterielle Optimierung von Unterwerken im Stadtschnellbahnbetrieb [36]
- Beschriften von Bildfahrplänen [91]
- Energieoptimale Zugsteuerung zwischen zwei aufeinanderfolgenden Halten mit variierenden Randbedingungen [35, 74]
- Optimierung von Linienverläufen und Fahrplänen in Busnetzen [32, 33, 89, 133]
- Ermitteln optimaler Positionen von Haltepunkten bei Stadtbahnen [93]
- Reduktion von Harmonischen Schwingungen durch koordinierte Steuerung eines Systems von Zügen [189]
- Reisezeitminimierung durch Auslassen von Halten [94]

### 3.3 Schlussfolgerungen für die Präzisierung der Aufgabenstellung dieser Arbeit

Die vorgestellte Analyse zur Nutzbarmachung Genetischer Algorithmen im Eisenbahnverkehr macht drei Sachverhalte deutlich:

1. **Es gibt kein Verfahren, mit dem der automatische Entwurf flexibler Betriebsprogramme im Stadtschnellbahnbereich möglich wäre (Optimierungsebene 2 nach Abb. 1.1).**
2. **Entsprechendes gilt für die Flexibilisierung und Synchronisierung von Anfahr- und Bremsvorgängen (Optimierungsebene 3 nach Abb. 1.1).**
3. Andererseits kann es als gesicherte Erkenntnis angesehen werden, dass mit Genetischen Algorithmen Probleme hoher Komplexität gelöst werden können. Dies soll als Ermutigung angesehen werden, auch für die in dieser Arbeit zu lösenden Probleme der Optimierungsebenen 2 und 3 nach Abb. 1.1 Genetische Algorithmen nutzbar zu machen.  
**Der erreichte Stand der Rechentechnik mit Taktzeiten im GHz-Bereich gibt dabei die Chance zur praxiswirksamen Umsetzung entsprechender Methoden.**



## **Teil II**

# **Ein neues Verfahren zur automatischen Ermittlung flexibler Fahrpläne im nachfrageorientierten S-Bahn-Betrieb**



# 4 Gütekriterien für die Fahrplangestaltung im flexiblen Betrieb

Das Ziel der Fahrplanoptimierung muss zwei Ansprüchen genügen:

1. Den Erwartungen der Fahrgäste an eine hohe Qualität des Angebots und
2. dem Anliegen des Betreibers nach Senkung der Kosten.

Demzufolge werden im folgenden Gütekriterien sowohl aus Fahrgast- als auch aus Betreibersicht genutzt.

## 4.1 Gütekriterien aus Fahrgastsicht

### 4.1.1 Komplexe Reisezeit

Die komplexe Reisezeit  $t_k$ , die aus Benutzersicht ein wesentliches Qualitätskriterium für den öffentlichen Nahverkehr darstellt, setzt sich gemäß:

$$t_k = \sum t_f + \sum t_{\ddot{u}} + \sum t_w + \sum t_g + t_s \quad (4.1)$$

aus folgenden Komponenten zusammen

$t_f$	...	Beförderungs-/ Reisezeit
$t_{\ddot{u}}$	...	Übergangszeiten beim Umsteigen/ Übersteigen
$t_w$	...	Wartezeit
$t_g$	...	Gehzeit
$t_s$	...	Zuverlässigkeitszuschlag

(nach RÜGER [141]).

Von diesen Bestandteilen sind sowohl die Wartezeiten als auch die Übergangszeiten direkt durch die Fahrplanung beeinflussbar. Diese stellen auch die psychologisch schwierigsten Zeitan-teile in der Reisekette dar.

Mathematisch lässt sich die mittlere Wartezeit vor Antritt der Fahrt als Quadratsumme der einzelnen Zugfolgezeiten geteilt durch die verdoppelte Summe der Zugfolgezeiten fassen:

$$\bar{t}_w = \frac{t_{Z,1}^2 + t_{Z,2}^2 + \dots + t_{Z,i}^2 + \dots + t_{Z,n}^2}{2 \sum_{i=1}^n t_{Z,i}} \quad (4.2)$$

Das Minimum dieser Funktion ergibt sich für

$$t_{Z,1} = t_{Z,2} = \dots = t_{Z,i} = \dots = t_{Z,n} = t_Z \quad (4.3)$$

mit

$$\bar{t}_w = \frac{t_Z}{2}. \quad (4.4)$$

Wenn die Summe der Zugfolgezeiten als konstant angenommen wird, lässt sich das Gütekriterium zur Quadratsumme der Zugfolgezeiten vereinfachen. Dieser Wert soll im folgenden Verwendung finden und als Wartezeitindikator bezeichnet werden.

Die Formulierungen für die Wartezeit drücken damit auf einfache Weise das Bedürfnis der Kunden nach kurzen und gleichmäßigen Zugfolgezeiten aus. Bei der praktischen Realisierung muss darauf geachtet werden, dass durch das Zusammenrücken der ersten und der letzten Fahrt eine große Einsparung an Wartezeit entsteht. Diese müssen als invariantes Mindestangebot betrachtet werden, damit mit dieser Gütefunktion vernünftige Ergebnisse entstehen.

Die Wartezeit lässt sich für alle Haltepunkte des Netzes ermitteln. Um die gleichzeitige Optimierung im Gesamtnetz zu erhalten, müssen die Wartezeiten der einzelnen Haltepunkte zusammengefasst werden.

Diese Zusammenfassung kann gewichtet oder ungewichtet erfolgen, eine Wichtung kann beispielsweise anhand des Fahrgastaufkommens auf dem jeweiligen Abschnitt des Liniennetzes erfolgen.

Im flexiblen S-Bahn-Betrieb mit seinen kurzen Zugfolgezeiten ist davon auszugehen, dass Übergangszeiten in einer intermodalen Wegeketten im wesentlichen nicht durch den Fahrplan der S-Bahn, sondern durch den im Verhältnis deutlich längeren Takt der Anschlussverkehrsmittel bestimmt werden. Bei Einsatz des vorzustellenden Verfahrens im traditionellen S-Bahn-Betrieb mit langen Zugfolgezeiten könnten Übergangszeiten zu anschließenden Verkehrsmitteln direkt aus dem erstellten Fahrplan ermittelt werden und mit der Zahl der Umsteiger gewichtet ein weiteres Gütekriterium darstellen.

#### 4.1.2 Weitere Güteermkmale eines Fahrplans für Fahrgäste

Bei geringer Zugdichte von weniger als fünf oder sechs Zügen pro Stunde ist es sinnvoll und wichtig, für den Fahrgast leicht merkbare Fahrpläne zu konstruieren (z.B. „Abfahrt immer zur Minute 9 und 29 und 49“). In der Regel ist ein Fahrplan dann leicht merkbar, wenn sich ein fester Takt über längere Stunden des Tages nicht ändert und die Abfahrten immer zur selben Minute stattfinden. Die Verletzung solcher Randbedingungen könnte mit Strafpunkten bewertet und in die Gütefunktion integriert werden.

## 4.2 Mögliche Gütekriterien für den Betreiber

### 4.2.1 Verkehrswirkungsgrad

Aus Betreibersicht muss ein Fahrplan vor allem mit geringen Kosten realisierbar sein. Für den U-Bahn-Bereich wurde durch STROBEL nachgewiesen [163], dass der größte Anteil der Betriebskosten direkt proportional zur Betriebsleistung  $bl$  ist, welche in Platzkilometern pro Jahr (pro Tag) gemessen wird. Je geringer die Betriebsleistung ist, mit der ein Verkehrsaufkommen im Sinne einer Verkehrsleistung  $vl$  (gemessen in Personenkilometern pro Jahr/ pro Tag) befördert werden kann, desto größer wird auch die Auslastung der Fahrzeuge. Diese durchschnittliche Auslastung der Fahrzeuge, d.h. der Quotient aus Verkehrs- und Betriebsleistung, wird auch als Verkehrswirkungsgrad  $\eta$  bezeichnet [107]:

$$\eta = \frac{vl}{bl} 100\% \quad (4.5)$$

Bei vollautomatisch und flexibel betriebenen Stadtschnellbahnen liegt der Verkehrswirkungsgrad mit etwa 30% ungefähr doppelt so hoch wie der traditioneller U- und S-Bahnen in Deutschland [163].

Die Betriebsleistung wird durch die Angebotsplanung insofern beeinflusst, dass hier die Zahl Fahrten pro Stunde und Linie sowie die dort einzusetzenden Fahrzeuge festgelegt werden. Die Fahrplanung selbst hat nur einen geringen Einfluss auf die Betriebsleistung, der durch die aufgrund eines Fahrplans durchzuführende Zahl Leerfahrten bestimmt wird. Dieser Einfluss soll bei der Fahrplanung vernachlässigt werden.

### 4.2.2 Zahl der für einen Fahrplan benötigten Fahrzeuge

Für den Betreiber eines Schnellbahnsystems bestimmt die Zahl der für einen Fahrplan benötigten Fahrzeuge in wesentlichem Maße die Investitionen in seinen Fahrzeugpark und die damit verbundenen Abschreibungen in den folgenden Jahren. Zusätzlich beeinflusst die Größe der Flotte ebenfalls in hohem Maße die Zahl des für den Fahrplan notwendigen Personals [43].

Die Anzahl der für die Durchführung eines Betriebsprogramms benötigten Fahrzeuge lässt sich ermitteln, indem sämtlichen Fahrten eine Folgefahrt zugeordnet wird. Zur Lösung dieses Problems einer 1:1 Zuordnung (jeder Fahrt folgt genau eine weitere Fahrt) sind in der Literatur verschiedene Ansätze benannt, von denen die Anwendung der ungarischen Methode praktische Bedeutung erlangt hat [28, 60, 190]. Optimierungskriterium ist dabei die sogenannte Wendezeitensumme, die sich aus der Dauer der Übergänge zwischen jeweils zwei aufeinanderfolgenden Fahrten zusammensetzt.

Der Nachteil aller Verfahren, die eine komplette Zuordnung realisieren, ist der damit verbundene Zeitaufwand. Viele der theoretisch möglichen Fahrtkombinationen sind praktisch nicht relevant, müssen aber mit berechnet werden. Eine Anwendung im Rahmen Genetischer Algorithmen ist damit aus Gründen der Rechenzeit ausgeschlossen.

Deshalb soll im folgenden eine Methode zur Abschätzung der benötigten Fahrzeuge vorgestellt

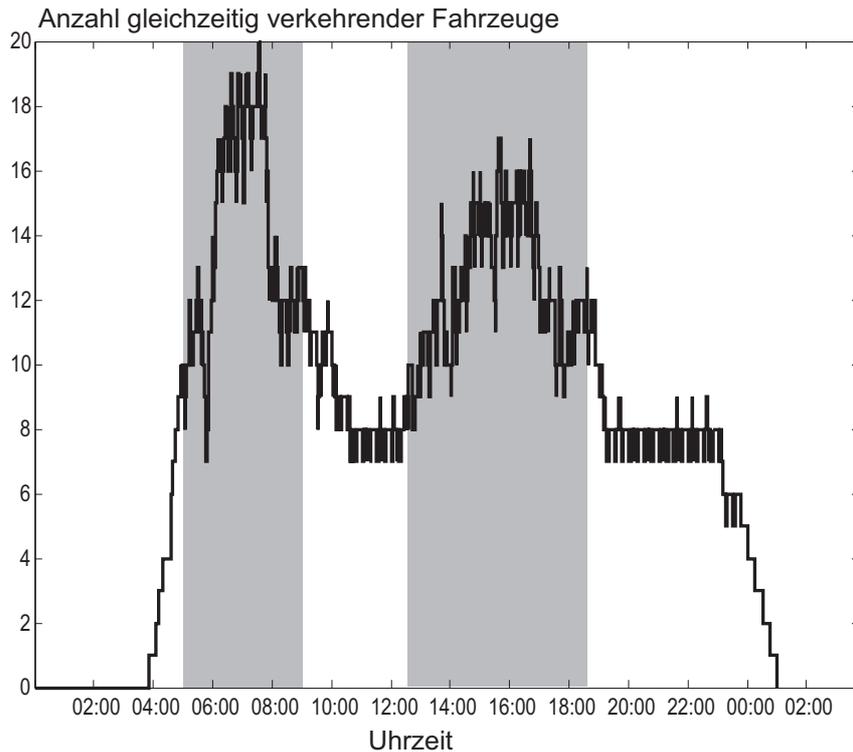


Abbildung 4.1: Stunden des größten Fahrzeugeinsatzes in der Tagesganglinie der gleichzeitig verkehrenden Fahrzeuge

werden. Dazu wird von der im flexiblen Betrieb anzutreffenden Voraussetzung ausgegangen, dass die maximale Zahl Fahrzeuge nur während der Spitzenstunden zum Einsatz kommt (vgl. Abb. 4.1).

Für den Beginn der Frühspitze wird eine Liste der gleichzeitig verkehrenden Fahrten aufgestellt. Die dafür benötigten Triebwagen bilden einen Grundstock an Fahrzeugen. Anschließend werden sämtliche in einem Zeitraum von  $\Delta T$  nach Beginn der Frühspitze beginnende Fahrten herausgefiltert. Dabei ist darauf zu achten, das Intervall nicht zu klein zu wählen, um die gesamte Verkehrsspitze zu erfassen.

In zeitlich chronologischer Reihenfolge der Abfahrt wird versucht, aus dem Pool vorhandener Fahrzeuge diejenigen herauszufinden, die in der Lage sind, die anstehende Zugfahrt zu übernehmen, und sei es unter Einlegen einer Leerfahrt.

Ein solches Fahrzeug muss einen geeigneten Typ aufweisen sowie die Bedingung

$$t_{Ankunft,LetzteFahrt} + t_{Wenden} + t_{Leerfahrt} \leq t_{Abfahrt,Folgefahrt} \quad (4.6)$$

erfüllen. Gleichzeitig muss, wenn eine Leerfahrt notwendig sein sollte, geprüft werden, ob diese in dem bereits vorliegenden Fahrplan überhaupt realisierbar ist, d.h. ob eine Trasse dafür zur Verfügung steht.

Ist dies für mehrere Fahrzeuge der Fall, so soll das mit der geringsten Leerfahrtentfernung gewählt werden. Sollten immernoch mehrere Triebwagen als Alternativen zur Verfügung stehen,

so wird der mit der frühesten Ankunftszeit gewählt.

Ist kein Fahrzeug vorhanden, das diese Fahrt übernehmen kann, wird ein neues benötigt. Dieses wird der vorhandenen Fahrzeugliste hinzugefügt.

Sind alle Folgefahrten der Phase nach der Frühspitze abgearbeitet, so werden nun sämtliche Fahrten aus dem Intervall von  $\Delta T$  nach Beginn der Nachmittagsspitze herausgesucht. Diese sollen den schon vorhandenen Fahrzeugen mit dem für die Frühspitze beschriebenen Verfahren zugeordnet werden, gegebenenfalls werden zusätzliche Fahrzeuge benötigt.

Mit dem beschriebenen Verfahren kann eine optimale Zuordnung nicht garantiert werden. Es ist also durchaus möglich, dass das vorhandene Betriebsregime mit einer geringeren Zahl Fahrzeuge abgedeckt werden kann. Eine Überschreitung des benötigten Werts ist nicht notwendig, d.h. es werden niemals mehr Fahrzeuge benötigt, als mit diesem Verfahren ermittelt.

In praktischen Untersuchungen hat sich herausgestellt, dass für gut ausgeprägte Verkehrsspitzen ein Zeitintervall von  $\Delta T = 4$  h ausreichend ist, die Zahl der notwendigen Fahrzeuge mit einer maximalen Abweichung von 1 zu ermitteln. Die Abschätzung der Zahl benötigter Fahrzeuge mit diesem Verfahren kann damit als sehr gute Näherung betrachtet werden. Je nach Struktur der Verkehrsnachfrage können für die Früh- und Nachmittagsspitze auch unterschiedliche Intervalle  $\Delta T$  verwendet werden.

### 4.2.3 Weitere mögliche Betreiberkriterien

Bei der Fahrplanoptimierung können weitere Kriterien für einen Betreiber wichtig sein, z.B. die Zahl der benötigten Triebfahrzeugführer oder die notwendige Abstellkapazität an den einzelnen Bahnhöfen.

Diese Kriterien lassen sich ausdrücklich nicht mathematisch fassen, sie müssen konkret für jeden Fahrplan anhand der konkreten Bedingungen (z.B. Rahmenbedingungen in der Dienstplangestaltung) ermittelt werden.

Durch die Anwendung des Genetischen Algorithmus lassen sich solche zusätzlichen Kriterien leicht verarbeiten. Bei der Implementierung muss allerdings darauf geachtet werden, dass die Ermittlung des Gütekriteriums nur wenig Rechenzeit benötigen sollte, da diese maßgeblich die Rechenzeit des gesamten Verfahrens bestimmt.

## 4.3 Weitere mögliche Gütekriterien allgemeiner Art

### 4.3.1 Realisierung des Verkehrsaufkommens

Um zu garantieren, dass kein Zug planmäßig mehr als mit dem vorgegebenen Auslastungskoeffizient  $\gamma$  ausgelastet ist, kann die realisierte Auslastung während einer Stunde  $h$  mit in die Gütefunktion übernommen werden. Überschreitet die Auslastung den vorgegebenen Schwellwert  $\gamma$ , wird die Lösung verschlechtert, in dem zum eigentlichen Wert des Gütefunktionalen Strafpunkte addiert werden. Dies ist ein bei Genetischen Algorithmen übliches Vorgehen, wenn Randbedingungen abgebildet werden sollen [130]. Eine für dieses Problem geeignete quadratische

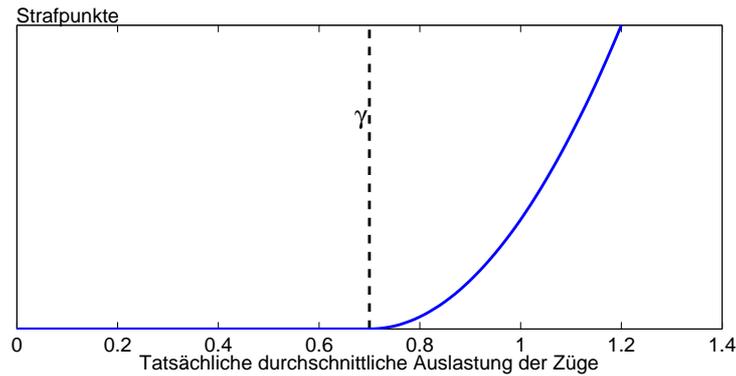


Abbildung 4.2: Prinzipieller Verlauf einer Strafpunktfunktion für zu hohe Auslastung der Züge: Der Skalierungsfaktor muss anhand der anderen Gütekriterien festgelegt werden.

Strafpunktfunktion ist in Abb. 4.2 dargestellt.

Mit diesem Ansatz werden zwei Sachverhalte berücksichtigt:

- Geringe Überschreitungen der Maximalauslastung fallen wenig ins Gewicht. Diese lassen sich unter Beachtung der zufälligen Schwankungen des Verkehrsaufkommens um den verwendeten Mittelwert ohnehin kaum vermeiden.
- Hohe Überschreitungen des Auslastungskoeffizienten werden stark penalisiert, denn das Überschreiten der Kapazitätsgrenze ist damit im praktischen Betrieb kaum zu vermeiden.

#### 4.3.2 Nichtberücksichtigen von Fahrten

Bei ungünstiger Disposition von Fahrten auf einem Abschnitt kann es zu einer verringerten Zahl freier Trassen in anderen Abschnitten kommen. Dabei können unter Umständen einzelne Zugfahrten nicht disponiert werden, die eigentlich zur Beförderung des nachgefragten Verkehrsaufkommens oder zur Herstellung des aus betrieblicher Sicht wünschenswerten Gleichgewichts an Fahrzeugen an den unterschiedlichen Linienenden nötig wären. Ein solches Nichtdisponieren von Fahrten kann ebenfalls mit zusätzlichen Strafpunkten bewertet werden.

Bei Verwendung der Strafpunktfunktion aus dem vorigen Abschnitt ist die Nichtverfügbarkeit von Trassen für verkehrlich notwendige Fahrten schon berücksichtigt. Fahrten, die aus betrieblichen Gründen durchgeführt werden müssten, für die aber keine Trasse zur Verfügung steht, werden nur mit der hier eingeführten Strafpunktfunktion behandelt. Es bietet sich eine lineare Abhängigkeit von der Zahl nicht disponierter Fahrten an.

## 4.4 Einführung einer mehrkriteriellen Gütefunktion

Klassische Genetische Algorithmen arbeiten mit einer eindimensionalen Gütefunktion [61, 134, 187].

Bei dem hier vorliegenden Ziel der gleichzeitigen Minimierung von Fahrzeuganzahl und Wartezeiten spielt für den Betreiber und damit den Ersteller der Fahrpläne die Zahl der benötigten Fahrzeuge eine entscheidende Rolle, da diese finanziell enorme Auswirkungen hat [43]. Deshalb soll in diesem Falle die gewichtete Aggregation der einzelnen Gütefunktionen verwendet werden, bei der die Fahrzeuganzahl mit einem sehr hohen Gewichtungsfaktor bewertet wird.

Es besteht andererseits auch die Möglichkeit, einem Anwender die Auswahl zwischen verschiedenen pareto-optimalen Lösungen zu überlassen (vgl. Abb. 4.3). Im konkreten Beispiel der gleichzeitigen Optimierung der Zahl Fahrzeuge und der Wartezeit ist dies für eine gegebene Zahl Züge jeweils der Fahrplan mit minimaler Wartezeit, d.h. der Anwender muss dann selbst entscheiden, welcher Lösung er den Vorzug gibt. Dieses Verfahren ist sinnvoll, wenn die Zahl der vorhandenen Fahrzeuge bekannt ist und Lösungen mit geringerer Zahl notwendiger Fahrzeuge existieren. Die Verfahren NSGA-II von DEB et al. [44] und SPEA von ZITZLER et al. [192] sind die am häufigsten zitierten Verfahren für diese Probleme.

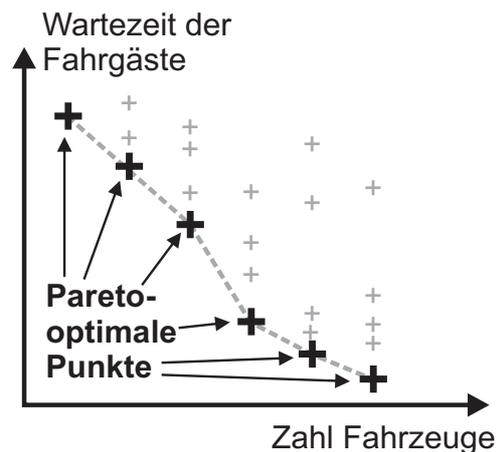


Abbildung 4.3: Pareto-optimale Punkte: Alle anderen Fahrpläne weisen für eine gegebene Zahl Fahrzeuge eine höhere Wartezeit auf (und umgekehrt).



## 5 Ein mehrstufiges Verfahren unter Verwendung Genetischer Algorithmen

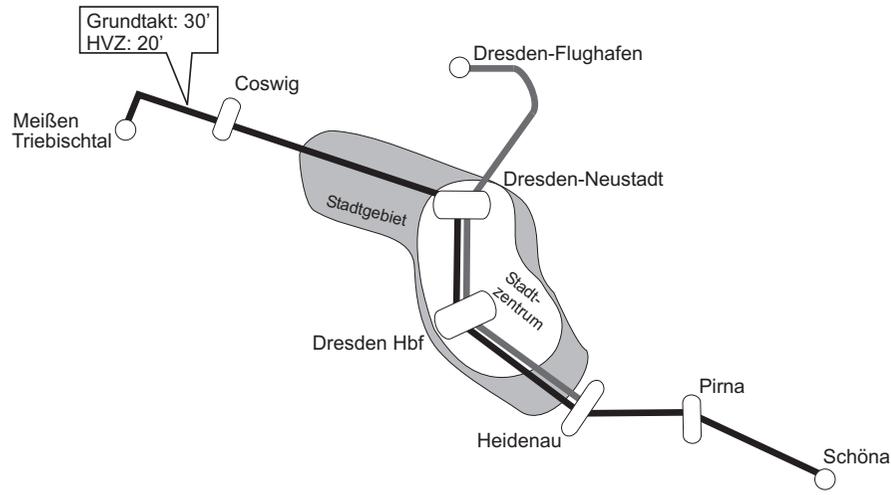
Ausgehend von den in allgemeiner Form dargestellten Gütekriterien soll nachfolgend ein neuartiges Verfahren zum Entwurf flexibler S-Bahn-Fahrpläne vorgestellt werden. Um die Herleitung verständlich und möglichst anschaulich zu gestalten, soll dies anhand eines konkreten Beispiels erfolgen. Gewählt wurden dazu verschiedene Ausbaustufen des S-Bahn-Netzes Dresden, für das im Rahmen des BMBF-Leitprojektes „intermobil Region Dresden“ umfangreiche Untersuchungen zu unterschiedlichen Szenarien auf dem Weg vom heute praktizierten konventionellen Betrieb über die Nutzung von innovativen Fahrerassistenzsystemen nach Abb. 1.2 bis zur Vision eines vollautomatisierten (fahrerlosen) Systems durchgeführt wurden (vgl. Abb. 5.1 und [150]). Davon sollen im folgenden ausschließlich die in Tabelle 5.1 aufgeführten Szenarien mit flexibler Betriebsführung auf mindestens einer Linie betrachtet werden.

Szenario	Status quo heutiger Betrieb	M2-PZB mit <u>Manueller</u> Zugsteuerung und <u>Punktförmiger</u> <u>ZugBeeinflussung</u>	M3-ETCS mit <u>Manueller</u> Zugsteuerung und <u>linienförmiger</u> Zugbeeinflussung (z.B. ETCS-Level 2)	AGT <u>Automated</u> <u>Guideway</u> <u>Transit</u> (vollautomatische Fahrzeugführung)
minimale Zugfolgezeit	15 min	5 min	3,75 min	2 min
max. Zahl Fahrten/ Stunde	4	12	16	30
verfügbare Linien	2	5	6	6
davon flexibel betrieben	0	1	2	2
Zahl Plätze pro Fzg.	1000	300	213	145

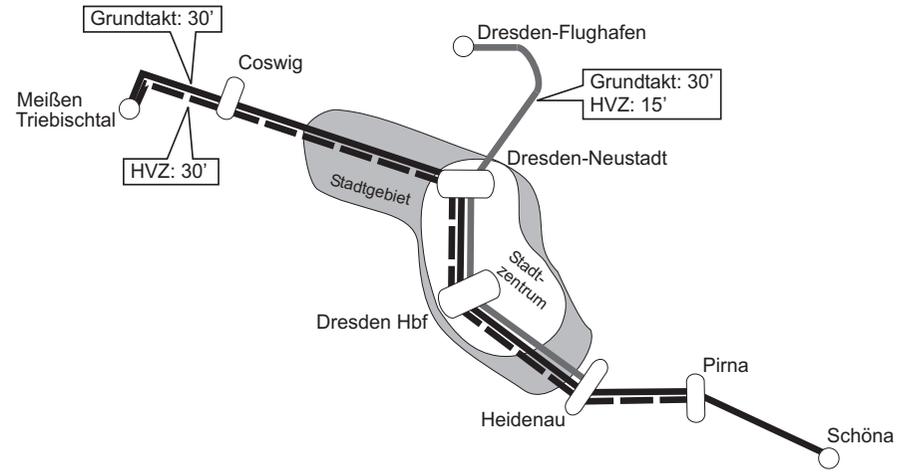
Tabelle 5.1: Vergleich des heutigen Betriebs (Status-quo) mit den von SCHOLZ [149] vorgeschlagenen Szenarien flexibler Betriebsführung bei der S-Bahn Dresden

### 5.1 Ein- und Ausgabedaten sowie Anwendungsgebiete des Verfahrens

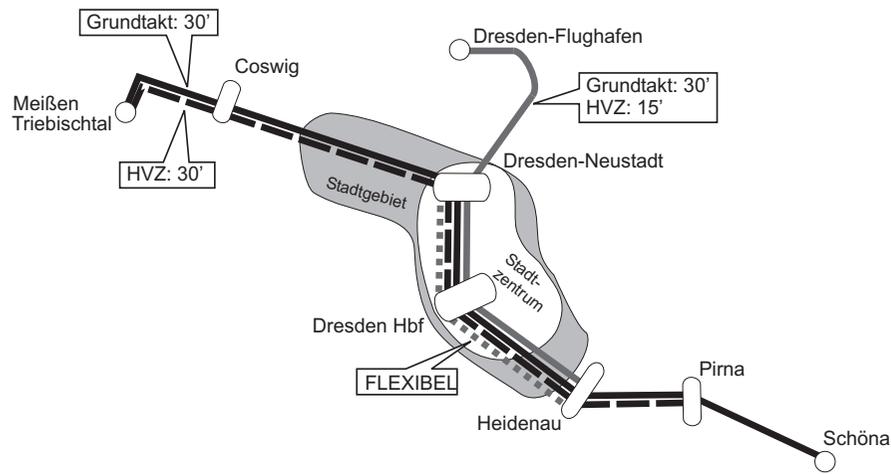
Mit dem in diesem Kapitel vorzustellenden Verfahren GENflex-S (GENetische Algorithmen zur Fahrplanung im flexiblen S-Bahn-Betrieb) sollen erstmalig automatisch Fahrpläne für flexi-



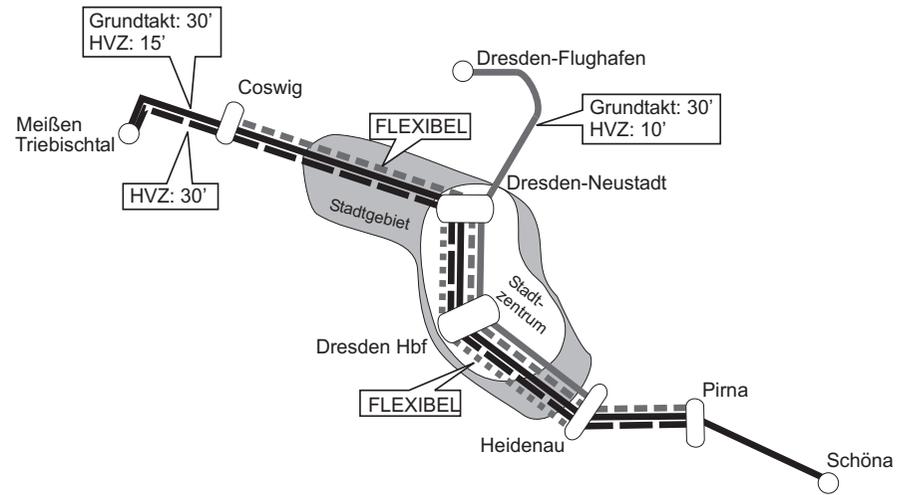
(a) Traditionelles Szenario: status quo



(b) Traditionelles Szenario: M1-PZB



(c) Flexibles Szenario: M2-PZB



(d) Flexible Szenarien: M3-ETCS / AGT

Abbildung 5.1: Szenarioanalyse Flexible S-Bahn Dresden: Alternative Liniennetzvarianten mit Verstärkerlinien zur räumlichen Flexibilisierung (aus [150])

ble Stadtschnellbahnen erzeugt werden können. Die Eingangsdaten für das System sind (vgl. Abb. 5.2):

- Liniennetz: Alle Stationen mit den Linien, die diese Stationen bedienen,
- Verkehrsaufkommen als stundenfeine Quelle-Ziel-Matrizen (Wieviele Fahrgäste fahren innerhalb einer Stunde woher wohin?), wie sie z.B. mit den Verfahren VISEVA oder NAPROS bestimmt werden können [113]
- Strecken- und Fahrzeugparameter, dazu zählen:
  - Fahr- und Haltezeiten an den einzelnen Stationen, Sämtliche Zugfahrten einer Linie sollen dabei auf allen gemeinsam befahrenen Streckenabschnitten die selben Fahr- und Haltezeiten aufweisen. Diese Randbedingung wird in der Praxis, insbesondere im Mischbetrieb, oft nicht eingehalten. Hier werden, z.B. durch zusätzliche Haltezeiten an Bahnhöfen, Überholungen einzelner Fahrten ermöglicht. Die Modifikation einer Fahrplantrasse soll im Rahmen dieser Untersuchungen jedoch nicht diskutiert werden, dies sei späteren Arbeiten vorbehalten.
  - Wendezeiten, die von den Fahrzeugen mindestens benötigt werden,
  - die Platzzahl pro Fahrzeug  $n_P$ ,
  - den gewünschten maximalen Auslastungsgrad  $\gamma$ ,
  - die minimalen Zugfolgezeiten für die einzelnen Abschnitte, da diese hauptsächlich von der verwendeten Sicherungstechnik abhängen, soll für alle Abschnitte des zu untersuchenden Netzes ein einziger Wert verwendet werden. Bei hochleistungsfähigen S-Bahnen ist es in der Praxis durchaus üblich, den zentralen Abschnitt für eine geringere Zugfolgezeit auszurüsten [138].
  - zu beachtende Fahrten des Mischverkehrs,
- eine mögliche Initiallösung, d.h. einen Fahrplan, den ein Experte erstellt hat, und der modifiziert werden soll.

Die zu erstellenden Fahrpläne sollen dabei den im vorigen Kapitel beschriebenen Gütekriterien bestmöglich Rechnung tragen, d.h. einerseits den Fahrgästen auf allen Relationen möglichst gleichmäßige Takte anbieten und damit geringe Wartezeiten verursachen sowie andererseits dem Betreiber des S-Bahn-Systems geringe Kosten in Form einzusetzender Fahrzeuge erzeugen. Diese Fahrpläne stellen die Ausgangswerte des zu entwickelnden Verfahrens dar.

Die Anwendung des Algorithmus soll sich auf Netze beschränken, die die folgenden - häufig anzutreffenden - Voraussetzungen erfüllen:

1. Im Zentrum des Ballungsraums verkehren alle dieses bedienende Linien auf einem Abschnitt. Sie benutzen dabei die selbe Infrastruktur.
2. Der weniger dicht besiedelte Außenbereich des Ballungsraums wird durch verschiedene Außenäste des S-Bahn-Netzes bedient.

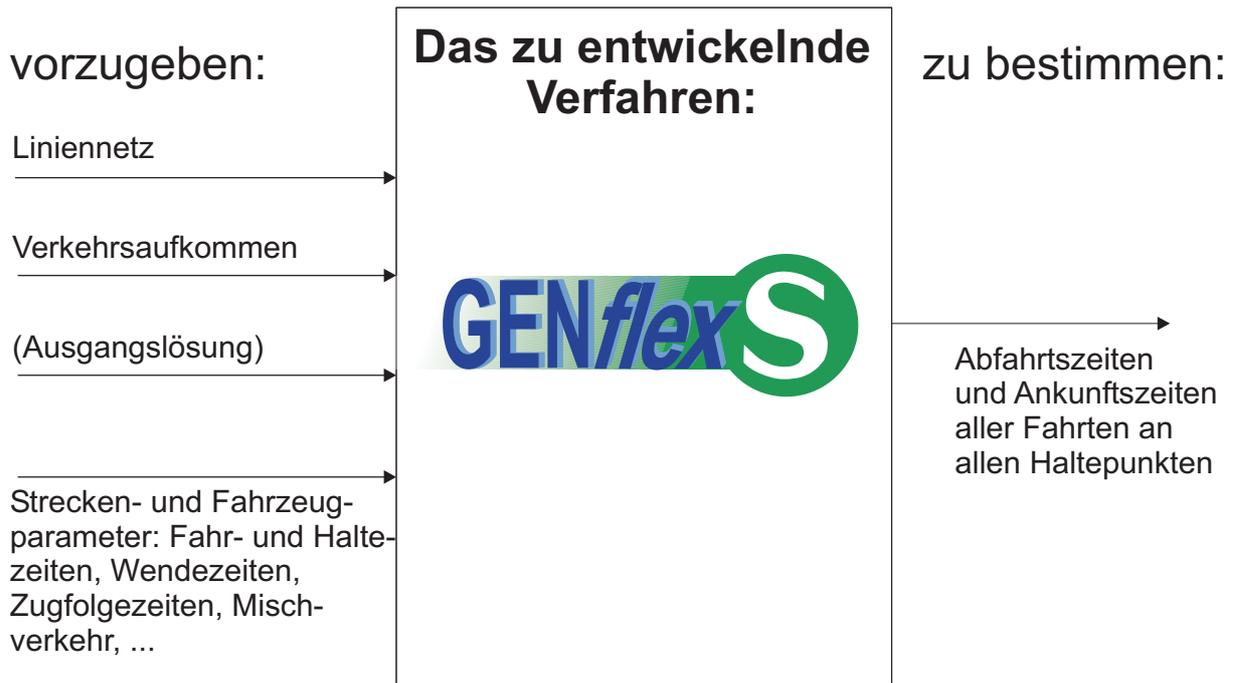


Abbildung 5.2: Blockschema des Verfahrens GENflex-S

Mit dieser Netzstruktur wird gleichzeitig das Verkehrsaufkommen repräsentiert. Die Bedienung der Außenäste mit geringem Verkehrsaufkommen erfolgt nur mit relativ langen Zugfolgezeiten. Im Zentrum des Ballungsraums mit hoher Bevölkerungsdichte wird durch die Überlagerung verschiedener Linien ein qualitativ hohes Verkehrsangebot mit kurzen Zugfolgezeiten bereitgestellt.

Aufgrund der kurzen Zugfolgezeiten wird der Verkehr im Zentrum in der Regel auf einer speziell für den S-Bahn-Verkehr vorgesehenen Infrastruktur durchgeführt. Auf den Außenästen ist häufig Mischbetrieb mit Regional- oder Fernverkehrslinien anzutreffen. Die in einem solchen Netz verkehrenden Linien lassen sich folgenden Kategorien zuordnen (siehe auch Abb. 5.3):

1. Linien, die den zentralen Abschnitt, zumindest teilweise, befahren. Dazu zählen:
  - a) Linien, die alle Teilabschnitte des zentralen Abschnittes bedienen und dabei
    - i. Außenäste mit Mischverkehr
    - ii. Außenäste ohne Mischverkehr
    - iii. keine Außenästebenutzen.
  - b) Linien, die nur einzelne Teilabschnitte des zentralen Abschnitts bedienen und dabei
    - i. Außenäste mit Mischverkehr
    - ii. Außenäste ohne Mischverkehr
    - iii. keine Außenästebenutzen.

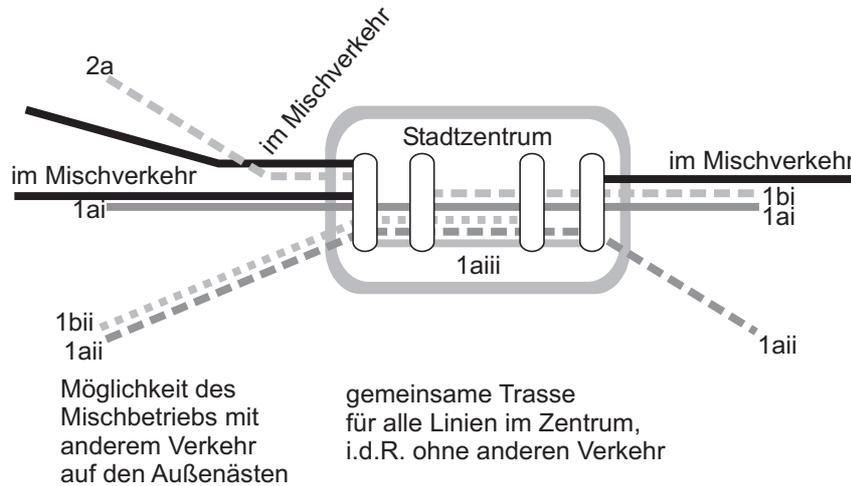


Abbildung 5.3: Beispielnetz mit Linien der eingeführten Kategorien

2. Linien, die ausschließlich Außenäste des Netzes bedienen.
  - a) Außenäste mit Mischverkehr
  - b) Außenäste ohne Mischverkehr

## 5.2 Ablauf des Verfahrens

Fahrplanung wird im Allgemeinen schrittweise durchgeführt [112]. Das zu entwickelnde Verfahren soll dabei, wie in Abb. 5.4 dargestellt, folgende drei Schritte abdecken:

1. Ermitteln der notwendigen Fahrtenhäufigkeit und Kapazität der einzelnen Linien
2. Invariantes Mindestangebot (Grundtakt)
3. Finden der Abfahrtszeiten der zu disponierenden Fahrten

Im weiteren Verlauf dieses Kapitels sollen diese drei Punkte detailliert dargestellt werden.

Nachdem die Abfahrtszeiten aller Fahrten des Fahrplans feststehen, muss noch eine Umlaufbildung, d.h. eine Zuweisung von Fahrzeugen zu den einzelnen Fahrten erfolgen. In der Regel resultieren aus dieser Umlaufbildung Leerfahrten, die durchgeführt werden können, um Rollmaterial einzusparen. Natürlich können solche Leerfahrten auch als reguläre Fahrten den Kunden angeboten werden. Dann sollten diese allerdings in ihren Abfahrtszeiten so gelegt werden, dass die beschriebenen Gütekriterien bestmöglich erfüllt werden (z.B. Wartezeit, Auslastung der Züge). Dabei müssen die zuvor durch die Optimierung des Verkehrsangebots bereits belegten Trassen beachtet werden. Auf diese Besonderheiten bei der Umlaufbildung soll am Ende dieses Kapitels kurz eingegangen werden.

Letzter Schritt der Fahrplanung ist die Zuordnung von Personal zu den einzelnen Zügen, dies soll allerdings hier nicht untersucht werden.

Alle Untersuchungen zur automatisierten Fahrplanung sollen dabei an einem Liniennetz für die S-Bahn Dresden durchgeführt werden, das im Rahmen der Untersuchungen von SCHOLZ entstand [149] und im höchsten Maße räumlich strukturiert und flexibilisiert ist. Dieses Netz ist mit seinen Bahnhöfen, Linien und den für die Linienumlegung maßgebenden Abschnitten in Abb. 5.5 dargestellt.

### 5.3 Transformation des Verkehrsaufkommens anhand der Reisezeiten

Mit Hilfe verkehrsplanerischer Werkzeuge, wie z.B. dem auf VISUM/ VISEVA basierenden System NAPROS [113] oder anderer, das System S-Bahn beschreibender Verfahren wie das von STROBEL und SCHOLZ entwickelte Grobmodell [149–151], lässt sich für alle Quelle-Ziel-Beziehungen in einem solchen Netz ein Verkehrsaufkommen  $VA$  abschätzen.

Solche Quelle-Ziel-Matrizen sollten für das hier untersuchte Problem mindestens stundenfein vorliegen. Die räumliche Präzision dieser Daten umfasst im Allgemeinen jeden einzelnen Haltepunkt. Hier ist es ausreichend, die Verkehrsaufkommen aus jedem Abschnitt in jeden Abschnitt zu betrachten, der von einer unterschiedlichen Kombination von Linien bedient wird, d.h. die haltepunktbezogenen Quelle-Ziel-Matrizen können auf Abschnitte zwischen zwei Bahnhöfen aggregiert werden. Für das von SCHOLZ [149] entwickelte räumlich stark strukturierte Liniennetz aus Abb. 5.5 ergeben sich unter Beachtung der dort besonders gekennzeichneten maßgebenden Streckenabschnitte folgende Abschnitte, für die ein Quell- bzw. Zielverkehrsaufkommen ermittelt werden muss:

- Meißen-Triebischtal - Neusörnewitz
- Coswig - Dresden-Pieschen
- Dresden-Flughafen - Dresden-Industriegelände
- Dresden-Neustadt - Dresden-Freiburger Str.
- Dresden-Strehlen - Heidenau
- Heidenau-Süd - Pirna
- Obervogelgesang - Bad Schandau
- Krippen - Schöna

Die Aufsplittung am Dresdner Hauptbahnhof ist dabei nur notwendig, weil sich der aufkommensstärkste Abschnitt des gesamten Netzes unmittelbar zwischen Dresden-Hauptbahnhof und Dresden-Strehlen befindet.

In Abb. 5.6 ist für die Richtung Meißen - Schöna des Dresdner S-Bahn-Netzes dargestellt, wie sich dieses Verkehrsaufkommen, dass jeweils in der gleichen Stunde für die einzelnen Abschnitte

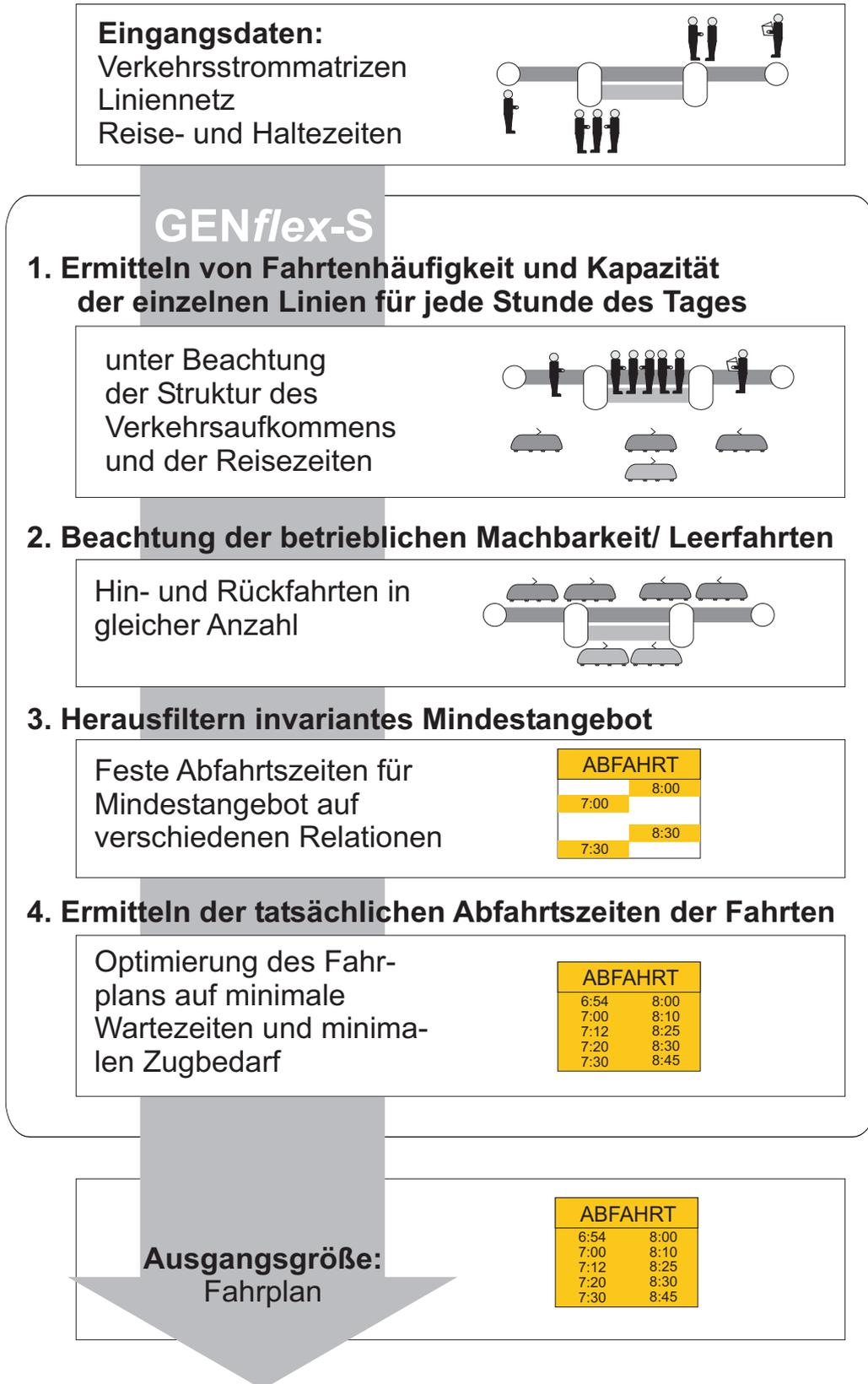


Abbildung 5.4: Grobkonzept GENflex-S

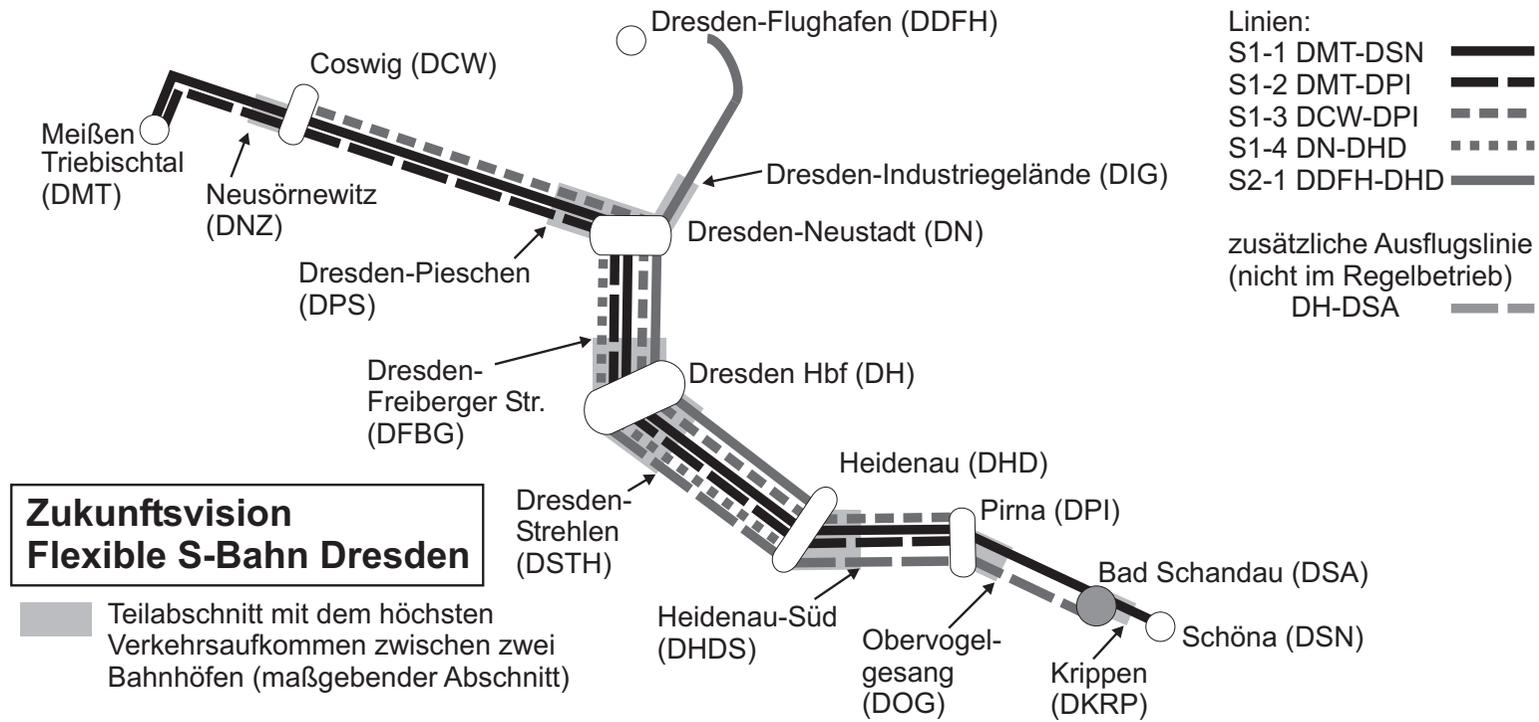


Abbildung 5.5: Flexibles Liniennetz für die S-Bahn-Dresden: Neben den Namen der Haltepunkte sind auch die DS100 Bezeichnungen angegeben, die im folgenden zur Indizierung verwendet werden. Alle dargestellten Linien sind nur im AGT-Szenario im Einsatz, in den anderen Szenarien verkehren nur Untermengen der hier dargestellten Linien (vgl. Abb. 5.1)

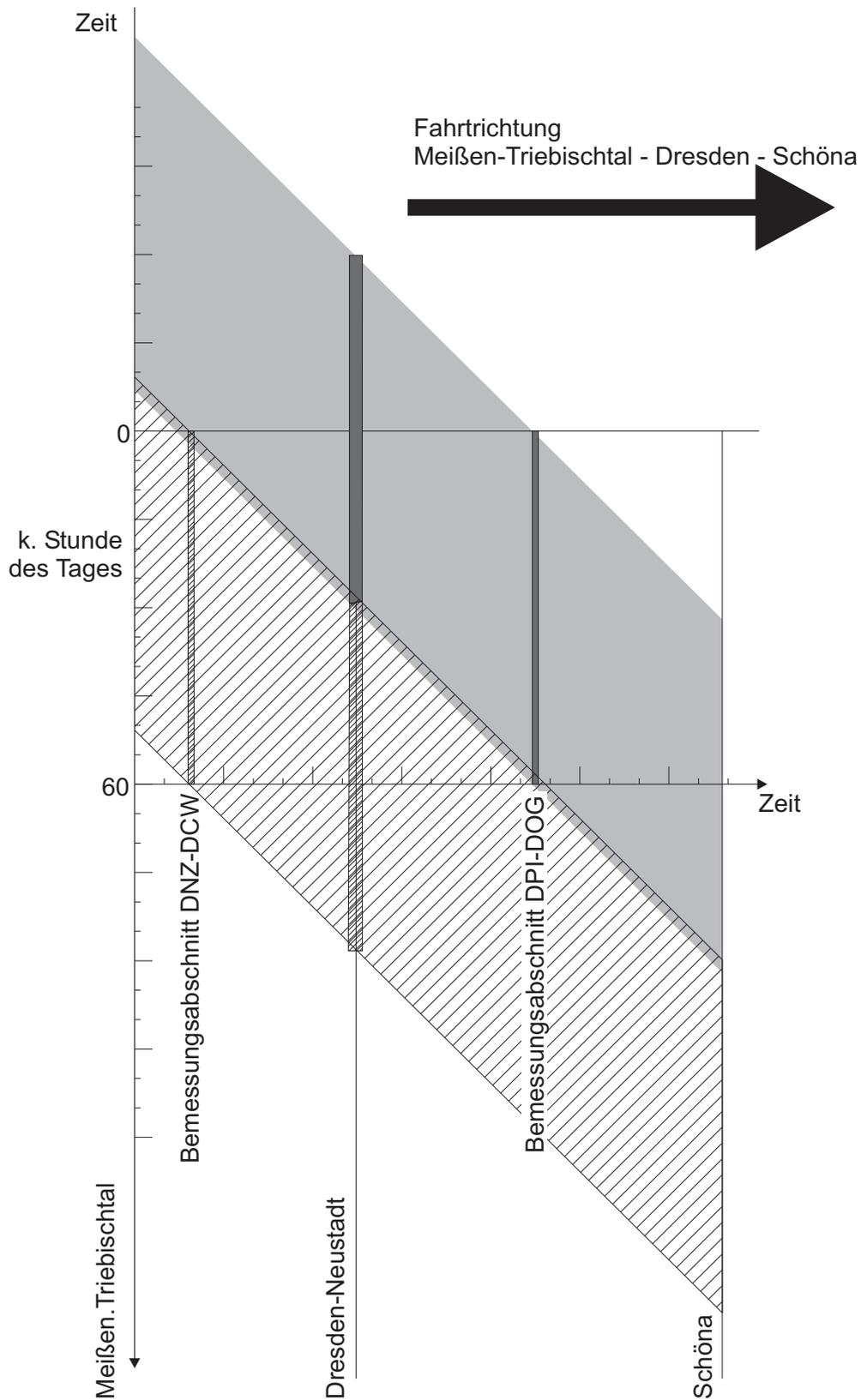


Abbildung 5.6: Reisezeitproblematik (I) in Richtung Schöna: Das in der selben Stunde auf verschiedenen Abschnitten prognostizierte Quellverkehrsaufkommen verteilt sich im Netz mit der vorgegebenen Reisegeschwindigkeit.

berechnet wurde, unter Beachtung der vorgegebenen Linien und Reisezeiten im Netz verteilen würde. Es ist ersichtlich, dass diese zwar zeitlich konsistenten, aber räumlich inkonsistenten Daten keine Grundlage bilden können für die Zuordnung von Fahrten zu einzelnen Linien. Um diese realisieren zu können, muss eine Transformation des Verkehrsaufkommens auf einen gemeinsamen Abschnitt durchgeführt werden, wie sie in Abb. 5.7 dargestellt ist und im folgenden ausführlich erläutert werden soll.

Die maßgebenden Streckenabschnitte der jeweiligen Abschnitte liegen eine gegebene Reisezeit  $t_{RZ,z,i}$  vom zentralen Abschnitt des Netzes entfernt. Das heißt, eine Fahrt, die in der Stunde  $h$  im Abschnitt  $i$  verkehrt, kann z.B. Verkehrsaufkommen aus vorhergehenden Stunden  $h_v < h$  aus den bereits passierten Abschnitten  $m < i$  befördern. Genauso ist es möglich, dass eine Fahrt erst in einer der nachfolgenden Stunden  $h_n > h$  auf danachliegenden Abschnitten  $n > i$  eintrifft und dort erst Verkehrsaufkommen jener Stunde befördert (vgl. Abb. 5.7 am Beispiel des Dresdner S-Bahn-Netzes).

Zur Ermittlung räumlich **und** zeitlich konsistenter Daten für die Ermittlung der Fahrtenhäufigkeiten auf den einzelnen Linien bietet sich eine Transformation auf den zentralen Abschnitt des Netzes an. Stundenweise gegebenes Verkehrsaufkommen wird dabei auf maximal zwei verschiedene Stunden umgelegt.

Je nachdem, ob ein Abschnitt  $i$  in Fahrtrichtung vor oder nach dem zentralen Abschnitt  $z$  liegt, ergeben sich die Stunden  $h_1$  und  $h_2$ , in die das aus dem betrachteten Abschnitt  $i$  in der Stunde  $h$  vorhandene Verkehrsaufkommen  $VA_{ij}(h)$  transformiert werden muss:

$$h_1 = h + \frac{t_{RZ,z,i}}{|t_{RZ,z,i}|} \left\lfloor \frac{|t_{RZ,z,i}|}{60 \text{ min}} \right\rfloor \quad (5.1)$$

$$h_2 = h + h_1 + \frac{t_{RZ,z,i}}{|t_{RZ,z,i}|} \quad (5.2)$$

Die Notation  $\lfloor x \rfloor$  bezeichnet dabei die größte ganze Zahl, die kleiner oder gleich  $x$  ist.

Die Reisezeit  $t_{RZ,z,i}$  wird in Minuten angegeben und ist negativ, wenn der zu untersuchende Abschnitt  $i$  bereits vor dem zentralen Abschnitt  $z$  passiert wurde und damit  $i < z$  gilt.

Der Anteil des Verkehrsaufkommens, der auf die entsprechende Stunde des zentralen Abschnitts transformiert wird,  $VA_{ij}(h)^{RZ}$ , lässt sich für die beiden Stunden  $h_1$  und  $h_2$  folgendermaßen bestimmen:

$$VA_{ij}(h_1)^{RZ} = \frac{(|h_1 - h| + 1) 60 \text{ min} - |t_{RZ,z,i}|}{60 \text{ min}} VA_{ij}(h) \quad (5.3)$$

$$\begin{aligned} VA_{ij}(h_2)^{RZ} &= \frac{|t_{RZ,z,i}| - |h_1 - h| 60 \text{ min}}{60 \text{ min}} VA_S(h)_{i,i+1} \\ &= VA_{ij}(h) - VA_{ij}(h_1)^{RZ} \end{aligned} \quad (5.4)$$

Mit der durchgeführten Transformation lässt sich nun ermitteln, wie viele Fahrten jeder Linie in einer gegebenen Stunde den zentralen Abschnitt des Netzes passieren müssen, um das gegebene Verkehrsaufkommen zu bewältigen. Verkehrt eine Linie nicht auf diesem zentralen Abschnitt, so kann das Verfahren trotzdem angewendet werden: In einem solchen Falle würde die

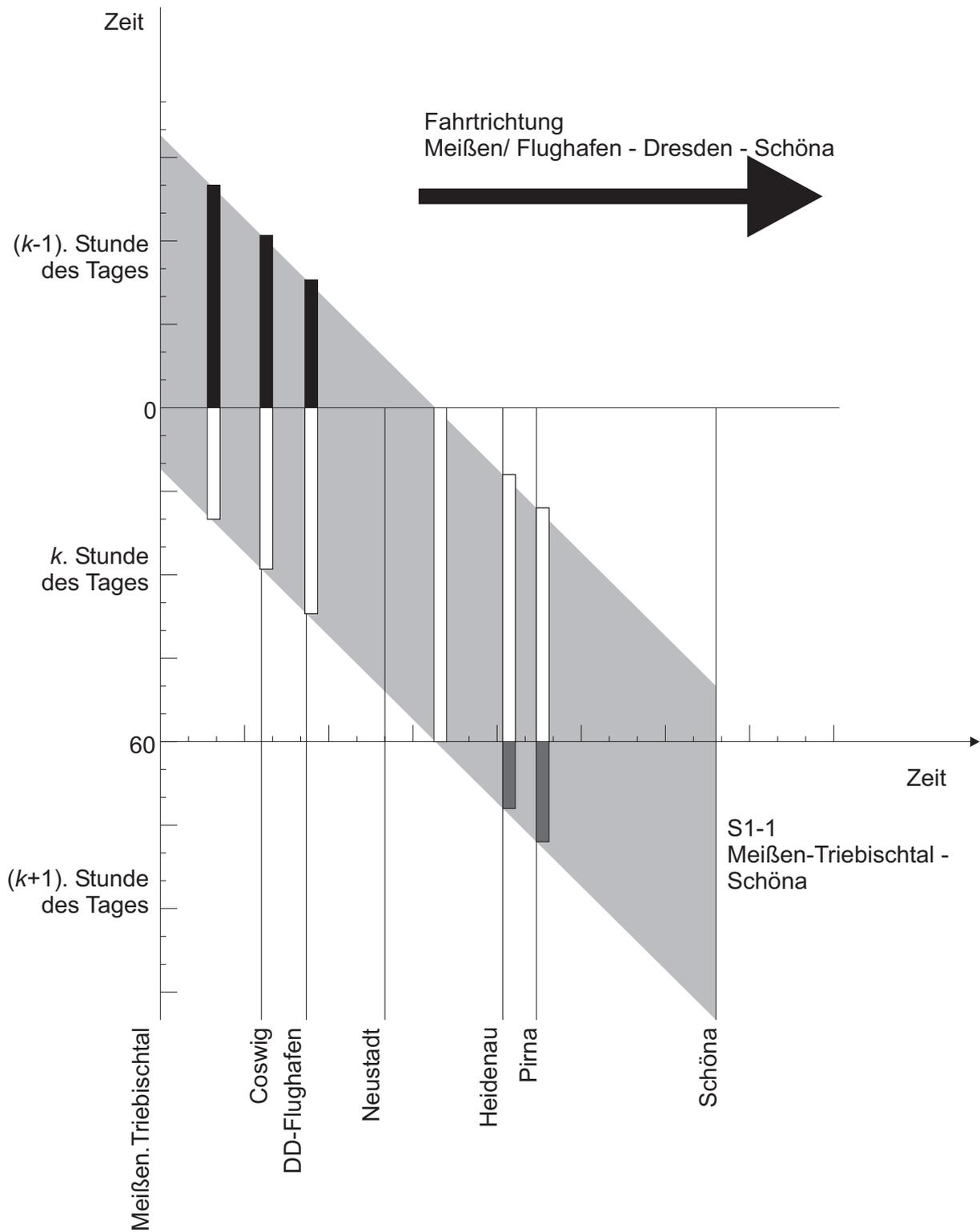


Abbildung 5.7: Reisezeitproblematik (II): Mit einer Fahrt wird Verkehrsaufkommen verschiedener Stunden bewältigt

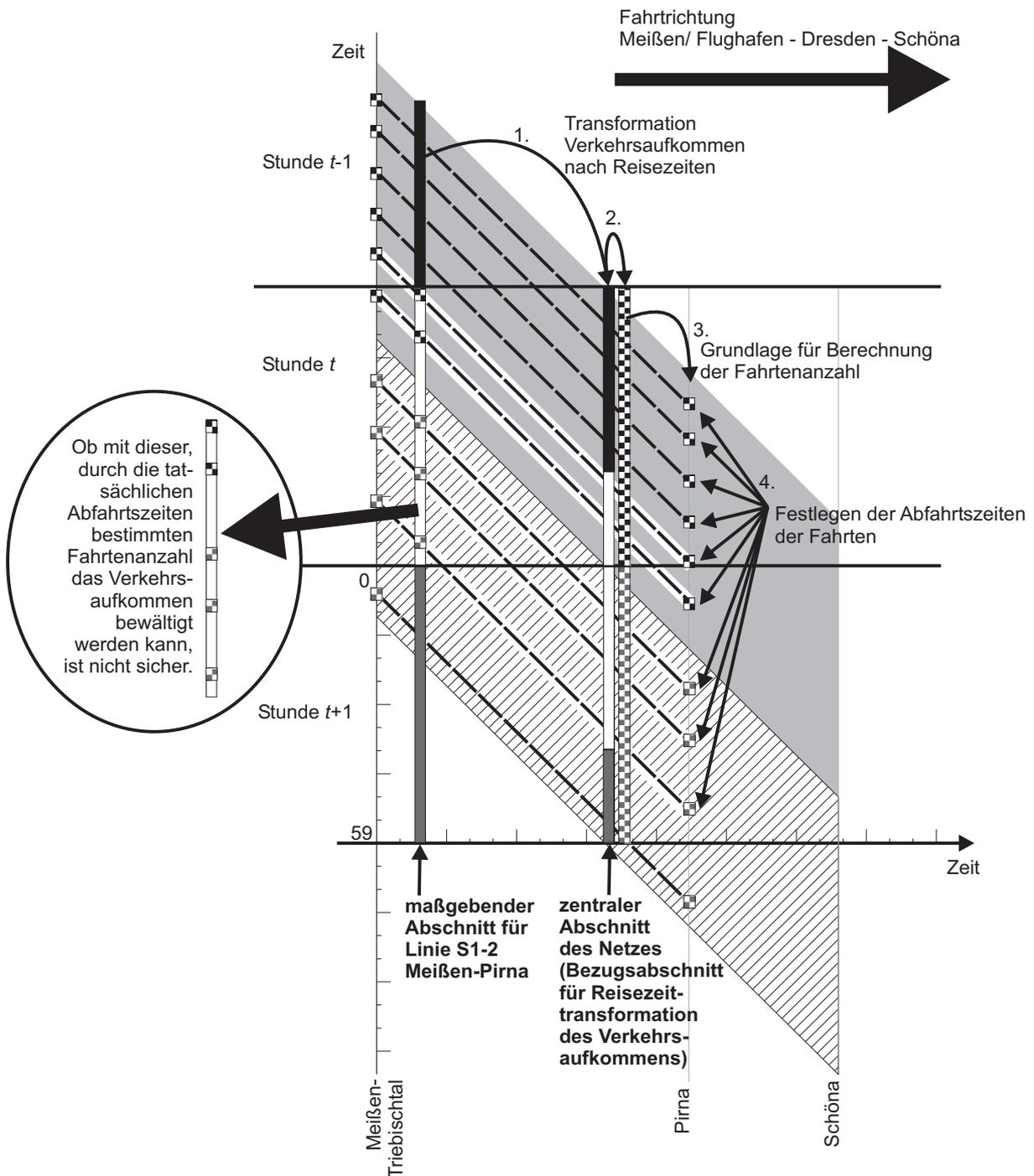


Abbildung 5.8: Verfahren zur Ermittlung der Fahrtenanzahl unter Beachtung der Reisezeit: Problematik der Rücktransformation

Linienfahrt den zentralen Abschnitt in der Stunde  $h$  erreichen, wenn sie bis zu diesem verlängert würde. Die Fahrt selbst muss dann nicht notwendigerweise während der Stunde  $h$  stattfinden.

Das Vorgehen ist noch einmal in Abb. 5.8 illustriert. Es ist dort zu erkennen, dass mit der Transformation des Verkehrsaufkommens und der darauf basierenden Linienumlegung nicht garantiert werden kann, dass ein ursprünglich für eine Stunde berechnetes Verkehrsaufkommen

mit der durch die Fahrplanung bestimmten Zahl Fahrten, die tatsächlich in jener Stunde den Abschnitt bedienen, realisiert werden kann.

Der Fehler, der durch diese Transformation eingebracht wird, ist, wie sich leicht zeigen lässt, unmittelbar von der Zahl zu disponierender Fahrten abhängig und bei einer geringen Zahl Fahrten am größten. Er betrifft dabei hauptsächlich die weit vom Zentrum entfernten Außenäste des Netzes (vgl. Abb. 1.5 auf Seite 6). Dort liegen in mittleren Ballungsräumen i.A. die geringsten Quell-/ Zielverkehrsströme vor, so dass der durch die Reisezeittransformation entstehende Fehler als vernachlässigbar angesehen werden soll. Diese Aussage gilt insbesondere, da die stundenfein vorliegenden Verkehrsstrommatrizen ebenfalls nur eine mit Fehlern behaftete Prognose darstellen.

### 5.4 Ermitteln von Fahrtenhäufigkeit und Kapazität der einzelnen Linien anhand des Verkehrsaufkommens

Bei der Ermittlung der Fahrtenhäufigkeit der einzelnen Linien in räumlich stark gegliederten S-Bahn-Netzen (vgl. Abb. 5.5) spielt das Einstiegsverhalten der Fahrgäste eine nicht zu vernachlässigende Rolle, d.h. welcher der am Haltepunkt  $i$  zusteigende Fahrgast welche der dort verkehrenden Linien nutzt, um zu seinem Fahrtziel  $j$  zu gelangen.

Dabei können im wesentlichen zwei unterschiedliche Möglichkeiten des Einstiegsverhaltens der Fahrgäste angenommen werden, wie sie in Abb. 5.9 dargestellt sind. Bei beiden Varianten ist die Ankunftszeit der Fahrgäste an ihrem eigentlichen Fahrtziel gleich.

- Fahrgastverhalten A: Jeder Fahrgast nimmt immer den ersten Zug, der ihn *näher* zu seinem eigentlichen Fahrtziel befördert.
- Fahrgastverhalten B: Jeder Fahrgast nimmt den ersten Zug, der ihn *direkt* zu seinem eigentlichen Fahrtziel befördert.

In der Praxis des Stadtschnellbahnbetriebs in mittleren Ballungsräumen dürfte vor allem Fahrgastverhalten B anzutreffen sein, bei dem die Fahrgäste nur einen Zug benutzen müssen und beispielsweise einen einmal gefundenen Sitzplatz bis zu ihrem Fahrtziel nutzen können. Moderne Möglichkeiten dynamischer Fahrgastinformation, wie sie z.B. in [92, 121] untersucht und beschrieben werden, tragen weiter dazu bei, dieses Verhalten zu fördern: Wenn der Fahrgast mit hoher Sicherheit weiß, zu welcher Zeit eine direkte Verbindung besteht, wird er die bis dahin verbleibende Zeit in der Regel abwarten, da er mit dieser Information in dem vorliegenden Liniennetz gleichzeitig eine Aussage treffen kann, zu welcher Zeit er frühestens sein Fahrtziel erreicht.

In anderen, vermaschten Netzen, wie sie in großen Ballungsräumen im U-Bahn-Bereich und in kleinen und mittleren Ballungsräumen im Straßenbahn- und Busverkehr anzutreffen sind, ist eine solche Schlussfolgerung auf die kürzeste Reisezeit zum Ziel anhand der frühesten Direktverbindung nicht immer korrekt. Hier wird Fahrgastverhalten A häufiger anzutreffen sein.

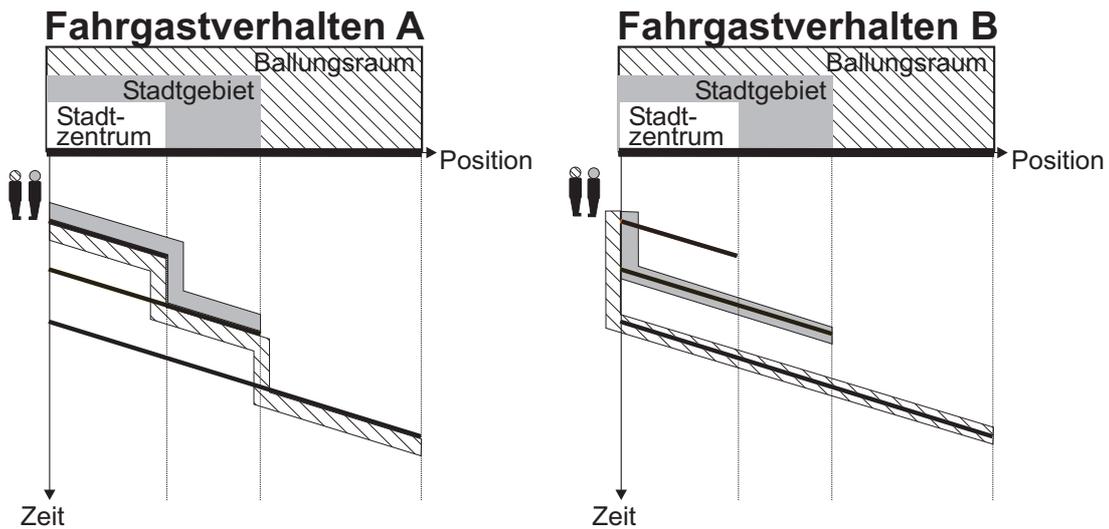


Abbildung 5.9: Unterschiede im Fahrgastverhalten bei der Einführung von Verstärkerfahrten im Zentrum des Ballungsraums

In den hier untersuchten Netzen mit zentralen Abschnitten ist wohl nur dann mit einem solchen Verhalten zu rechnen, wenn die Zwischenendhalte am Rande des Zentrums bzw. des Ballungsraums Orte mit hoher Attraktivität für die Fahrgäste darstellen, z.B. durch vorhandene Einkaufsmöglichkeiten oder einer nur dort vorhandenen dynamischen Fahrgastinformation.

Ausgehend vom Fahrgastverhalten B in den untersuchten Netzen kann eine Dimensionierung des Verkehrsangebots anhand der Verkehrsströme in den maßgebenden Streckenabschnitten, wie sie bei einzelnen, kurzen Stadtschnellbahnlinien durchgeführt wird [149], nicht mehr erfolgen. Dies würde zu einer planmäßigen Überfüllung der Langläufer führen, wie in Abb. 5.10 dargestellt ist. Hier wird eine S-Bahn-Linie in einer Fahrtrichtung betrachtet, die Halte A und E befinden sich in der Region, B, C und D befinden sich unmittelbar im Stadtzentrum, an den Bahnhöfen B und D besteht prinzipiell die Möglichkeit, eine Linie enden zu lassen.

Die im Teil a der Abbildung über den Streckenabschnitten dargestellten Personen repräsentieren Fahrgäste, die innerhalb einer Stunde an einer der Stationen des entsprechenden Abschnitts in die S-Bahn steigen wollen. Je nach Fahrtziel, sind die Personen unterschiedlich eingefärbt. Repräsentiert eine Person 20 Fahrgäste, so steigen z.B. im Abschnitt A-B 120 Fahrgäste ein, die zwischen den Stationen B und C aussteigen, weitere 80 Fahrgäste haben ihr Fahrtziel zwischen den Stationen C und D und schließlich durchqueren 40 Fahrgäste den Ballungsraum vollständig um ihre Reise zwischen den Stationen D und E zu beenden. Bildet man die Verkehrsströme, die durch die jeweiligen Bahnhöfe befördert werden, erhält man je 240 Fahrgäste für die Bahnhöfe B und D sowie 520 Fahrgäste am Bahnhof C (siehe Teil b von Abb. 5.10).

Aus einer Linienumlegung anhand der Verkehrsströme würden sich bei einem Fahrzeug mit einer geplanten Auslastung von 140 Plätzen jeweils mindestens zwei Fahrten ergeben, die die Bahnhöfe B und D passieren sowie vier Fahrten, die durch C fahren. Es wäre demnach praktisch sinnvoll, zwei Fahrten entlang der gesamten Strecke von A über B, C und D nach E verkehren

zu lassen, der verbleibende Verkehrsstrom könnte mit zwei zusätzlichen Fahrten von B über C nach D bewältigt werden.

Dass dies praktisch nicht funktioniert, zeigt erst die Analyse der Besetzung der Züge anhand der einzelnen Verkehrsaufkommen, wie sie in Teil c dargestellt ist. Die wichtigste Rolle spielen dabei die Fahrgäste, die auf dem von beiden Linien benutzten Abschnitt B-C zusteigen wollen. Von diesen Fahrgästen nutzen bei Einstiegsverhalten B ausschließlich diejenigen die Kurzläufer, deren Fahrtziel zwischen C und D liegt, nämlich 320 Fahrgäste. Legt man eine konstante Ankunftsrate der Fahrgäste an den Bahnsteigen und eine konstante Zugfolgezeit der Fahrten zwischen B und D zugrunde, so würden jeweils 80 Fahrgäste aus dieser Gruppe in jedem der Züge zwischen B und D befördert werden müssen. Da alle Fahrgäste, deren Fahrtziel sich zwischen D und E befindet, auf die Benutzung der Langläufer angewiesen sind, haben diese bei Erreichen des Bahnhofs B bereits einen Besetzungsgrad, der es unmöglich macht, alle Fahrgäste des Abschnitts B-C aufzunehmen, jeweils 40 Fahrgäste könnten nicht befördert werden, soll der Zug nicht planmäßig überlastet werden.

Um dies zu verhindern, existieren prinzipiell drei Lösungen:

1. Zur Ermittlung der Besetzung im gegebenen Beispiel wurde von einer konstanten Eintreffensrate der Fahrgäste und deren Gleichverteilung auf die einzelnen Fahrten ausgegangen, wie sie bei einer gleichmäßigen Zugfolge auf dem zentralen Abschnitt B-C-D entstehen würde. Eine stark ungleichmäßige Anordnung der Abfahrtszeiten könnte das Problem reduzieren und in Einzelfällen auch verhindern, wenn weiterhin von einer konstanten Ankunftsrate der Fahrgäste ausgegangen wird<sup>1</sup>. Der Kurzläufer könnte dadurch zusätzliche Fahrgäste mit dem Fahrtziel Abschnitt C-D mitnehmen, so dass der Langläufer entlastet würde.

Stark ungleichmäßige Taktzeiten stellen allerdings für die Fahrgäste im Zentrumsbereich kein attraktives Angebot dar (höhere durchschnittliche Wartezeiten, vgl. Kapitel 4). Deswegen sollen zwei weitere Alternativen untersucht werden, bei denen weiterhin gleichmäßige Takte im zentralen Abschnitt angeboten werden können.

2. die Veränderung der Fahrtenanzahl bei Beibehaltung des Fahrzeugkonzepts: Im speziellen Beispiel wären bei drei Fahrten auf der Linie A-E die Fahrzeuge nur knapp oberhalb der geplanten Kapazität besetzt, hier ist abzuwägen, ob diese planmäßige Überbesetzung tolerierbar ist.

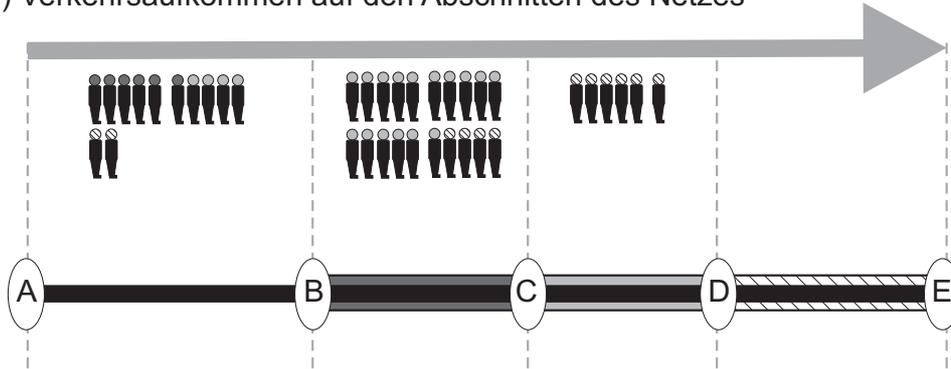
sowie

3. die Veränderung von Zugkapazität und Fahrtenhäufigkeit auf den einzelnen Linien: Eine Erhöhung der Zugkapazität der Langläuferlinie würde das Problem lösen. Praktisch könnte dies bei einem Fahrzeugkonzept mit Lokomotiven und Wagen durch Anhängen zusätzlicher Wagen geschehen, was jedoch einen hohen Rangieraufwand erfordert und

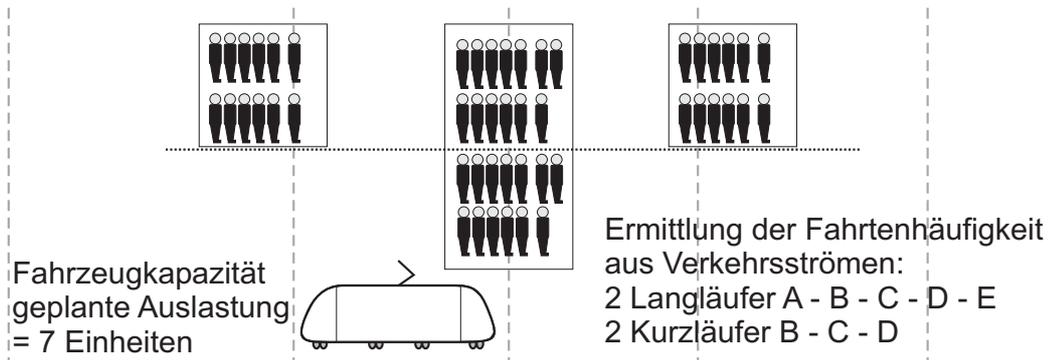
---

<sup>1</sup>Im Beispiel: Abfahrt des Kurzläufers B-D zu den Minuten 23 und 53 bei Abfahrt der Langläufer zu den Minuten 30 und 60.

a) Verkehrsaufkommen auf den Abschnitten des Netzes



b) Verkehrsströme auf den maßgebenden Abschnitten



c) Ermittlung der zu erwartenden Auslastung der einzelnen Fahrten

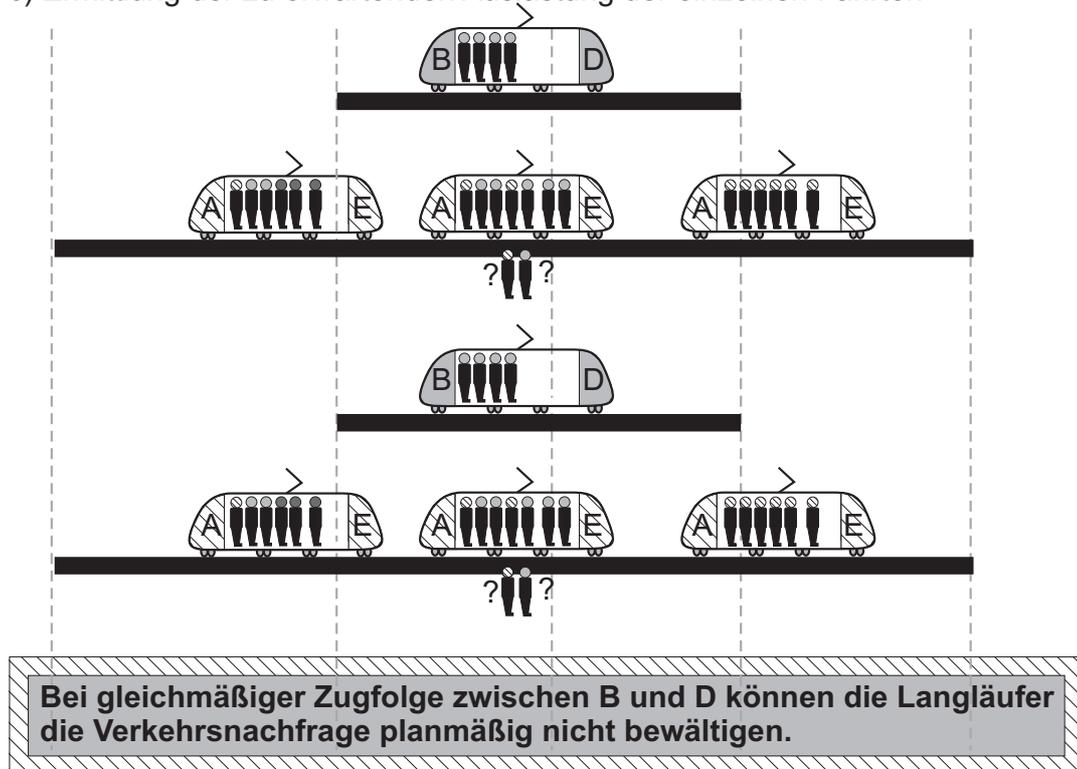


Abbildung 5.10: Dimensionierung des Verkehrsangebots nach der Verkehrsstromstärke auf den maßgebenden Abschnitten: Die Langläufer sind überlastet

weiterhin den Nachteil ungleicher Fahrdynamik und damit unterschiedlicher Fahrzeiten der einzelnen, auf dem zentralen Abschnitt verkehrenden Züge mit sich bringt<sup>2</sup>. Praktische Anwendungen einer Flexibilisierung der Fahrzeuggröße [25, 49] basieren meist auf einem Triebwagenkonzept, d.h. der Zusammenkopplung gleichartiger Triebwagen zu einem Zug, wodurch alle Züge unabhängig von der Anzahl als Zug verkehrender Triebwagen immer die gleiche Fahrdynamik aufweisen. Bei einem solchen Fahrzeugkonzept kann mit den heute bereits verfügbaren automatischen Kupplungen die Kapazität der Züge ohne Eingreifen von Rangierpersonal kurzfristig modifiziert werden<sup>3</sup>. Für das hier aufgeführte Beispiel bedeutete das Zurückgreifen auf ein Triebwagenkonzept allerdings eine notwendige Verdoppelung der Kapazität der Langläuferlinie.

Punkt 1 stellt hier nicht nur aus Gründen der Attraktivität des Angebots die schlechteste Alternative dar. Wie sich leicht zeigen lässt, ist diese Art der Optimierung am stärksten von der Gültigkeit der Annahme einer konstanten Ankunftsrate der Fahrgäste abhängig. Kann davon nicht ausgegangen werden, ist eine Überfüllung einzelner Fahrten und damit eine mögliche Instabilität des Fahrplans zu befürchten.

Deshalb soll für die Ermittlung der Fahrtenhäufigkeit auf den einzelnen Linien das folgende, auf den Punkten 2 und 3 basierende Optimierungsproblem formuliert werden:

**Wie viele Fahrten von jeder Linie mit jeweils wieviel Triebwagen sind pro Stunde notwendig, damit das gegebene Verkehrsaufkommen mit minimaler Betriebsleistung (Platzkilometer pro Stunde) bewältigt werden kann?**

Die Lösung dieses Problems soll im verbleibenden Teil dieses Abschnitts beschrieben werden.

### 5.4.1 Ermittlung der Besetzung der Zugfahrten und deren notwendiger Kapazität

Eine gültige Lösung für das Problem der Linienhäufigkeits- und Kapazitätsermittlung existiert nur, wenn keiner der Züge auf keinem Abschnitt  $A \in [1; A_{max}]$  eine Besetzung aufweist, die oberhalb eines vorgegebenen Auslastungsfaktors  $\gamma$  liegt.

Um dies zu ermitteln, soll der Fahrtweg  $FW$  jeder Linie  $l \in [1; Li_{max}]$  richtungsweise in Form der befahrenen Abschnitte beschrieben werden:

$$fw_{l,i,j} = \begin{cases} 1 & \text{falls mit dieser Linie Verkehrsaufkommen der Relation Abschnitt } i \text{ nach } j \\ & \text{befördert werden kann.} \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} \quad (5.5)$$

für  $\forall i \in [1; A_{max}], j \in [1; A_{max}]$ .

<sup>2</sup>Vortrag von Dr. Walter Dirmeier, Sprecher S-Bahn Frankfurt, am 12.2.2004 an der TU Dresden im Rahmen der Lehrveranstaltung „Innovative Verfahren der Betriebssteuerung im Bahnverkehr und ÖPNV“

<sup>3</sup>Für die Verlängerung oder Verkürzung eines solchen Zuges wird dabei laut Aussagen von Triebfahrzeugführern des Verkehrsbetriebs Sachsen der DB Regio AG in der Regel nicht mehr als eine Minute benötigt.

Wenn man die Bedienhäufigkeit für die einzelnen Abschnitte mit

$$bh_{ij} = \sum_{l=1}^{Li_{max}} fw_{l,i,j} f_H(l, h) \quad (5.6)$$

berechnet, ergibt sich der Anteil des reisezeittransformierten Verkehrsaufkommens pro Relation, der durchschnittlich mit jeder Fahrt befördert werden kann, aus

$$VA_{F,i,j}(h)^{RZ} = \frac{VA_{i,j}(h)^{RZ}}{\max(bh_{ij}; 1)}. \quad (5.7)$$

Aus Gründen der übersichtlicheren Darstellung soll im folgenden davon ausgegangen werden, dass alle von Linie  $l$  bedienten Abschnitte als aufsteigende Folge ganzer Zahlen mit der Differenz 1 angegeben werden können. Startbahnhof der Linie sei  $bhf_a$ , Endbahnhof  $bhf_e$ .

Dann lässt sich die maximale Zahl der besetzten Plätze einer Linie  $BP(l)$  mit

$$BP(h, l) = \max_k \sum_{i=k+1}^{bhf_e} \sum_{j=bhf_a}^k VA_{F,i,j}(h)^{RZ} \quad (5.8)$$

bestimmen.

Durch einfache Division der maximalen Besetzung der Fahrzeuge dieser Linie in dieser Stunde  $BP(h, l)$  durch die gewünschte Zahl besetzter Plätze pro Triebwagen ( $\gamma n_P$ ) und Aufrunden dieses Wertes auf die nächsthöhere ganze Zahl ergibt sich die in dieser Stunde auf dieser Linie einzusetzende Zahl Triebwagen pro Zugfahrt  $n_{Tw}(h, l)$ :

$$n_{Tw}(h, l) = \left\lceil \frac{BP(h, l)}{\gamma n_P} \right\rceil \quad (5.9)$$

Für die andere Fahrtrichtung sowie die Betrachtung von sich verzweigenden Linien ist sinn gemäß zu verfahren.

### 5.4.2 Optimierungsverfahren

Die gleichzeitige Optimierung von Fahrtenhäufigkeit und -kapazität stellt ein ganzzahliges Optimierungsproblem dar.

Wie oben gezeigt, gibt es dabei für jede Kombination von Fahrten auf Linien eine dazugehörige Zahl Triebwagen pro Fahrt und Linie, mit der die Betriebsleistung minimal wird. Der Suchraum für die Ermittlung der optimalen Zahl Fahrten pro Linie und der damit verbundenen Kapazität entspricht damit der Zahl unterschiedlicher Kombinationen von Fahrten auf der gegebenen Zahl von Linien. Die Größe des Suchraums  $N$  lässt sich dabei, wie man leicht zeigen kann, mit Hilfe der Gleichung

$$N = \binom{n + Li_{max}}{Li_{max}} \quad (5.10)$$

bestimmen, wobei  $n$  in diesem Falle die Zahl zu disponierender Fahrten darstellt und  $L_{i_{max}}$  die Zahl der Linien, auf denen die Fahrten stattfinden können. Dabei wurde vorausgesetzt, dass die maximale Zahl Fahrten pro Linie nur durch die Streckenkapazität begrenzt ist. Für die unterschiedlichen Flexibilisierungsszenarien, die für das Dresdner S-Bahn-Netz durch SCHOLZ [149] vorgeschlagen wurden, ergeben sich die in Tabelle 5.2 angegebenen Werte.

Szenario	M2-PZB	M3-ETCS	AGT
minimale Zugfolgezeit	5 min	3,75 min	2 min
maximale Zahl Fahrten pro Stunde	12	16	30
davon Mindestangebot	4	4	6
zu disponierende Fahrten $n$	8	12	24
verfügbare Linien $L_{i_{max}}$	4	5	5
Zahl möglicher Lösungen pro Stunde	495	6188	118755

Tabelle 5.2: Größe des Suchraums für die Ermittlung der Fahrtenhäufigkeiten der einzelnen Linien für die vorgeschlagenen Szenarien eines flexiblen Betriebs auf der S-Bahn-Dresden (vgl. Abb. 5.1 und Tabelle 5.1)

Es ist zu erkennen, dass aufgrund der Größe des Suchraums besonders bei den stark flexibilisierten Fällen eine vollständige Enumeration zum Finden der optimalen Kombination von Anzahl und Kapazität der Fahrten auf den einzelnen Linien nicht geeignet ist. Deswegen muss nach anderen Möglichkeiten gesucht werden, dieses ganzzahlige Problem zu lösen.

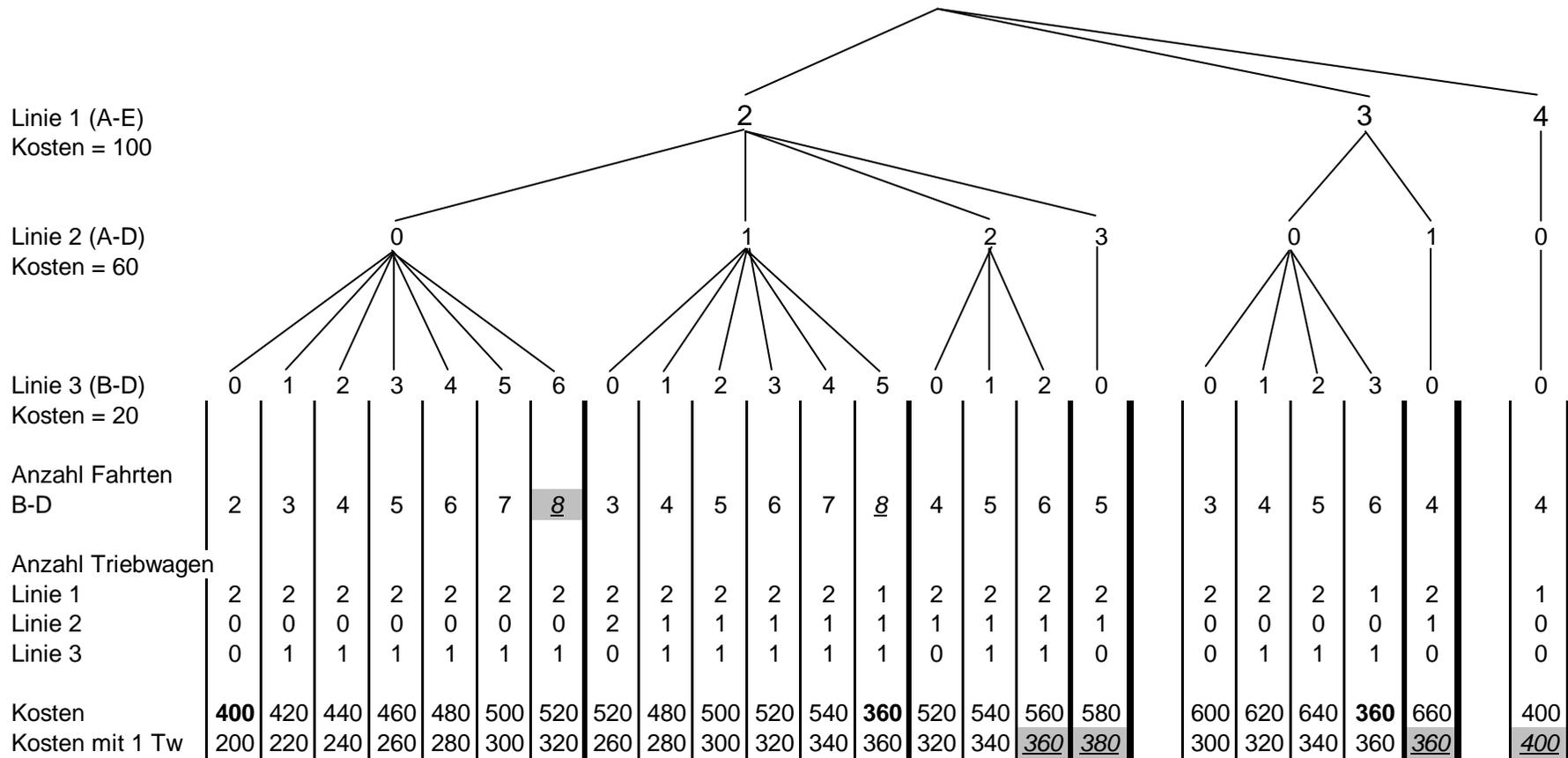
Ein effizienterer Lösungsalgorithmus für solche Probleme ist das sogenannte Branch-and-Bound-Verfahren [2, 190].

Branch-and-Bound basiert auf der Suche in einer Baumstruktur. Die Fahrtenhäufigkeit auf jeder Linie stellt den Vektor der Entscheidungsvariablen und damit die Ebenen des Suchbaums für dieses Problem dar.

Anhand des in Abb. 5.11 dargestellten einfachen Beispiels, dem das in Abb. 5.10 dargestellte Verkehrsaufkommen zugrunde liegt, wird im folgenden die Anwendung dieses Optimierungsverfahrens beschrieben.

Dabei sollen drei Linien angenommen werden: eine Durchmesserlinie A-E mit den Kosten 100 (Streckenlänge), eine verkürzte Durchmesserlinie A-D (Kosten 60) sowie eine Verstärkerlinie im Zentrumsbereich (B-D, Kosten 20). Als Mindestangebot sollen zwei Fahrten auf der Durchmesserlinie verkehren, dieses Mindestangebot stellt die erste vollständige Lösung im Suchbaum dar (ganz links). Um mit dieser Fahrtenhäufigkeit die Fahrgäste auf allen Relationen zufriedenstellend zu befördern, müssen alle Fahrten auf Linie 1 in Doppeltraktion verkehren, damit ergeben sich die Kosten und die erste Schranke für das Verfahren aus 400.

Erhöht man zunächst die Zahl Fahrten auf der Zentrumslinie (Linie 3), so sinkt zwar die Besetzung der Langläufer leicht, aber selbst bei 6 Fahrten auf der kurzen Linie müssen die Langläufer in Doppeltraktion verkehren. Da für dieses Beispiel eine maximale Streckenkapazität von 8 Fahrten pro Stunde angenommen wird, wird an dieser Stelle die Suche auf der untersten Ebene abgebrochen und die Zahl Fahrten auf der darüber befindlichen Ebene 2 (Linie A-D) um 1 erhöht. Während ohne den Einsatz von Kurzfahrten beide Linien in Doppeltraktion verkehren, ist es



**Fett dargestellt: Die aktuellen Minima (Optimierungsdurchlauf von links nach rechts).**

*Kursiv und unterstrichen: Grund des Abbruchs dieser Vertiefungsebene, wenn noch kein Optimum erreicht*

Abbildung 5.11: Branch-and-Bound Verfahren für das Beispiel aus Abbildung 5.10 auf Seite 64

schon bei Einsatz einer Kurzfahrt möglich, die Linie 2 (A-D) in Einfachtraktion verkehren zu lassen. Erst bei Einsatz von 5 Kurzfahrten B-D ist es möglich, auch auf die Doppeltraktion bei der Durchmesserlinie 1 zu verzichten. Die entstehende Lösung (2 Fahrten A-E, 1 Fahrt A-D, 5 Fahrten B-D) weist Kosten von 360 auf und entspricht damit einer neuen unteren Schranke. Eine weitere Erhöhung der Zahl Fahrten auf der Kurzstrecke würde zusätzliche Kosten erzeugen und wäre damit nicht sinnvoll, zusätzlich würde die Streckenkapazität überschritten.

Die nächste praktikable Lösung, die im Suchbaum untersucht werden muss, bestände aus jeweils 2 Fahrten auf Linie 1 und 2. Bei Einsatz von 0 oder 1 Kurzfahrt sind die tatsächlichen Kosten höher als das bisherige Minimum. Bei 2 Kurzfahrten B-D ergäben sich, wenn alle Linien in Einfachtraktion verkehrten, schon Kosten von 360, d.h. von der Größe der aktuellen unteren Schranke. Tatsächlich würden immernoch Langläufer in Doppeltraktion benötigt, d.h. die wirklichen Kosten sind mit 560 noch höher als die untere Schranke. Ein weiteres Erhöhen der Fahrtenanzahl auf der Kurzläuferlinie könnte zwar dazu führen, dass auf allen Linien nur in Einfachtraktion gefahren werden müsste, die Kosten dafür würden aber definitiv höher liegen als die der unteren Schranke. Deswegen wird an dieser Stelle erneut die unterste Ebene abgebrochen und die Zahl Fahrten auf Linie 2 um 1 auf 3 erhöht. Hier lägen schon ohne Kurzfahrten die Kosten bei allen Fahrten in Einfachtraktion höher als die der unteren Schranke, damit ist es nun auch nicht mehr sinnvoll, die Fahrtenanzahl auf Linie 2 weiter zu erhöhen. Die Suche kann fortgesetzt werden bei einer Zahl von 3 Fahrten auf der Langläuferlinie A-E.

Hier ergibt sich eine dem Optimum gleichwertige Lösung bei einer Fahrtenanzahl von 3 Langläufern A-E und 3 Kurzfahrten B-D, die alle nur in Einfachtraktion verkehren müssten<sup>4</sup>.

Die letzte von diesem Verfahren untersuchte Variante besteht aus 4 Fahrten auf der Langläuferlinie. Bei dieser Variante kann das gesamte Verkehrsaufkommen durch Fahrten in Einfachtraktion bewältigt werden, allerdings zu höheren als den bisher ermittelten minimalen Kosten. Eine weitere Erhöhung der Zahl Fahrten auf einer beliebigen Linie kann daher nie zu geringeren Kosten führen.

Verallgemeinert lässt sich also eine untere Schranke für das Branch-and-Bound Verfahren immer dann als nicht mehr zu unterschreiten definieren, wenn trotz Einfachtraktion aller Linien die Kosten höher sind oder wären, als die der unteren Schranke, denn nur dann gilt, dass alle weiteren Lösungen auf dieser Ebene mit Sicherheit höhere Kosten als das bisherige Optimum aufweisen. Voraussetzung für die Gültigkeit dieser Schranke ist dabei die Anordnung der Linien in absteigender Höhe der dazugehörigen Kosten (Betriebsleistung).

In Abb. 5.12 sind drei untersuchte Fälle und die dazugehörige maximale Besetzung der Züge am Halt C grafisch veranschaulicht: Der erste und letzte untersuchte Fall, bei denen ausschließlich Fahrten auf der Langläuferlinie verkehren sowie die zweite gefundene optimale Lösung (jeweils drei Fahrten auf Kurz- und Langläuferlinie). Diese drei unterschiedlichen Verkehrsangebote sind durch deutliche Unterschiede in ihrer Attraktivität gekennzeichnet. Während in der ersten untersuchten Variante bestenfalls eine minimale Zugfolgezeit von 30 min machbar wäre, wären dies bei der optimalen Variante 10 min.

---

<sup>4</sup>Welche der beiden Lösungen als Optimum betrachtet werden soll, ist bei dieser Kostenfunktion nicht zu klären. Hier müssten andere Kriterien verwendet werden (z.B. Zahl Fahrten B-D o.a.).

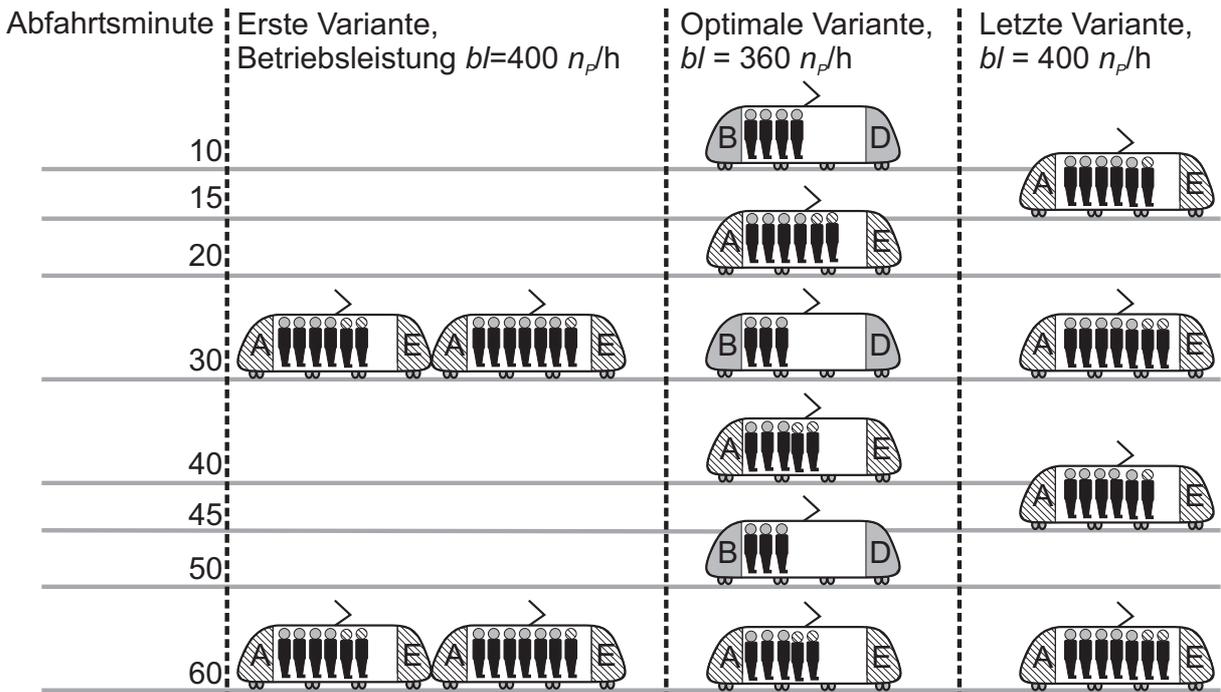


Abbildung 5.12: Durch Erhöhung der Fahrtenzahl oder der Kapazität der Langläuferlinie kann die Überfüllung von einzelnen Zügen verhindert werden. Die unterschiedliche Attraktivität des Angebots, die naturgemäß Auswirkungen auf die Nachfrage hat [149], ist hier nicht berücksichtigt.

Die Ermittlung der optimalen Zahl Fahrten und Triebwagen pro Linie und Stunde kann richtungsweise getrennt oder für beide Richtungen gleichzeitig erfolgen. Beide Ansätze sind theoretisch denkbar, praktisch weisen sie allerdings folgende Probleme auf:

1. Bei der richtungsweisen Ermittlung der Fahrtenhäufigkeit ist aufgrund der in Ballungsräumen vorherrschenden Hauptverkehrsrichtungen ein Ungleichgewicht von Zügen an den Linienenden zu erwarten. Praktisch ist morgens das Verkehrsaufkommen in Richtung des Stadtzentrums und nachmittags in stadtauswärtiger Richtung deutlich höher als in den Gegenrichtungen. Die Realisierung eines solchen Betriebsprogramms ist nur bei Vorhaltung einer sehr großen Zahl an Fahrzeugen an den beiden Linienenden möglich. Um dieses zu verhindern, können sogenannte Leerfahrten eingeführt werden, die zwar verkehrlich nicht notwendig sind, mit denen aber die Zahl Fahrzeuge reduziert werden kann. Die notwendige Zahl vorzusehender Leerfahrten lässt sich allerdings nur für einen gegebenen Fahrplan ermitteln, dann ergibt sich allerdings das Problem, dass diese Fahrten in den bereits optimierten Fahrplan nachträglich eingefügt werden müssten.
2. Es werden in jeder Richtung so viele Fahrten durchgeführt, wie maximal auf einer der beiden Richtungen verkehrlich notwendig sind. Diese praktisch ausschließlich zur Anwendung kommende Methode hat den Vorteil eines relativ ausgeglichenen Zughaushalts an beiden Enden der Linie [141]. Nachteilig ist eine höhere Zahl an Fahrten, die verkehrlich nicht notwendig und deren betriebliche Notwendigkeit nicht direkt nachweisbar ist.

Da in der einschlägigen Literatur keine Verfahren zur Abschätzung der Zahl notwendiger Leerfahrten in einem solchen flexiblen Betrieb beschrieben sind, soll im folgenden ausschließlich die gleiche Zahl Fahrten pro Richtung Verwendung finden.

In Abb. 5.13 ist das Ergebnis der Optimierung für die in Tabelle 5.2 aufgeführten Szenarien mit mindestens einer flexibel betriebenen Linie grafisch dargestellt. Es ist auffällig, dass die maximale Streckenkapazität durch das Optimierungsverfahren nie vollständig beansprucht wird. Die Langläufer der Linie S1-1 fahren bis auf wenige Ausnahmen immer mit der als minimaler Fahrtenanzahl definierten Häufigkeit (2 Fahrten bei M2 und M3, 4 Fahrten bei AGT). In den Morgen- und Nachmittagsspitzen verkehren sämtliche Fahrten der S1-1 in Doppeltraktion. Die Einführung der Linie S1-3 in den Szenarien M3 und AGT sorgt dafür, dass dort die Linie S1-2 ausschließlich in den absoluten Spitzenstunden genutzt wird.

Die Darstellung der im AGT-Szenario tatsächlich im zentralen Abschnitt angebotenen Zugkapazität in Form von eingesetzten Triebwagen pro Linie und Stunde in Abb. 5.14 macht den Verlauf der Tagesganglinie des Verkehrsaufkommens noch deutlicher: Die kurze und sehr hohe Morgenspitze ist ebenso gut zu erkennen wie die deutlich länger andauernde, aber tendenziell etwas flachere Nachmittagsspitze.

Die Analyse der tatsächlich durch Branch-and-Bound gerechneten Fälle zeigt den Vorteil dieses Verfahrens gegenüber der vollständigen Enumeration: Nur in den Stunden des höchsten Verkehrsaufkommens (Stunde 8 und 17) wurden mehr als 80% der möglichen Lösungen berechnet. Über den gesamten Tag (von 4 bis 24 Uhr) werden nur ca. 20% des gesamten Suchraums durchkämmt. Die zur Anzahl berechneter Fälle nahezu proportionale Rechenzeit liegt für das M2- und M3-Szenario im Bereich weniger Minuten (auf einem PIII-2,4 GHz-Rechner), für das AGT-Szenario werden ca. 4 Stunden benötigt.

## 5.5 Herausfiltern und Festlegen eines invarianten Mindestangebots

Bei der Ermittlung der Fahrtenhäufigkeiten auf den einzelnen Linien wird deutlich, dass auf den Außenästen der untersuchten Netzstruktur meistens nur ein geringes Mindestangebot gefahren wird, um den Fahrgästen aus den weniger dicht besiedelten Gebieten die Möglichkeit zu geben, das Zentrum des Ballungsraums zu erreichen. Praktisch liegt die Zahl Fahrten dort zwischen 2 und 4 Fahrten pro Stunde, womit dieses Angebot bei gleichmäßigen Zugfolgezeiten deutlich weniger attraktiv ist als beim flexiblen Betrieb üblich (vgl. Abb. 1.4).

Im Gegensatz zu kurzen Zugfolgezeiten, bei denen auch bei zufälligem Eintreffen am Bahnsteig kurze Wartezeiten für die Fahrgäste entstehen, ist es bei einem solchen geringen Angebot wichtig, regelmäßige Zugfolgezeiten und leicht zu merkende Abfahrtsminuten anzubieten, um den Nutzern der S-Bahn die Möglichkeit zu geben, sich auf das Angebot einzustellen und durch einfach zu erlangende Fahrplankenntnis die Wartezeiten vor Antritt der Fahrt minimal zu halten [141].

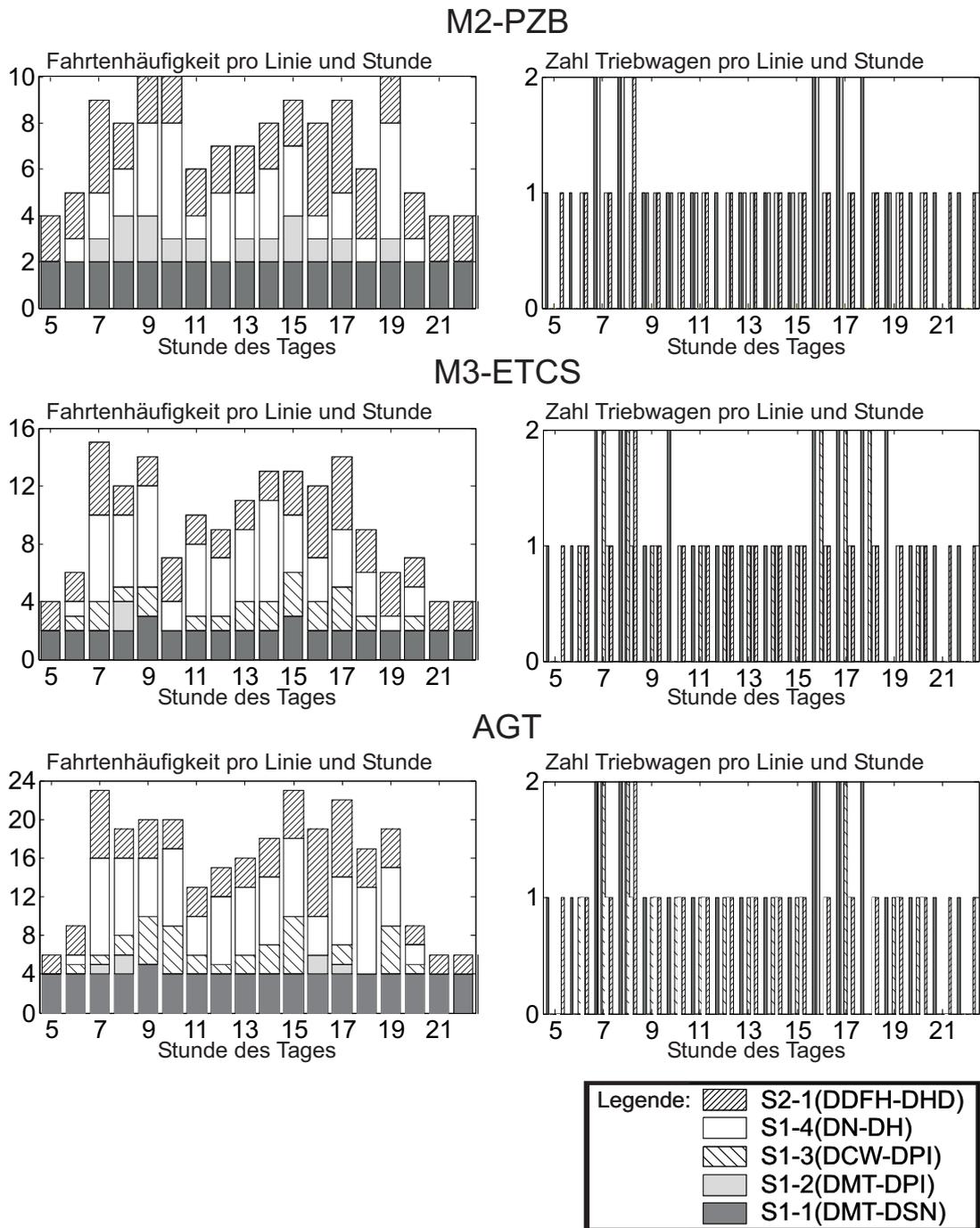


Abbildung 5.13: Fahrtenhäufigkeit und Zahl Triebwagen pro Linie und Stunde für die vorgestellten Szenarien

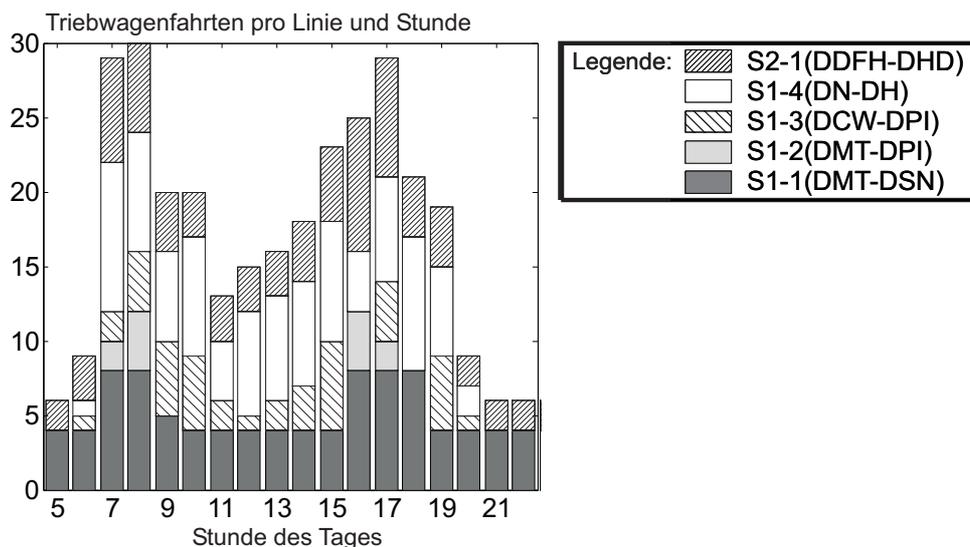


Abbildung 5.14: Zahl der pro Stunde verkehrenden Triebwagen im AGT-Szenario

Deswegen sollte ein solches Mindestangebot nicht in eine Optimierung einbezogen werden, sondern als invariantes Angebot zu festen Abfahrtszeiten verkehren.

Diese festen Abfahrtszeiten sollten von Experten festgelegt werden, auch unter besonderer Beachtung von Anschlüssen mit den im Außenraum des Ballungsgebiets verkehrenden weiteren Verkehrsmitteln.

Aus der im vorigen Abschnitt beschriebenen Fahrtenhäufigkeitstabelle muss nun dieses invariante Grundangebot herausgefiltert werden, d.h. Fahrten aus der Tabelle müssen zu festen Fahrten deklariert werden.

An einem Beispiel des Dresdner S-Bahn-Netzes soll dieses Vorgehen erläutert werden.

Im heutigen Fahrplan, das einem solchen invarianten Grundangebot entspricht, verkehren stündlich zwei S-Bahn-Züge ab Meißen-Triebischtal. Diese verkehren abwechselnd nach Pirna und nach Schöna, wobei erstere immer zur Minute 5, zweite zur Minute 35 der Stunde ihren Ausgangsbahnhof verlassen. Das invariante Mindestangebot wird hier also vom Startpunkt abhängig definiert, als Zielpunkte sollen hier zwei Bahnhöfe in Frage kommen dürfen.

In der Fahrtenhäufigkeitstabelle seien für eine Stunde zwei Fahrten von Meißen nach Pirna sowie eine Fahrt von Meißen nach Schöna vermerkt. Bei der Festlegung des invarianten Mindestangebots wird mit der Linie mit dem längsten Fahrtweg begonnen, d.h. im Beispiel mit der S1-1 Meißen-Schöna. Zunächst sind noch keine Fahrten als invariantes Mindestangebot definiert, so dass diese Fahrt Meißen-Schöna den ersten Platz des Mindestangebots einnimmt und somit zur Minute 5 der Stunde Meißen verlässt. Übrig bleiben zwei Fahrten Meißen-Pirna, von denen eine den verbleibenden Platz des invarianten Mindestangebots einnimmt und damit die Abfahrtsminute 35 zugewiesen bekommt. Für die verbleibende Fahrt Meißen-Pirna muss nun innerhalb der Stunde, in der sie stattfinden soll, eine günstige Abfahrtszeit gesucht werden. Es ist unter diesen Voraussetzungen allerdings nicht möglich, einen gleichmäßigen Takt ab Meißen zu erreichen. Durch den vordefinierten 30 Minuten Takt ist bestenfalls eine Taktkombination 15-15-30 Minuten möglich.

In diesem speziellen Fall ist zu prüfen, ob nicht zusätzlich ein Mindestangebot für drei Fahrten zu definieren wäre, z.B. mit den Abfahrtszeiten 5, 25 und 45, was bei der geforderten Fahrtenzahl zu einem gleichmäßigen Takt führen würde.

Andererseits wäre es möglich, das Mindestangebot nur für die Relation Meißen-Schöna zu definieren, so dass in dem Beispiel nur eine Fahrt fest wäre, zwei hingegen noch zu disponieren, günstigerweise so, dass in Richtung Pirna der optimale 20-Minuten-Takt entstünde. Der Nachteil dieser Variante besteht darin, dass dieser Takt nicht als Ergebnis der automatischen Planung garantiert werden kann und möglicherweise zu einem schlecht merkbaren Ergebnis entartet. Ein weiterer Nachteil täte sich dann auf, wenn z.B. in den Tagesrandlagen Züge ausschließlich bis Pirna geführt würden, womit dann überhaupt kein Zug zum invarianten Mindestangebot gehörig wäre.

Im Dresdner Liniennetz lässt sich ein weiteres Beispiel für eine mögliche Definition eines Mindestangebots von einem Startpunkt finden. Auf der Linie S2 vom Flughafen in Richtung Stadtzentrum werden im Moment Dresden-Hbf und Dresden-Neustadt als Linienendpunkte jeweils stündlich angefahren. Hier wäre ebenfalls eine halbstündliche Bedienung eines der beiden Endpunkte oder im weiteren Ausbau sogar eine stündliche oder halbstündliche Verlängerung bis Heidenau denkbar. Wird das invariante Mindestangebot nur für den Startbahnhof Dresden-Flughafen festgelegt, blieben die Abfahrtszeiten dort die selben wie im heutigen 29-31-Minuten-Takt.

Analog lassen sich auch Mindestangebote für einzelne Endbahnhöfe mit verschiedenen Startbahnhöfen festlegen, dies findet für die Rückrichtungen der beschriebenen Relationen Anwendung.

Durch die Festlegung der Abfahrtszeiten des invarianten Mindestangebots können sich für die Disposition anderer Fahrten gewisse Einschränkungen ergeben, die bei der Planung des Mindestangebots berücksichtigt werden sollten. So kann z.B. ein leicht unregelmäßiger Takt wie auf der Dresdner Flughafenlinie (von 29 und 31 Minuten) dazu führen, dass nur eine geringere Zahl Züge disponiert werden kann, als eigentlich aufgrund des Streckenausbaus möglich. Folgendes Beispiel soll dies erläutern:

Bei Abfahrt eines Zuges zur Minute 0 und zur Minute 29 können bei einer angenommenen kürzesten Zugfolgezeit von fünf Minuten (M2-PZB-Szenario) nur maximal 4 Fahrten zwischen den festen Fahrten verkehren: z.B. zur Minute 5, 10, 15 und 20. Anschließend (nach der Abfahrt des Zuges zur Minute 29 und vor der Abfahrt der nächsten Fahrt zur Minute 0+60) können maximal 5 Fahrten disponiert werden, z.B. zur Minute 34, 39, 44, 49 und 54. D.h. obwohl die Strecke bei der angenommenen Mindestzugfolgezeit von 5 min über eine Kapazität von 12 Fahrten pro Stunde verfügt, können durch die ungeschickte Wahl der Abfahrtsminuten des invarianten Mindestangebots in diesem Falle nur maximal 11 Fahrten den gegebenen Streckenabschnitt passieren.

Es ist ebenfalls möglich, ein solches Mindestangebot nur für den Fall zu definieren, in dem nicht mehr als die angegebenen Fahrten auf der betreffenden Relation verkehren. Ein solches Vorgehen ist in Abb. 5.15 dargestellt, in der für das in Abb. 5.13 dargestellte Verkehrsangebot im

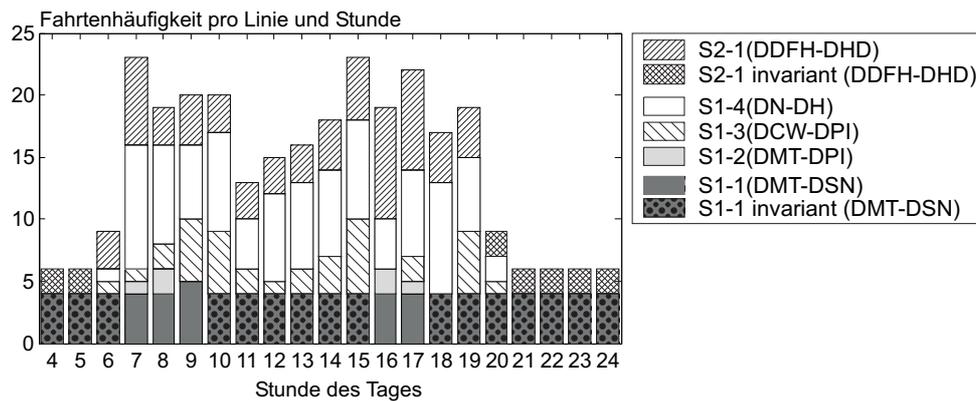


Abbildung 5.15: Invariantes Mindestangebot im AGT-Szenario

AGT-Szenario ein invariantes Mindestangebot von 4 Fahrten für die Relation Meißen-Pirna sowie eines von 2 Fahrten für die S-Bahn-Linie S2-1 angenommen wurde. Es ist zu erkennen, dass dieses auf der Flughafenlinie nur in den Tagesrandstunden zum Einsatz kommt. Im Gegensatz dazu wird auf der Elbtallinie S1-1/ S1-2 nur in den Morgen- und Nachmittagsverkehrsspitzen von diesem invarianten Mindestangebot abgegangen.

## 5.6 Finden von Abfahrtszeiten der zu disponierenden Fahrten unter Verwendung Genetischer Algorithmen

Nachdem aus der Fahrtenhäufigkeitstabelle alle zum invarianten Mindestangebot gehörenden Fahrten herausgearbeitet wurden, verbleibt eine Zahl Fahrten im allgemeinen auf unterschiedlichen Linien, für die eine optimale Abfahrtszeit innerhalb der Stunde gefunden werden muss, in der die entsprechende Fahrt aus verkehrlichen oder betrieblichen Gründen benötigt wird (vgl. Abb. 5.15). Ein Fahrplan ist vollständig beschrieben, wenn für jede nicht zum invarianten Mindestangebot gehörende Fahrt eine Abfahrtszeit festgelegt ist. Ein solcher Vektor der Abfahrtszeiten muss für die Verwendung mit Genetischen Algorithmen in einem Chromosom kodiert werden.

Für Abfahrtszeiten sollen als kleinste Einheit ganze Sekunden zugelassen werden, was heute als Planungsgröße im automatischen Betrieb üblich ist. Größere Diskretisierungsschritte wie Sechstelminuten (10-s-Diskretisierung) oder Minuten, die im traditionellen Eisenbahnbetrieb nach wie vor gängig sind, können ebenfalls genutzt werden. Die Verwendung dieser Größen führt zu einer deutlichen Verkleinerung des Suchraums und damit Verbesserung des Konvergenzverhaltens jedes eingesetzten Optimierungsverfahrens. Dabei ist allerdings die kleinste bei der Fahrplanung vorkommende Zeiteinheit zu beachten: Hat man beispielsweise Mindestzugfolgezeiten nur im Bereich von Minuten zu beachten, so kann auch die Fahrplanung problemlos in diesem Bereich durchgeführt werden. In bestimmten Fällen kann durch die grobe Diskretisierung die optimale Lösung nicht erreicht werden. So soll als Beispiel eine Fahrt zwischen zwei Fahrten der Abfahrtsminuten 0 und 15 gelegt werden. Die optimale Lösung für den Fahrgast,

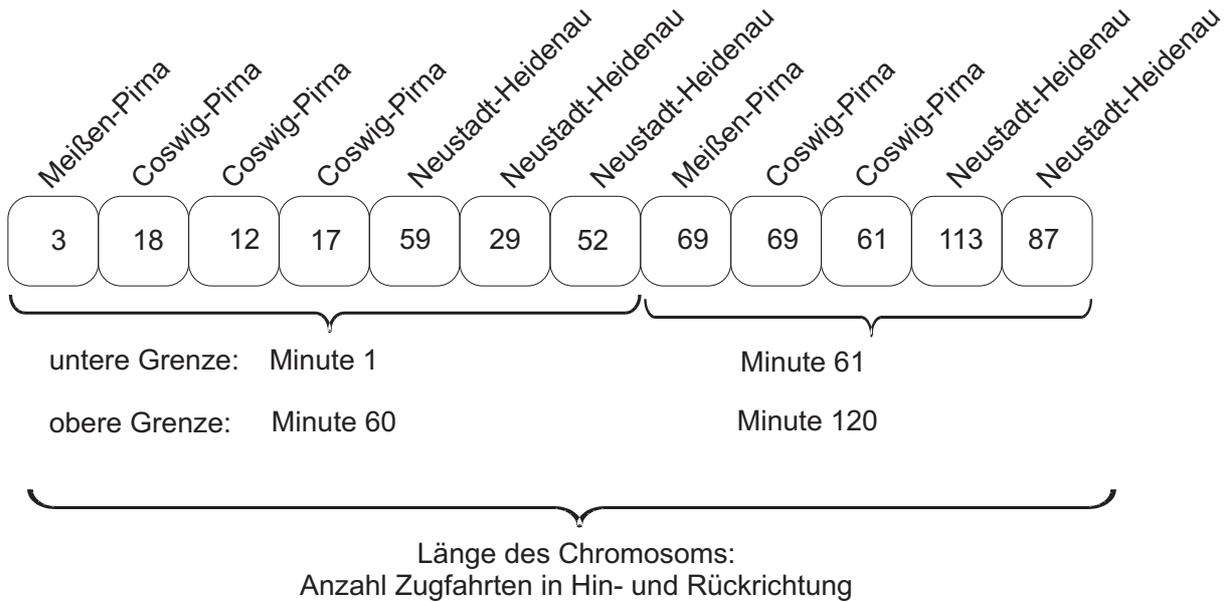


Abbildung 5.16: Kodierung eines Fahrplans in einem Chromosom

nämlich ein gleichmäßiger Takt von 7,5 min lässt sich bei minutengenaue Diskretisierung nicht erreichen.

Für jede der gegebenen Fahrten auf allen Linien in beiden Fahrtrichtungen muss die konkrete Zeit ermittelt werden, in der diese den zentralen Abschnitt des Netzes passiert, sei dies faktisch oder nur virtuell (siehe Hinweis im Abschnitt 5.3 zur Reisezeittransformation des Verkehrsaufkommens). Dieses Problem kann auf zwei unterschiedliche Weisen für den Einsatz mit Genetischen Algorithmen kodiert werden.

### 5.6.1 Direkte Kodierung der Abfahrtszeiten im zentralen Abschnitt des Netzes (Verfahren I)

Die Abfahrtszeit der Zugfahrt bezüglich des zentralen Abschnitts im Netz wird bei dieser Methode direkt in einem der konkreten Zugfahrt zugeordneten Gen kodiert, so dass die Länge des Chromosoms unmittelbar der Zahl der zu disponierenden Fahrten entspricht. Gültigkeitsbereich eines jeden Gens ist jeweils vom ersten Abfahrtszeitpunkt der Stunde (z.B. Minute oder Sekunde 1 der Stunde) bis zum letzten Abfahrtszeitpunkt (Minute 60 oder Sekunde 3600 der Stunde).

Diese Kodierung ist direkt und transparent. Aus dem Chromosom kann ein erster Rohfahrplan direkt abgelesen werden.

Die Anzahl verschiedener Chromosome lässt sich einfach durch die Anzahl möglicher Variationen mit Wiederholung angeben:

$$\overline{V}_n^k = n^k, \quad (5.11)$$

Dabei stellt  $n$  die Größe des Suchraums für eine Abfahrtszeit dar (d.h.  $n = 60$  bei minutengenaue oder  $n = 3600$  bei sekundengenaue Diskretisierung des Suchraums) und  $k$  die Anzahl festzulegender Abfahrten.

Für den im Chromosom enthaltenen Fahrplan ist nicht garantiert, dass Mindestzugfolgezeiten eingehalten werden, so dass der Raum möglicher Chromosomen auch eine große Zahl ungültiger Lösungen enthält. Diese wird noch größer, wenn auch Fahrten des invarianten Mindestangebots betrachtet werden sollen. Die Anzahl ungültiger Lösungen lässt sich dabei nicht direkt angeben und hängt auch von der Komplexität dieses Mindestangebots ab. Qualitativ lässt sich festhalten, dass die Anzahl von Lösungen, bei denen Mindestzugfolgezeiten nicht eingehalten werden, umso größer wird, je dichter die Anzahl festzulegender Abfahrten in der Nähe der Streckenkapazität liegt. Bei geringer Ausnutzung der Streckenkapazität treten ungültige Lösungen nur selten auf.

### 5.6.2 Kodierung von Zugfolgepufferzeiten und der Reihenfolge der Zugfahrten (Verfahren II)

Bei der zweiten hier zu untersuchenden Kodierung werden im Gegensatz zu Verfahren I Abfahrtszeiten und Reihenfolge der Zugfahrten getrennt kodiert.

Die Beschreibung der Abfahrtszeiten erfolgt dabei nicht direkt als Angabe von Abfahrtsminuten sondern indirekt als Beschreibung der Zugfolgepufferzeiten, die nach Ablauf der Mindestzugfolgezeit noch vergehen, bis die nächste Zugfahrt stattfindet.

Für eine gegebene Zahl Züge ist die Summe dieser Zugfolgepufferzeiten, die auch als Reserve im Fahrplan betrachtet werden kann, konstant für jede gültige Lösung. Dies wird auch anhand Abb. 5.17 sichtbar. Diese Reserve ergibt sich aus der Anzahl der in der betreffenden Stunde auf einem Abschnitt zu realisierenden Fahrten sowie den Stundengrenzen. In Stunden maximaler Belastung ist diese Reserve 0, bei geringer Zugdichte groß. Die Anzahl der Intervalle in einem gegebenen Zeitabschnitt (z.B. eine Stunde) entspricht der um eins erhöhten Zahl der Zugfahrten innerhalb dieses Zeitabschnitts.

Um dieses Problem für die Verwendung mit Genetischen Algorithmen auf einem Chromosom zu kodieren, wird die gesamte Reserve in Zeiteinheiten zergliedert. Je nach Genauigkeitsanforderungen bei der Fahrplanung bietet sich, wie oben bereits diskutiert, eine Einheit von 1 Minute, 10 Sekunden oder 1 s an. Jeder dieser Einheiten wird ein Gen auf dem Chromosom zugewiesen, der Inhalt des Gens enthält die Nummer des Intervalls, dem diese Einheit Reserve zugeordnet werden soll.

Die Länge des Chromosoms wird dabei durch die Anzahl Einheiten von Zugfolgepufferzeitreserve bestimmt. Die Reihenfolge der Gene auf dem Chromosom spielt bei der Ermittlung der Abfahrtszeiten keine Rolle.

Beim Vorgang der Dekodierung muss aus dem vorliegenden Chromosom eine Kombination von Zugfolgepufferzeiten für die verschiedenen Intervalle ausgelesen werden. Die Häufigkeit des Vorkommens jedes einzelnen Intervalls auf dem Chromosom entspricht dann der Länge des Intervalls in den zur Kodierung verwendeten Zeiteinheiten. Ist ein Intervall nicht auf dem Chromosom vorhanden, so folgen die betroffenen zwei Zugfahrten im Mindestabstand. Die Dekodierung von Zugfolgepufferzeiten ist an einem einfachen Beispiel in Abb. 5.18 dargestellt.

Die Zahl unterschiedlicher Kombinationen von Abfahrtszeiten  $N$  lässt sich, wie sich leicht zeigen lässt, als Zahl Kombinationen (ohne Beachtung der Reihenfolge) mit Wiederholung (jedes

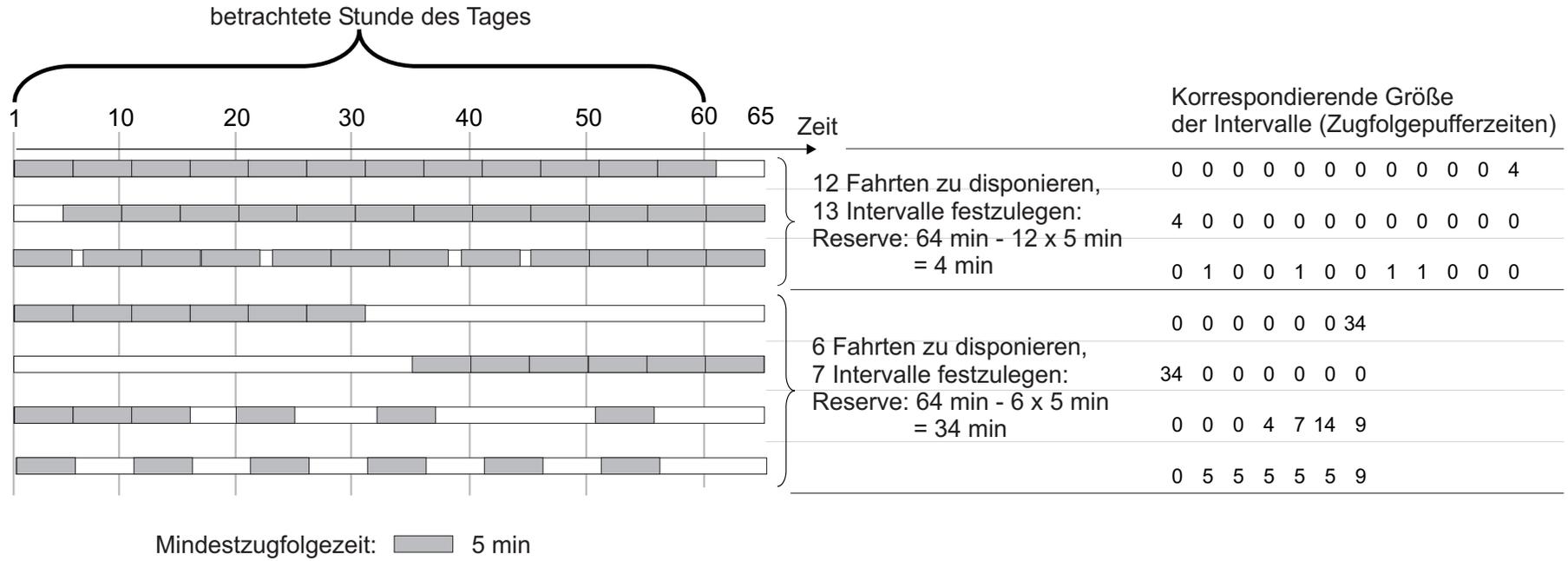


Abbildung 5.17: Verteilung von Zugfolgepufferzeiten auf die einzelnen Intervalle zwischen den Zugfahrten

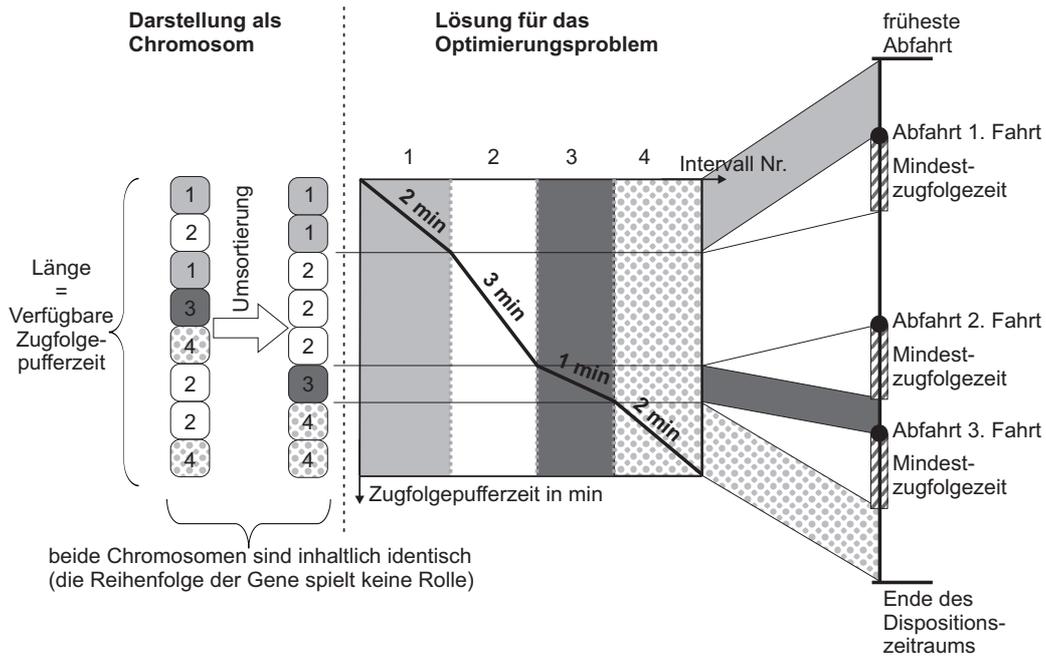


Abbildung 5.18: Prinzip der Kodierung von Zugfolgepufferzeiten zur Ermittlung der Abfahrtszeiten

Intervall kann beliebig häufig auf dem Chromosom vorkommen) beschreiben und damit durch

$$N = \binom{n + k - 1}{k}. \quad (5.12)$$

berechnen, wobei  $k$  der Zahl der Intervalle pro Zeitabschnitt und  $n$  der Summe der Reserven (Zugfolgepufferzeiten) in diesem Zeitabschnitt entspricht. Die einzelnen Lösungen treten bei zufälliger Erzeugung der Chromosomen mit binomial-verteilter Häufigkeit auf. Implizit führt diese Kodierung daher zur Bevorzugung von Fahrplänen mit gleichmäßigen Zugfolgezeiten, da solche Lösungen sehr viel häufiger auftreten, als Lösungen mit extremen Verteilungen (z.B. mit der gesamten Reserve vor der ersten oder nach der letzten Fahrt).

Beispiele für die Zahl möglicher Kombinationen von Abfahrtszeiten finden sich für verschiedene Fälle der untersuchten Szenarien in Tabelle 5.3.

Während in dem dargestellten Beispiel ohne feste Fahrten jedes mögliche Chromosom automatisch eine gültige Lösung enthält (siehe auch Abb. 5.17), können die festen Abfahrtszeiten der Fahrten des invarianten Mindestangebots bei der Kodierung selbst nicht berücksichtigt werden. Im nächsten Abschnitt werden hierzu Überlegungen angestellt, wie solche ungültigen Fahrpläne bei der Optimierung behandelt werden.

Neben den Abfahrtszeiten selbst spielt im Falle der Überlagerung mehrerer Linien mit unterschiedlichen Fahrtzielen im S-Bahn-Bereich die Reihenfolge der Fahrten für die Qualität des Fahrplans die entscheidende Rolle. Das Reihenfolgeproblem soll dabei in der von GOLDBERG [61] vorgeschlagenen einfachen Art und Weise kodiert werden: Jeder zu disponierenden Fahrt wird ein Gen zugeordnet. Für eine gegebene Zahl Fahrten  $F$  innerhalb einer Stunde erhält man also einen String ebenfalls der Länge  $F$ . Inhalt der Gene ist eine Zahl zwischen 1 und einem

Fall	Anzahl Fahrten pro Stunde	Reserve in min	Größe Suchraum
M2-PZB min. Zugfolge: 5 min	12	0	1
	11	5	1 820
	8	20	6 906 900
	6	30	8 347 680
AGT min. Zugfolge: 2 min	30	0	1
	29	2	31
	24	12	600 805 296
	12	36	1,9293 $10^{11}$
	6	48	177 100 560

Tabelle 5.3: Zahl möglicher Abfahrtszeiten innerhalb einer Stunde für unterschiedliche Zugfolgezeiten und Fahrtenanzahlen

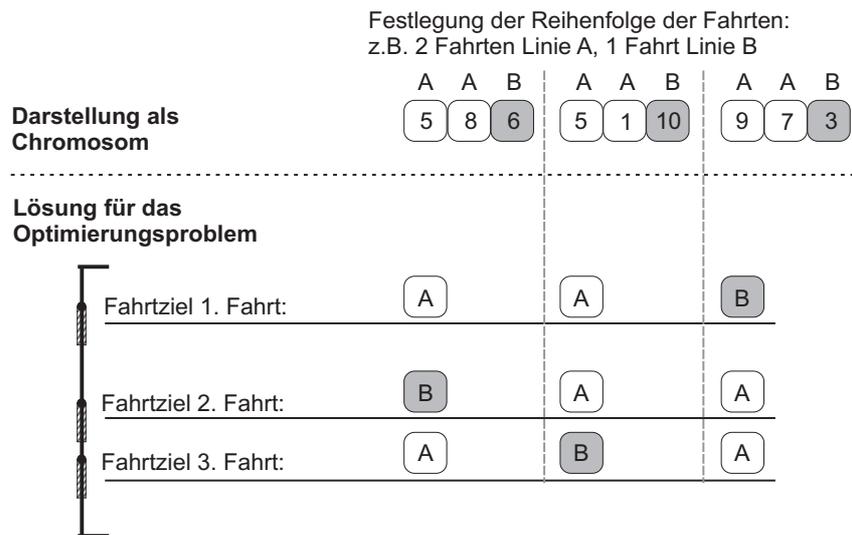


Abbildung 5.19: Ermittlung der Reihenfolge der zu disponierenden Fahrten aus einem Chromosom

Wert in der Größenordnung des Doppelten der Fahrtenanzahl. Dieser Zahlenwert bestimmt die Reihenfolge der Fahrten, d.h. die Fahrt mit dem niedrigsten Wert findet zuerst statt, die mit dem höchsten zuletzt. Diese Kodierung der Reihenfolge ist für drei verschiedene Chromosomen am bereits für die Abfahrtszeitermittlung verwendeten einfachen Beispiel in Abb. 5.19 dargestellt.

Beide Informationen, Zugfolgepufferzeiten und Reihenfolge der Fahrten werden dann für alle Stunden zusammengefasst auf einem Chromosom kodiert, wie dies auch in Abb. 5.20 skizziert ist.

### 5.6.3 Behandlung ungültiger Lösungen: Realisierung eines sicherungstechnisch machbaren Zugfahrtenprogramms

Bei der Verwendung Genetischer Algorithmen gibt es nach WEGELE und SCHNIEDER [184] beim Auftreten von Konflikten immer zwei Möglichkeiten, gültige Lösungen zu erzeugen:

1. Die konfliktbehafteten Fahrpläne als sehr schlecht zu bewerten, damit das Optimierungsverfahren sie selbst aussortiert.

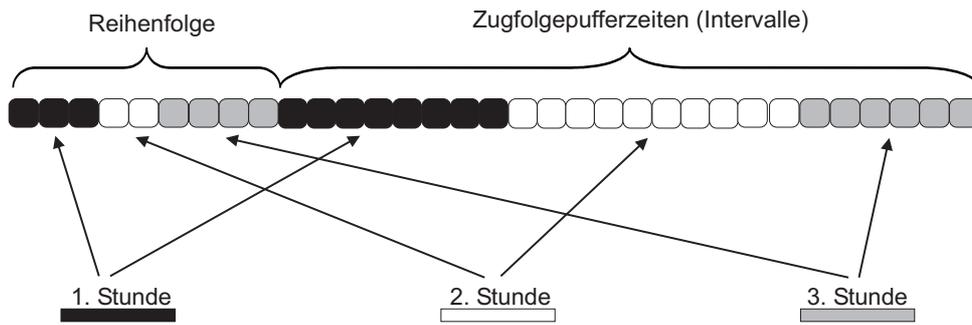


Abbildung 5.20: Kodierung von Reihenfolge und Zugfolgepufferzeiten auf einem Chromosom

2. Die konfliktbehafteten Fahrpläne nach einer festen Regel zu korrigieren.

Aufgrund des sehr großen Suchraums des hier vorliegenden Problems, der auch eine sehr hohe Zahl konfliktbehafteter und damit praktisch nicht realisierbarer Lösungen enthält, wurde die zweite Variante bevorzugt, d.h. die Implementierung von Verfahren, die aus einer beliebigen, konfliktbehafteten Lösung eine konfliktfreie Lösung erzeugen. Diese Verfahren sollen für beide vorgeschlagenen Kodierungen im folgenden beschrieben und an jeweils einem Beispiel demonstriert werden. Dabei werden die in Tabelle 5.4 definierten Begriffe verwendet (vgl. Abb. 5.21).

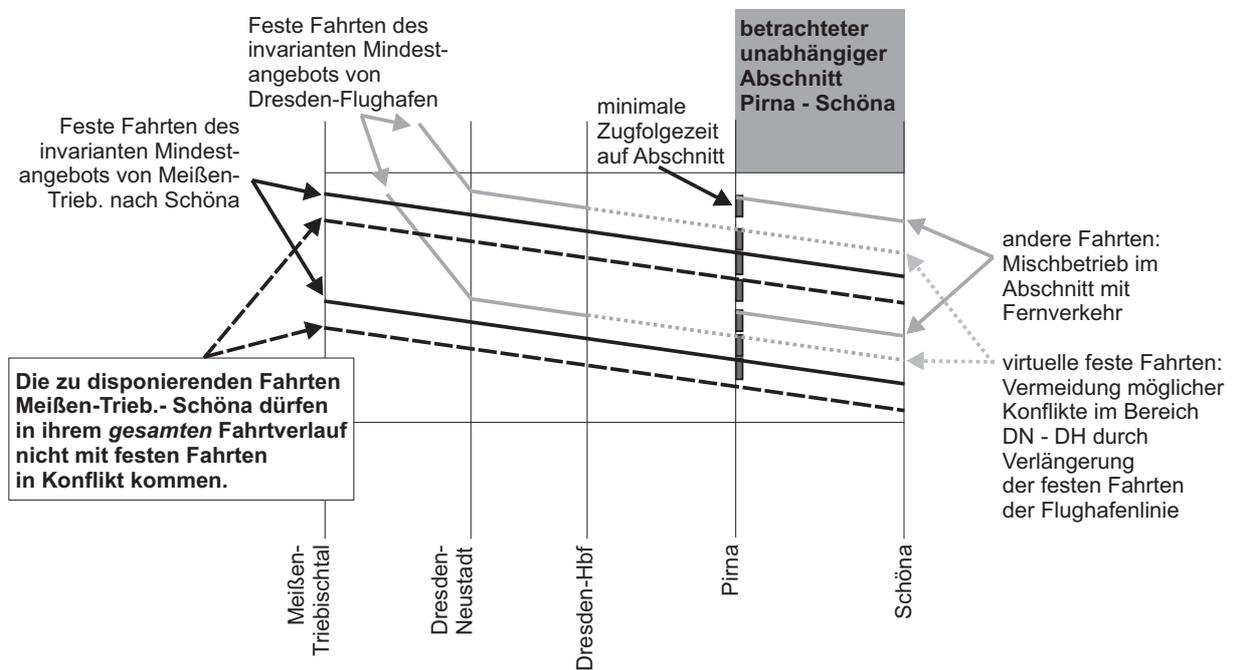


Abbildung 5.21: Konzept der virtuellen festen Fahrt am Beispiel der Disposition von Fahrten auf dem Abschnitt Pirna-Schöna

Unabhängige Abschnitte	Die Abschnitte, auf denen die Einhaltung der Zugfolgezeit geprüft werden muss, so dass der Fahrplan im gesamten Netz betrieblich machbar ist. Jeder Fahrt kann ein Abschnitt zugeordnet werden, auf dem diese disponiert werden soll. Bei der Herstellung eines sicherungstechnisch machbaren Fahrplans werden diese Abschnitte in der vorgegebenen Reihenfolge nacheinander betrachtet und allen auf dem aktuell untersuchten unabhängigen Abschnitt zu disponierenden Fahrten eine Abfahrtszeit zugeordnet.
Feste Fahrten	Fahrten der S-Bahn, für die bereits eine Abfahrtszeit fest steht. Dazu zählen zunächst die Fahrten des invarianten Mindestangebots. Nachdem auf einem unabhängigen Abschnitt die Einhaltung der Mindestzugfolgezeit gesichert ist, werden alle Fahrten, die nun eine Abfahrtszeit erhalten haben, bei der Betrachtung der folgenden unabhängigen Abschnitte ebenfalls als feste Fahrten betrachtet.
Andere Fahrten	Fahrten, die nicht zum S-Bahn-Angebot gehören, aber die gleiche Infrastruktur wie die S-Bahn nutzen. Sie werden bei der Erstellung des sicherungstechnisch machbaren Fahrplans wie feste Fahrten berücksichtigt.
Virtuelle feste Fahrten	Feste Fahrten, die nicht auf dem untersuchten unabhängigen Abschnitt verkehren, die aber in ihrem Fahrtverlauf auf Fahrten treffen, die im aktuellen Abschnitt disponiert werden sollen. Sie werden daher als virtuelle (scheinbare) feste Fahrten auch in diesem zu betrachtenden Abschnitt berücksichtigt, wobei die Einhaltung der Mindestzugfolgezeit zwischen einer festen Fahrt und einer virtuellen festen Fahrt im Abschnitt nicht geprüft werden muss. Das Konzept der virtuellen festen Fahrt ist in Abb. 5.21 an einem Beispiel für das Dresdner S-Bahn-Netz dargestellt.
Grenzen	Jede Fahrt muss den zentralen Abschnitt des Netzes innerhalb der Stunde passieren, in der sie eingeplant ist. Die Abfahrtszeit muss daher zwischen Minute oder Sekunde 1 der Stunde und Minute 60 oder Sekunde 3600 der Stunde liegen. Wenn in der vorhergehenden oder folgenden Stunde Fahrten in der Nähe der Stundengrenzen disponiert wurden, kann dies Einschränkungen der Grenzen zur Folge haben, wie sie in Abb. 5.22 illustriert sind.

Tabelle 5.4: Definition einiger bei der Beschreibung der Dekodierung eines Fahrplans aus einem Chromosom verwendeter Begriffe

### 5.6.3.1 Prinzipielles Vorgehen

Die Verfahren zur konfliktfreien Dekodierung müssen für alle unabhängigen Abschnitte in beiden Fahrtrichtungen durchgeführt werden. Die Reihenfolge der Abarbeitung der unabhängigen Abschnitte sollte, um den Fall der Nicht-Realisierbarkeit von Fahrten möglichst zu vermeiden, nach folgenden Gesichtspunkten festgelegt werden:

1. Soll in einem der zentralen Abschnitte an oder in der Nähe der Kapazitätsgrenze gefahren werden, so sollten zunächst die möglichen Trassen in jenem Abschnitt festgelegt werden. Lassen sich mit diesen Trassen bedingt durch die Lage anderer im Mischverkehr fahrender Züge keine Fahrten auf den Außenästen realisieren, so lässt sich dies nicht verhindern. Hier ist dann ein Experte gefragt, der z.B. durch manuelle Modifikation von Haltezeiten entsprechende Fahrten möglich macht.

2. Liegt auf einem Außenast ein hohes Verkehrsaufkommen durch Züge anderer Verkehrsmittel („Andere Fahrten“ nach Tabelle 5.4) vor, so sollten zunächst hier geeignete Trassen für die S-Bahn-Züge gefunden werden. Durch diese Festlegung können dann unter Umständen nur weniger Fahrten in einem der zentralen Abschnitte durchgeführt werden.

In jedem Fall ist es sinnvoll, Fahrten, die ausschließlich auf Außenästen verkehren (Kategorie 2 nach der Netzdefinition von Seite 52), zu disponieren, nachdem die Abfahrtszeiten aller anderen Fahrten bereits feststehen.

Im beschriebenen und in Abb. 5.5 dargestellten Beispielnetz der Dresdner S-Bahn ist die Betrachtung nur zweier unabhängiger Abschnitte ausreichend. Auf dem Abschnitt Pirna - Schönau müssen alle Langläufer disponiert werden, die durch den Mischbetrieb in Konflikt mit anderen Fahrten kommen können. Auf dem zentralen Abschnitt des Netzes (Dresden-Neustadt - Heidenau) können alle weiteren Fahrten disponiert werden. Kommt eine Linie S2-2 vom Flughafen nach Dresden-Neustadt hinzu, so müsste der Abschnitt Flughafen - Neustadt ebenfalls als unabhängiger Abschnitt betrachtet werden.

Die Festlegung der Abfahrtszeiten der Fahrten der einzelnen Linien erfolgt sequentiell für die einzelnen unabhängigen Abschnitte. Zunächst wird für den untersuchten unabhängigen Abschnitt ermittelt, wie viele freie Trassen hier für die Disposition der nicht-festen Fahrten zur Verfügung stehen. Dazu müssen neben den festen Fahrten sowie den anderen Fahrten auch virtuelle feste Fahrten beachtet werden, wie sie in Tabelle 5.4 eingeführt wurden. Alle diese Fahrten werden für den Prozess der Festlegung der Abfahrtszeiten der zu disponierenden Fahrten als feste Fahrten betrachtet.

Um die Zahl freier Trassen für eine Stunde ermitteln zu können, müssen alle festen Fahrten betrachtet werden, deren Abfahrtszeit auf dem betrachteten Abschnitt in der entsprechenden Stunde liegt. Die Zahl freier Trassen zwischen zwei festen Fahrten bzw. bis zur Stundengrenze ergibt sich aus der Differenz der Abfahrtszeiten der festen Fahrten auf dem Abschnitt dividiert durch die minimale Zugfolgezeit.

Die Lösung dieses Problems ist in Abb. 5.22 veranschaulicht.

In einer Stunde können naturgemäß nicht mehr Zugfahrten disponiert werden, als Trassen verfügbar sind. Überhöhte Anforderungen an Trassen sind daher zurückzuweisen. In der Implementierung werden zunächst Fahrtwünsche der kürzesten Linien ignoriert, die Linien mit der längsten Fahrtstrecke haben die höchste Priorität, eine Trasse zu bekommen. Nicht realisierte Fahrtwünsche sollten in der Gütefunktion mit Strafpunkten berücksichtigt werden. Darauf wurde bereits im Abschnitt 4.3 eingegangen.

Bei Betrachtung eines zum zentralen Abschnitt verschiedenen unabhängigen Abschnitts  $i$  müssen die Grenzen, zwischen denen eine Zugfahrt disponiert werden kann, nach der folgenden Vorschrift in Zeiten auf dem zentralen Abschnitt  $z$  des Netzes transponiert werden:

$$\text{Grenzen}^{RZ} = \text{Grenzen} + t_{RZ,z,i} \quad (5.13)$$

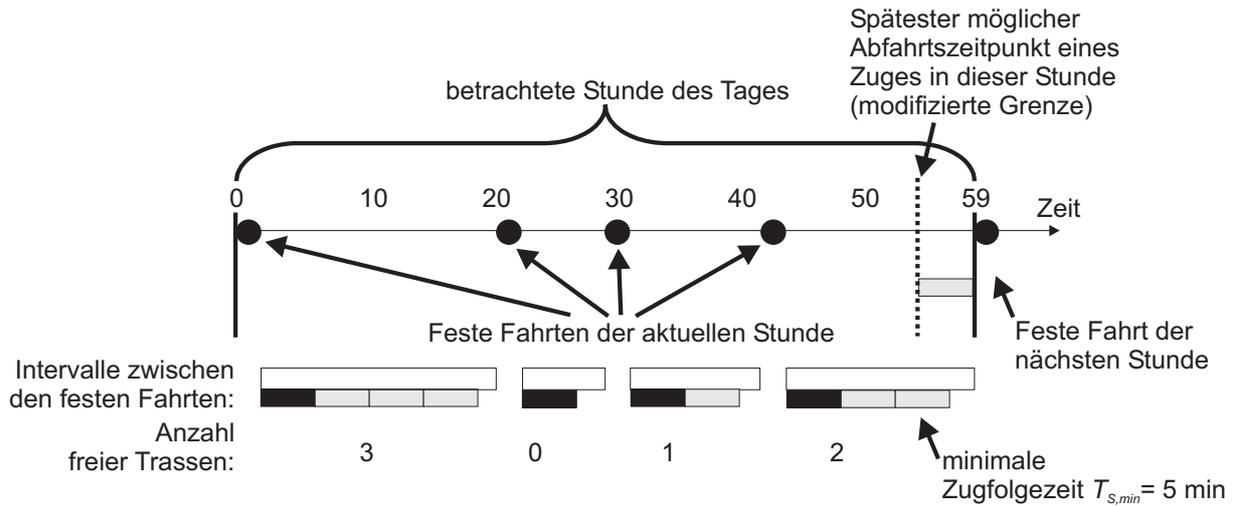


Abbildung 5.22: Ermittlung der Anzahl freier Trassen innerhalb gegebener Grenzen

Erst dann kann der Einsatz der im folgenden vorgestellten Verfahren zur Beseitigung von Konflikten erfolgen, mit dem konkrete Abfahrtszeiten für die einzelnen Fahrten ermittelt werden, so dass der erhaltene Fahrplan für den aktuell untersuchten unabhängigen Abschnitt konfliktfrei ist.

Ein auf allen unabhängigen Abschnitten konfliktfreier Fahrplan könnte so praktisch realisiert werden. Er ist damit ein möglicher Kandidat für eine Lösung, so dass für ihn nun der Wert für das Gütekriterium (Wartezeiten, Zahl Fahrzeuge, etc.) ermittelt werden muss.

### 5.6.3.2 Verfahrensbeschreibung für die Kodierung der Abfahrtszeiten (Verfahren I)

Das prinzipielle Vorgehen bei diesem Verfahren ist in dem im Anhang in Abb. 10.1 dargestellten Struktogramm abgebildet. Nachdem die Zahl der verfügbaren Trassen und die auf diese Trassen zu verteilenden Fahrten fest stehen, müssen aus dem Chromosom die Abfahrtszeiten der Fahrten dekodiert und anhand der Reisezeit analog zur Transformation der Grenzen auf den untersuchten unabhängigen Abschnitt  $i$  umgerechnet werden. Zusammen mit dem invarianten Mindestangebot, den virtuellen festen Fahrten und den anderen Fahrten entsteht damit ein Rohfahrplan, der auf Konflikte untersucht werden muss und von Konflikten bereinigt dem Fahrplan entspricht, der dann tatsächlich auf dem betrachteten unabhängigen Abschnitt realisiert wird.

Diese Prüfung des Rohfahrplans auf Konflikte erfolgt sequentiell, d.h. Konflikt für Konflikt. Das Vorgehen beim Bereinigen eines Konflikts ist in Abb. 10.2 im Anhang dargestellt.

Das Verfahren wurde so konzipiert, dass nach Bereinigen der Konflikte „möglichst viel“ Information aus dem im Chromosom kodierten Fahrplan enthalten ist, so z.B. die Reihenfolge der Züge. Deswegen wird in der Regel die Fahrt, die den Konflikt auslöst, so weit nach hinten verschoben, dass sie keinen Konflikt mehr auslöst. Überschreitet sie die obere Grenze (das Stundenende abzüglich eventueller Einschränkungen durch feste Fahrten der Folgestunde), so wird ihr das Stundenende zugewiesen und anschließend alle davorliegenden Fahrten solange nach vorn geschoben, bis dieses Schieben keinen Konflikt mehr verursacht.

Der Ablauf soll anhand des Beispiels in Abb. 5.23 erläutert werden. Zeile 0 enthält die Ausgangslösung, die bei einer Mindestzugfolgezeit von fünf Minuten sehr viele zu lösende Konflikte enthält.

Erster Konflikt ist die Abfahrt von Fahrt 1, die zu dicht auf die erste feste Fahrt folgt. Fahrt 1 wird deshalb soweit nach hinten geschoben (auf Abfahrtsminute 5), dass der Konflikt gelöst ist (Zeile 1). Das Verschieben erzeugt dabei keine neuen Konflikte, so dass der neue erste Konflikt ein bereits vorhandener ist. Da Fahrt 3 zu dicht auf Fahrt 2 folgt, wird Fahrt 3 in 5 Minuten Abstand zu Fahrt 2 verschoben (Zeile 2). Auch Fahrt 4 folgt zu dicht auf Fahrt 2, diese Fahrt wird in Zeile 3 auf die selbe Abfahrtszeit wie Fahrt 3, nämlich im Abstand der Mindestzugfolgezeit nach Fahrt 2 verschoben. Die Fahrten 3 und 4 bilden mit ihrer identischen Abfahrtszeit einen neuen Konflikt. Dieser wird gelöst, in dem Fahrt 3 um den Betrag der Zugfolgezeit nach hinten geschoben wird (Zeile 4). Ein neuer Konflikt ist entstanden, nämlich zwischen Fahrt 3 und 5, der durch Verschieben von Fahrt 5 gelöst wird (Zeile 5), wodurch ein neuer Konflikt zwischen Fahrt 5 und der darauffolgenden festen Fahrt entsteht. Da die feste Fahrt nicht verschoben werden kann, um diesen Konflikt zu lösen, wird Fahrt 5 selbst auf eine Abfahrtszeit 5 min nach der festen Fahrt gelegt (Zeile 6). Es verbleibt der Konflikt der Fahrten 6 und 7 mit der festen Fahrt vom Beginn der nächsten Stunde. Der Konflikt zwischen Fahrt 6 und 7 wird gelöst, in dem die Abfahrt von Fahrt 7 fünf Minuten nach die Abfahrt von Fahrt 6 gelegt wird (Zeile 7). Dabei überschreitet diese allerdings die für sie vorgegebenen Grenzen und wird durch den Rückwärtszweig aus Struktogramm 2 auf den gültigen Maximalwert (Mindestzugfolgezeit vor der ersten festen Fahrt der Folgestunde) gelegt (Zeile 8), der in diesem Fall exakt der Abfahrtszeit von Fahrt 6 entspricht. Diese wird daraufhin im selben Rückwärtszweig in der Abfahrtszeit um die minimale Zugfolgezeit vorverlegt (Zeile 9). Damit sind sämtliche Konflikte gelöst, in der modifizierten Lösung stimmt bis auf das Vertauschen von Fahrt 3 und 4 die Reihenfolge mit der originalen Reihenfolge überein. Die Abfahrtszeiten der Fahrten liegen dabei ebenfalls noch so dicht wie möglich an der Originallösung.

### 5.6.3.3 Güte des entwickelten Verfahrens zur Konfliktbeseitigung für die Kodierung von Abfahrtszeiten (Verfahren I)

Die Güte des entwickelten Verfahrens zur Konfliktbeseitigung kann, wie im vorigen Abschnitt diskutiert, nur darin bestehen, dass die entstehende betrieblich machbare Lösung mit der auf dem Chromosom kodierten Lösung viele Ähnlichkeiten aufweist. Um dies zu prüfen, wurden zwei Fälle der Fahrtendisposition genauer untersucht: in Fall 1 sollten 6 Fahrten in einer Stunde disponiert werden, bei Fall 2 waren dies 9 Fahrten. Dabei war eine Mindestzugfolgezeit von 5 min zu beachten. Die Abfahrtszeiten wurden mit einer Genauigkeit von 1 s erstellt, feste Fahrten traten in der betreffenden Stunde nicht auf. Mit Hilfe eines Zufallsgenerators wurden in beiden Fällen jeweils 1000 Lösungen gleichmäßig zufällig erzeugt und diese durch den Algorithmus so modifiziert, dass die Abfahrten betrieblich machbar wurden. Die Zahl der in jeder Minute stattfindenden Abfahrten ist in Abb. 5.24 für beide Fälle.

5 Ein mehrstufiges Verfahren unter Verwendung Genetischer Algorithmen

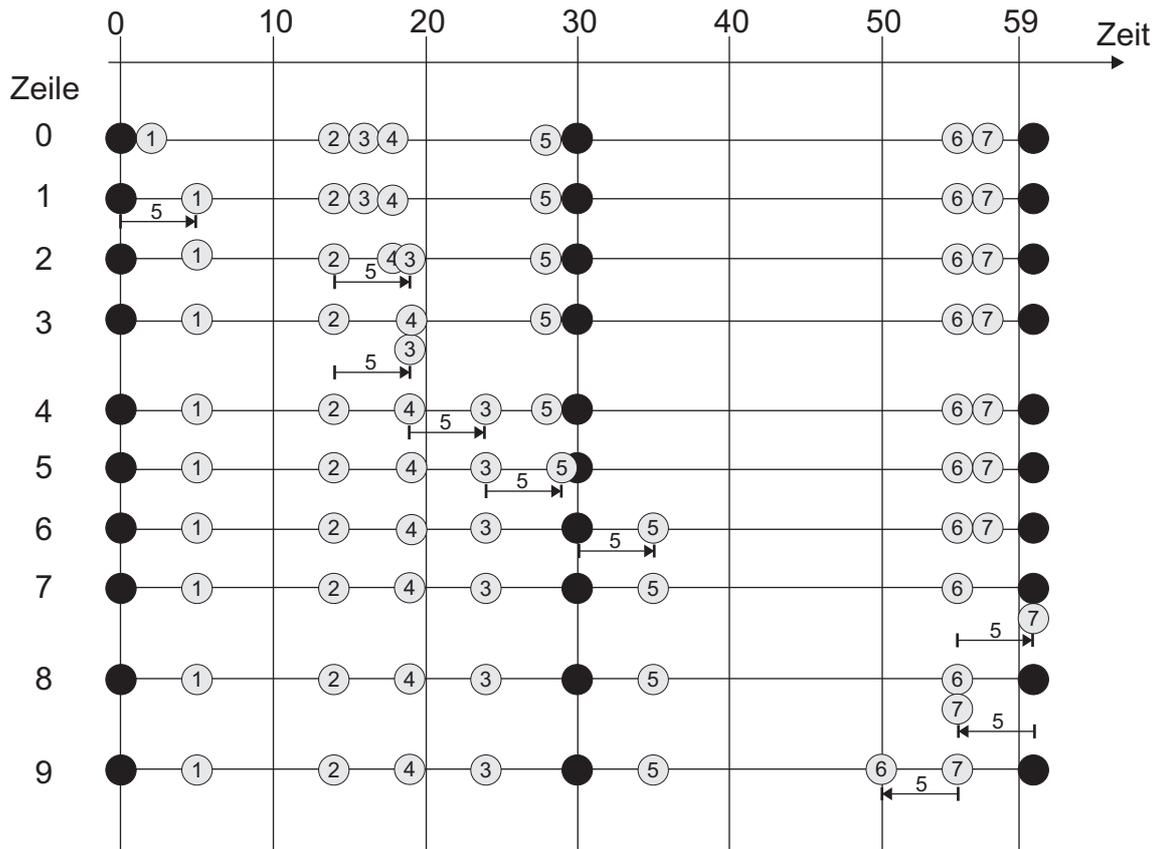
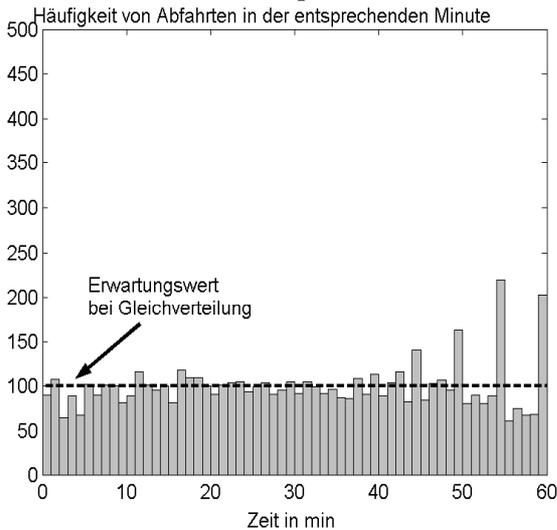


Abbildung 5.23: Verfahren I: Beispiel für die Anwendung des entwickelten deterministischen Verfahrens zur Umsetzung eines konfliktbehafteten in einen konfliktfreien Fahrplan. Die schwarzen Punkte stellen Abfahrten fester Fahrten dar, die grauen Punkte mit Nummer zu optimierende Fahrten

Fall 1: 6 Fahrten zu disponieren



Fall 2: 9 Fahrten zu disponieren

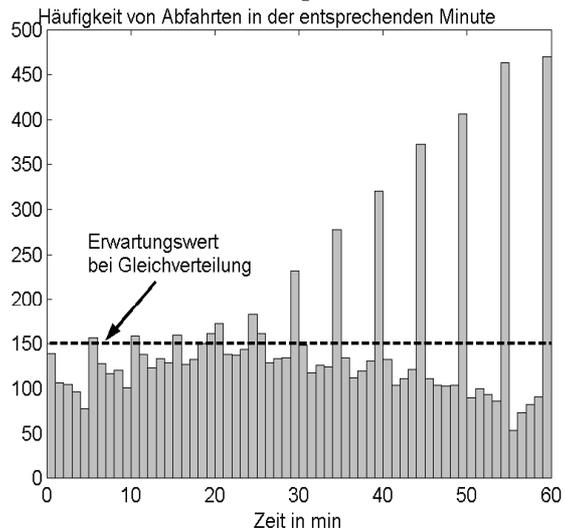


Abbildung 5.24: Abfahrtsminuten der zu disponierenden Fahrten nach der Konfliktbereinigung von 1000 gleichverteilt-zufällig erzeugten Chromosomen (Verfahren I)

Zwei wesentliche Punkte lassen sich aus der Analyse dieser Zufallsversuche ableiten:

1. Die Abfahrtsminuten werden deutlich modifiziert gegenüber den gleichverteilten Originallösungen. Dennoch treten auch bei den betrieblich machbaren Lösungen alle Abfahrtsminuten auf.
2. Bedingt durch das beschriebene Verfahren wird eine große Zahl von Fahrten in Richtung des Stundenendes verschoben und durch den Rückwärtszweig des Algorithmus auf die Abfahrtsminuten im Abstand der Mindestzugfolgezeit vor dem Stundenende verlegt. Dieser Effekt ist umso stärker, je näher die Zahl Fahrten an der Streckenkapazität liegt (9 Fahrten = 75% der Kapazität, 6 Fahrten = 50%). Während beispielsweise in Fall 1 die Abfahrten zur Minute 59 etwa dreimal so häufig vorkommen, wie zur Minute 58, ist bei Fall 2 dieses Verhältnis deutlich ungünstiger: zur Minute 59 finden sechsmal so viele Fahrten statt wie zur Minute 58.

Da Genetische Algorithmen stochastische Suchverfahren sind, kann von einem ähnlichen Erscheinungsbild während der Optimierung ausgegangen werden. Durch das vorgestellte Verfahren ist es damit für den Genetischen Algorithmus deutlich schwieriger, eine optimale Abfahrt zur Minute 58 zu finden, als eine Abfahrt zur Minute 59. Wenn ein markanter Unterschied in der Größe des Gütekriteriums zwischen den Abfahrtsminuten liegt, so sollte der GA in der Lage sein, die bessere Lösung zu erkennen und in der Optimierung festzuhalten.

Werden feste Fahrten als zusätzliche Randbedingungen in die Optimierung einbezogen, so wird es im Abstand der Mindestzugfolgezeit vor und nach den festen Fahrten ebenfalls Abfahrten geben, die in der Häufigkeit ihres Auftretens deutlich gegenüber den unmittelbar benachbarten Abfahrten überwiegen.

Bei dem Fall von 10 Fahrten pro Stunde mit 2 festen Fahrten im 30 Minuten Takt ist es daher wahrscheinlich, dass zwischen den beiden festen Fahrten ein 5-min-Takt entsteht, während vor der ersten festen Fahrt größere Lücken auftreten. Damit in der Optimierung z.B. ein durchgängiger 6-min-Takt erreicht werden kann, muss die Gütefunktion deutliche Unterschiede zwischen den beiden Varianten erkennen lassen.

### **5.6.3.4 Verfahrensbeschreibung für Kodierung von Zugfolgepufferzeiten und Reihenfolge (Verfahren II)**

Die Festlegung der Abfahrtszeiten und Reihenfolge der Fahrten der einzelnen Linien erfolgt bei diesem Verfahren nicht nur sequentiell für die einzelnen unabhängigen Abschnitte sondern ebenfalls für die einzelnen Stunden des Tages. Das prinzipielle Vorgehen ist in Abb. 10.3 im Anhang in Form eines Struktogramms dargestellt.

Zunächst wird für den untersuchten unabhängigen Abschnitt für die entsprechende Stunde des Tages ermittelt, wieviel Zugfolgepufferzeitreserve unter Beachtung der festen Fahrten sowie der anderen und virtuellen festen Fahrten zur Verfügung steht. Dabei ist zu berücksichtigen, dass eine virtuelle feste Fahrt unter Umständen auch dichter als die standardmäßig angenommene Mindestzugfolgezeit auf eine feste Fahrt folgen kann (vgl. Abb. 5.21 auf Seite 81).

Da in einer Stunde naturgemäß nicht mehr Zugfahrten disponiert werden können, als Trassen verfügbar sind, muss die Zahl der zu disponierenden Fahrten und damit auch die Zahl der Intervalle in diesem Fall angepasst werden. Sind diese Zahlen ermittelt, kann die Dekodierung des zu der entsprechenden Stunde und dem entsprechenden unabhängigen Abschnitt gehörenden Teil des Chromosoms erfolgen, auf dem die Zugfolgepufferzeiten kodiert sind.

Der weitere Ablauf des Verfahrens soll hier in seinen wesentlichen Zügen anhand des konstruierten Beispiels in Abb. 5.25 erläutert werden.

Dabei sollen zwischen den Minuten 1 und 63 sieben Zugfahrten realisiert werden. Auch die Mindestzugfolgezeit der letzten Zugfahrt muss spätestens zur Minute 63 abgelaufen sein, d.h. zur Minute 63 könnte dann schon ein nächster Zug (der nächsten Stunde) verkehren. Zwei der sieben Zugfahrten sollen dem invarianten Mindestangebot zugeordnet sein, diese verkehren zur Minute 20 und 50. Virtuelle feste Fahrten sind in diesem Beispiel nicht vorhanden. Bei einer Mindestzugfolgezeit von 5 Minuten ergibt sich daher eine Reserve von

$$\begin{aligned} \text{Reserve} &= \text{obere Grenze} - \text{untere Grenze} - \text{Anzahl Fahrten} \cdot \text{minZugfolge} \\ &= 63 \text{ min} - 1 \text{ min} - 7 \cdot 5 \text{ min} = 27 \text{ min.} \end{aligned} \quad (5.14)$$

Diese Reserve ist auf 8 Intervalle verteilt, die Ausgangslösung ist in Abb. 5.25 in Zeile 0 dargestellt. Wie im Detail im Struktogramm in Abb. 10.4 ebenfalls im Anhang dargestellt ist, erfolgt die Ermittlung der tatsächlichen Abfahrtszeiten der frei zu disponierenden Fahrten jeweils für die Intervalle bis zur nächsten festen Fahrt. Das erste derartige Intervall endet mit der festen Fahrt zur Minute 20. Vor diese feste Fahrt passt mit der vorhandenen Kombination von Zugfolgepufferzeiten nur eine einzige Fahrt (7 Minuten nach der unteren Grenze, d.h. zur Minute 8). Mit dem nächsten Intervall würde die Abfahrtszeit der darauffolgenden festen Fahrt zur Minute 20 um eine Minute überschritten. Dieses Intervall wird daher von 8 auf 7 Minuten gekürzt. Die dabei entstehende Reserve von einer Minute wird dem der festen Fahrt folgenden, dritten Intervall zugeteilt, wie dies in Zeile 1 geschehen ist. Die Abfahrtszeit der ersten freien Fahrt kann damit auf die Minute 8 festgelegt werden. Da keine weiteren Fahrten vor die erste feste Fahrt passen, wird der Zeitpunkt nach Ablauf der Mindestzugfolgezeit folgend auf die feste Fahrt als frühester Abfahrtszeitpunkt für die nächste frei zu disponierende Fahrt festgelegt (Minute 25).

Bei Betrachtung des Zeitabschnitts zwischen den beiden festen Fahrten wird deutlich, dass (nach Festlegung der ersten freien Fahrt) in diesem mindestens drei freie Fahrten stattfinden müssen, damit insgesamt die gewünschte Zahl von sieben Fahrten innerhalb dieser Stunde erreicht werden kann (Aufgrund der Fahrplanlage der zweiten festen Fahrt kann zwischen dieser und dem Ende des Betrachtungszeitraums nur noch maximal eine Fahrt gelegt werden). Um diese Randbedingung zu erfüllen, dürfen die nächsten vier Intervalle zusammen nicht größer als 10 min sein. Die zu viel auf diese Intervalle verteilte Reserve von 3 min wird den Intervallen 3, 4 und 5 gleichmäßig mit jeweils 1 min abgezogen und dem der zweiten festen Fahrt folgenden sechsten Intervall hinzugefügt. Die Abfahrtszeiten der zweiten, dritten und vierten zu disponierenden Fahrt werden, wie in Zeile 2 dargestellt, auf die Minuten 34, 40 und 45 festgelegt,

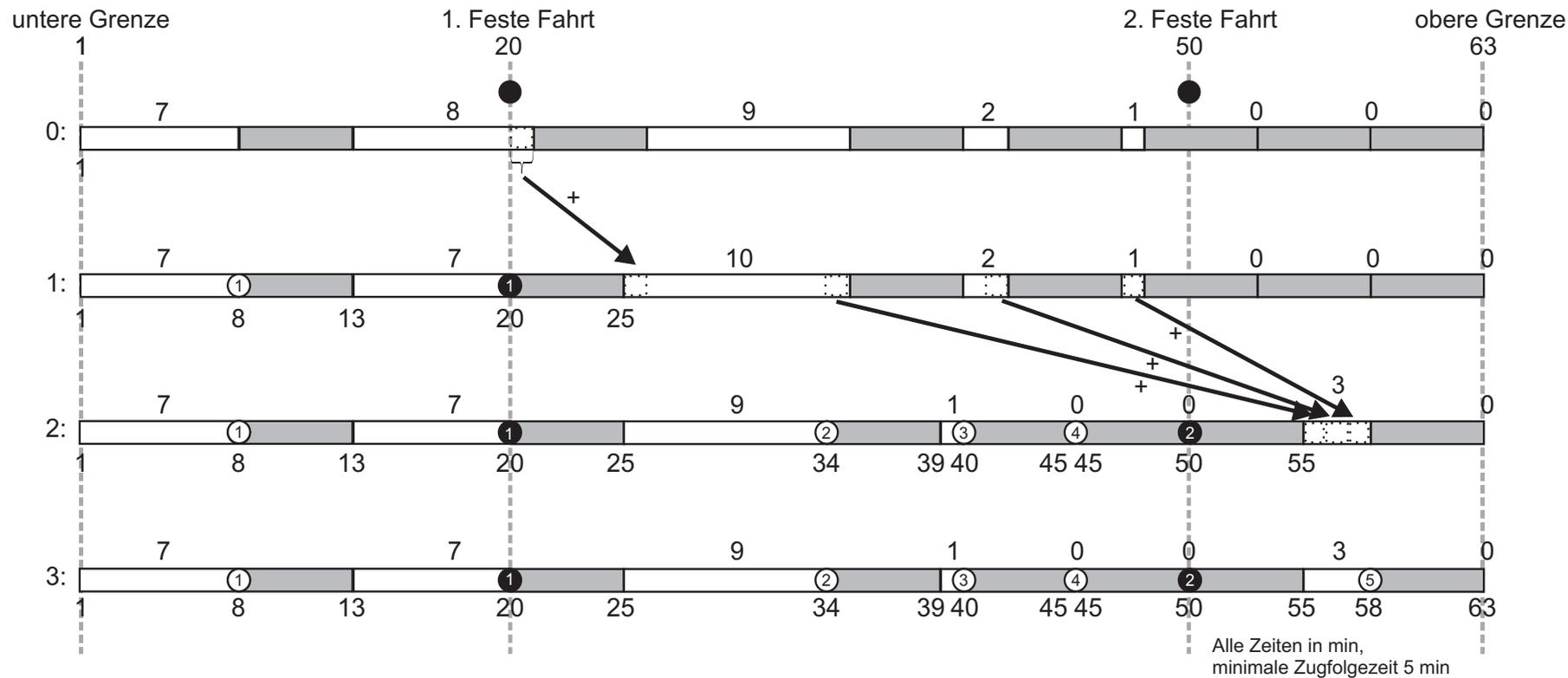
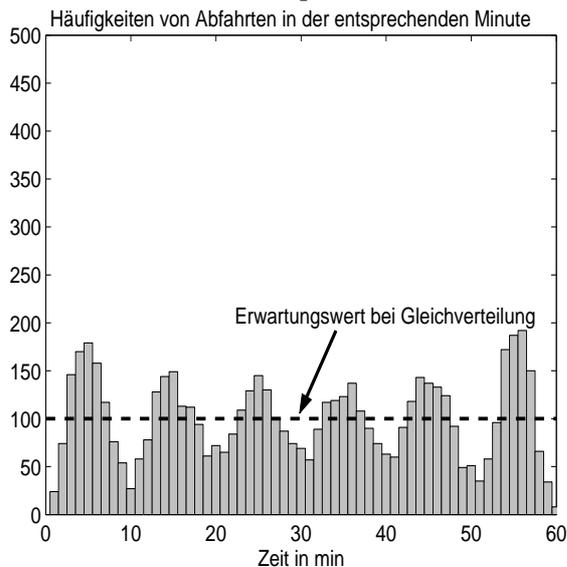


Abbildung 5.25: Verfahren II: Beispiel für Konfliktbeseitigung bei der Kodierung der Zugfolgepufferzeiten. Es sind hier zwei feste Fahrten zur Minute 20 und 50 angenommen.

Fall 1: 6 Fahrten zu disponieren



Fall 2: 9 Fahrten zu disponieren

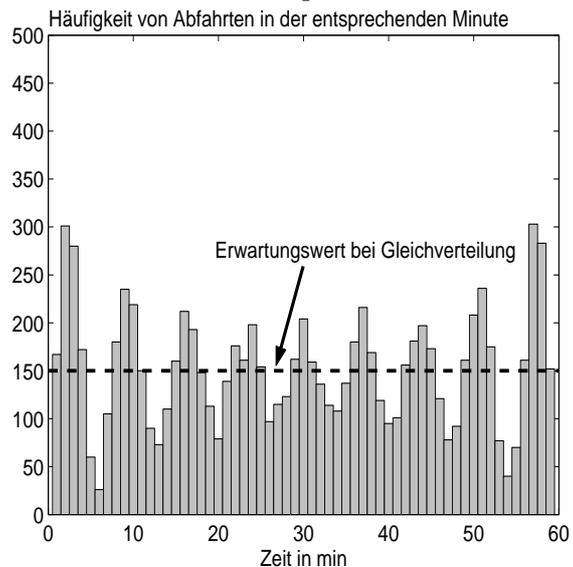


Abbildung 5.26: Abfahrtsminuten der zu disponierenden Fahrten nach der Dekodierung von 1000 gleichverteilt-zufällig erzeugten Chromosomen (Verfahren II)

der frühestmögliche Zeitpunkt zur Disposition der letzten freien Fahrt wird auf die Minute 55 festgelegt.

Aufgrund der vorherigen Modifikation hat das nun betrachtete siebente Intervall eine Länge von 3 min, so dass die fünfte freie Fahrt zur Minute 58 stattfindet. Nach Ablauf der Mindestzugfolgezeit ist die obere Grenze für die Disposition von 63 Minuten erreicht. Das 8. Intervall hatte hierbei den Wert 0 (Zeile 3).

### 5.6.3.5 Güte der entwickelten Kodierung von Zugfolgezeiten (Verfahren II)

Um die zweite Kodierung effektiv mit dem ersten Verfahren vergleichen zu können, sollte auch mit diesem Verfahren die Aufgabe gelöst werden, sechs bzw. neun Fahrten in einer Stunde zu disponieren. Da wie bei Verfahren I bei dieser Aufgabe keine festen Fahrten verwendet werden sollen, kommt das Verfahren zur Konfliktbeseitigung hier nicht zum Einsatz, da, wie oben beschrieben, ohne feste Fahrten keine Konflikte bei Kodierung II auftreten können. Die dekodierten Ergebnisse von je 1000 gleichmäßig zufällig erzeugten Chromosomen sind in Abb. 5.26 für beide Fälle nach Häufigkeit der entstandenen Abfahrtsminuten dargestellt.

Dieses entspricht exakt dem Verhalten der Binomialverteilung, wie es für diese Kodierung vorliegt: Im Abstand der bestmöglichen, gleichmäßigen Zugfolgezeit (10 bzw. 6,6 min) treten Lösungen wesentlich häufiger auf, als zu den Zeiten dazwischen. Die Spitzen sind dabei allerdings relativ breit und umfassen Abfahrtszeiten mit einem Abstand von 2-3 Minuten vom dazugehörigen Maximum, die bevorzugt durch diese Kodierung entstehen würden. Das erste und das letzte Maximum sind naturgemäß am deutlichsten ausgeprägt, sie befinden sich im halben Abstand der optimalen Zugfolgezeit von den Stundengrenzen entfernt. Der Unterschied zwischen Maximum und darauffolgendem Minimum ist in der Mitte der Stunde am geringsten, während er in der Nähe der Stundengrenzen maximal wird.

Dieses Ergebnis ist insbesondere durch die implizite Berücksichtigung eines gleichmäßigen Takts zufriedenstellend. Das deutlich unwahrscheinliche Auftreten von wenigen Zeiten in der Nähe der Stundengrenzen (0,10,50,60 bei 6 Fahrten pro Stunde) ist nicht optimal, sollte aber durch Verwendung einer geeigneten Gütefunktion praktisch von untergeordneter Bedeutung sein.

### 5.6.4 Vergleich der entwickelten Verfahren und Diskussion der Anwendungsmöglichkeiten

Der vorige Abschnitt hat gezeigt, dass es mit beiden Verfahren prinzipiell möglich ist, aus jedem möglichen Chromosom einen betrieblich machbaren Fahrplan zu erzeugen. Die genaue Analyse der entstehenden Fahrpläne zeigt allerdings, dass es mit Verfahren I in vielen Fällen schwierig wird, optimale Fahrpläne zu finden, da einige (möglicherweise sehr gute) Fahrpläne aufgrund von Limitierungen der Funktion zur Erstellung eines sicherungstechnisch machbaren Fahrplans nur mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit auftreten können.

Deshalb wird die Anwendung des Verfahrens II für die Optimierung vollständiger Betriebsprogramme vorgeschlagen. Für die Optimierung von Teilen eines Betriebsprogramms, deren Anforderungen deutlich unterhalb der Kapazität der Strecke liegen, kann ebenso die Kodierung I verwendet werden, da diese deutlich geringere Vorüberlegungen (Ermittlung verfügbare Reserve etc.) erfordert.

## 5.7 Umlaufplanung und Disposition von Leerfahrten<sup>5</sup>

Bei der Umlaufbildung werden jeder Zugfahrt Fahrzeuge zugeordnet, die Aneinanderreihung der verschiedenen Fahrten, die ein Fahrzeug durchführen muss, wird als Fahrzeugumlauf bezeichnet. Diese Umläufe sollten so gestaltet werden, dass die Fahrzeuge täglich auf einen neuen Umlauf übergehen.

Für die Umlaufoptimierung werden bei der Deutschen Bahn folgende Kriterien verwendet (aus [59]):

- Minimierung der Fahrzeuganzahl (Investitionen, Kapitalkosten),
- Minimierung der Leerfahrtenanzahl und
- Gleichmäßigkeit von Umläufen, d.h. die einzelnen Umläufe sollen möglichst gleich lang sein.

Bei dem in dieser Arbeit verwendeten Gütekriterium der Minimierung der Betriebsleistung sollte diese in Form der Leerfahrtentfernung ebenfalls in das Gütekriterium aufgenommen werden.

---

<sup>5</sup>Als Leerfahrten werden hier Fahrten bezeichnet, die zusätzlich zum verkehrlich notwendigen Fahrtenangebot durchgeführt werden, um Rollmaterial einzusparen. Diese Fahrten können und sollten zur Steigerung der Betriebseffizienz ebenfalls zur Fahrgastnutzung angeboten werden [59].

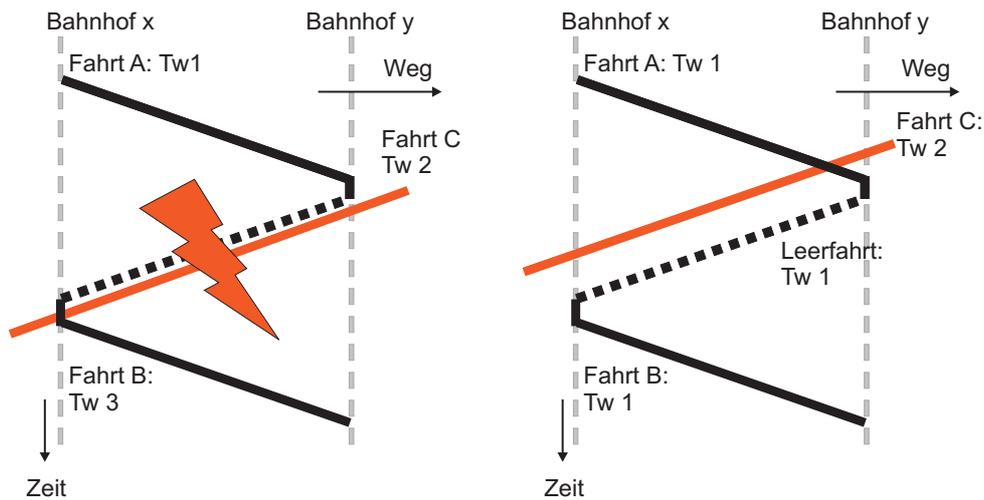


Abbildung 5.27: Unmögliche und mögliche Leerfahrt in Abhängigkeit der Fahrplanlage der Fahrten in der Gegenrichtung

Zur Lösung des Problems der Umlaufbildung wird dieses als ein Zuordnungsproblem betrachtet, bei dem für jede Fahrt genau eine nachfolgende Fahrt gefunden werden muss, so dass die Optimierungskriterien bestmöglich erfüllt werden [60]. Jede Kombination zwischen zwei Fahrten ist dabei mit einer Wartezeit zwischen Ankunft der vorhergehenden Fahrt und Abfahrt der folgenden Fahrt verbunden. Liegen Ziel der ersten Fahrt und Start der Folgefahrt an unterschiedlichen Bahnhöfen, so ist eine Leerfahrt notwendig, um diese Kombination von Fahrten zu realisieren. Mit jeder notwendigen Leerfahrt erhöht sich dabei die Betriebsleistung.

Bei der Umlaufbildung kann theoretisch jede Fahrt Folgefahrt jeder anderen Fahrt sein. Praktisch ist dies für einen gegebenen Fahrplan nicht immer möglich: Leerfahrten können unmöglich sein, wenn die dafür notwendige Trasse durch andere Züge bereits belegt ist. In Abb. 5.27 kann auf der linken Seite aufgrund der Fahrplanlage von Fahrt C keine Leerfahrt zwischen Bahnhof y und Bahnhof x erfolgen, um die Fahrten A und B mit einem einzigen Triebwagen (Tw) durchzuführen. Deswegen wird hier ein dritter Triebwagen benötigt. Im rechten Teil der Abbildung findet Fahrt C zu einem anderen Zeitpunkt statt, so dass eine Leerfahrt mit Triebwagen Nr. 1 möglich ist. Insgesamt würde in dieser Situation ein Triebwagen weniger benötigt.

In einem der Umlaufbildung voranzustellenden Verfahren müssen damit Fahrtenkombinationen, die aufgrund des vorliegenden Fahrplans eine solche praktisch nicht realisierbare Leerfahrt beinhalten, ausgeschlossen werden. Dies kann z.B. geschehen, in dem dieser Fahrtenkombination ein sehr hoher Wert für die Gütefunktion zugewiesen wird.

Praktisch werden verschiedene Verfahren zur Umlaufbildung verwendet (eine Übersicht findet sich in [43]). Im entwickelten Prototypen GENflex-S soll die Anwendung der Ungarischen Methode [28, 190] in einer Implementierung von S. SCHOLZ erfolgen. Dieses Verfahren wird dabei sequentiell mit drei unterschiedlichen Gütekriterien angewendet. In einem ersten Schritt wird versucht, die Anzahl notwendiger Fahrzeuge zu minimieren. Als Gütekriterium wird dafür die Summe der Übergangszeiten zwischen den Zugfahrten verwendet. Dabei entstehen im Allge-

meinen viele Lösungen, die sich in der Zahl notwendiger Fahrzeuge nicht unterscheiden. Unter diesen Lösungen werden nun die herausgesucht, bei denen die Leerfahrtentfernung minimal ist. Abschließend wird dann versucht, unter den Lösungen mit minimaler Betriebsleistung diejenigen auszuwählen, bei denen auch die Anzahl der Leerfahrten minimal ist.

Der so entstandene, vollständige Fahrzeugumlauf enthält demnach in aller Regel Leerfahrten, für die eine genaue Abfahrtszeit gefunden werden muss. Dies kann erneut mit Hilfe Genetischer Algorithmen erfolgen. Bei der Disposition von Leerfahrten gelten im Gegensatz zur Disposition der verkehrlich notwendigen Fahrten für jede Fahrt unterschiedliche Grenzen. Beide vorgeschlagenen Verfahren zur Erstellung betrieblich machbarer Fahrpläne basieren jedoch auf der Annahme, dass für alle Fahrten die selben Grenzen genutzt werden.

Praktisch spielt dies bei dem vorgeschlagenen Verfahren der direkten Kodierung der Abfahrtszeiten auf einem Gen (Verfahren I) nur selten eine Rolle, hier können für viele Chromosome trotz Verletzung der Randbedingungen gültige Fahrpläne erstellt werden. Deswegen wurde dieses Verfahren bei der Disposition von Leerfahrten verwendet. Tritt aufgrund einer speziellen Ausprägung eines Chromosoms einmal ein Fall auf, bei dem das Verfahren keine gültige Lösung erzeugen kann, so wird dieser speziellen Lösung ein sehr schlechter Funktionswert zugewiesen, so dass sie durch den Genetischen Algorithmus automatisch aussortiert wird.



## 6 Fallstudien zur S-Bahn Dresden

Das entwickelte Programm *GENflex-S* stellt den Rechenkern des geschaffenen Disponentenarbeitsplatzes ALFa (Angebotsoptimierung, Liniennetz, Fahrplanung automatisiert) dar (vgl. Abb. 6.1). Für ALFa ergeben sich in der im Projekt „intermobil Region Dresden“ verfolgten Aufgabenhierarchie (vgl. Systemschaubild „Die flexible S-Bahn“ in Abb. 6.2) zwei wesentliche Anwendungsfälle, die durch *GENflex-S* gelöst werden müssen:

- Der grundständige, automatische Entwurf eines Jahresfahrplans für die Anwendungen ALFa-J (Jahresplanung) und ALFa-S (Strategische Planung).
- Die geringfügige Modifikation bestehender Fahrpläne für die Anwendung ALFa-E (Ereignisorientierte Angebotsflexibilisierung).

Am Beispiel des Dresdner S-Bahn-Netzes sollen diese zwei wesentlichen Anwendungsfälle der Optimierung mit *GENflex-S* vorgestellt werden. Die mit ALFa entstandenen Fahrpläne können mit dem vom Autor maßgeblich entwickelten und am Ende dieses Kapitels vorgestellten Simulationssystem *SIMflex-S* wirklichkeitsnah erprobt werden.

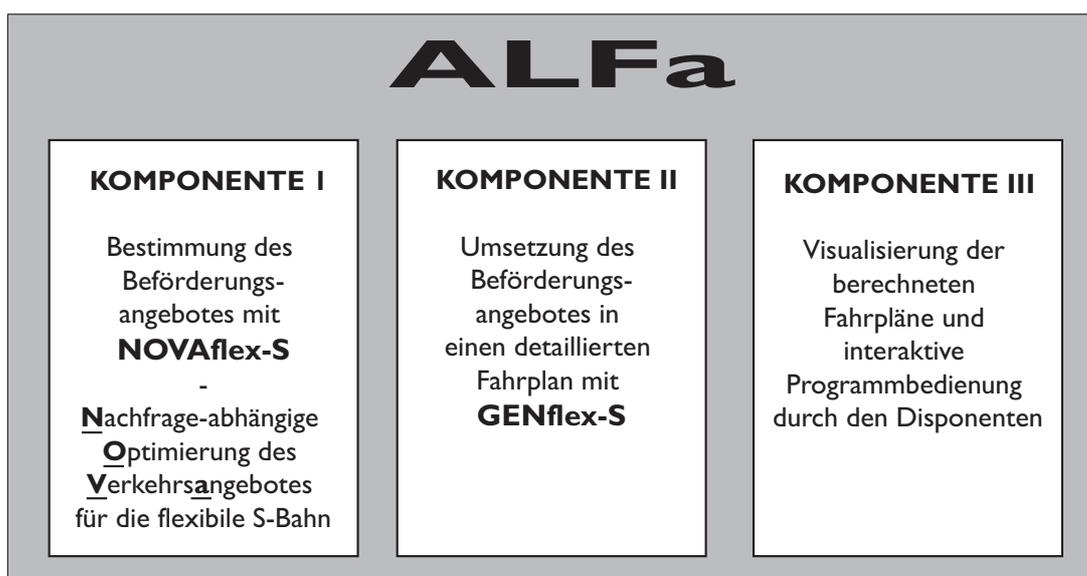


Abbildung 6.1: Modularer Aufbau des Programms ALFa

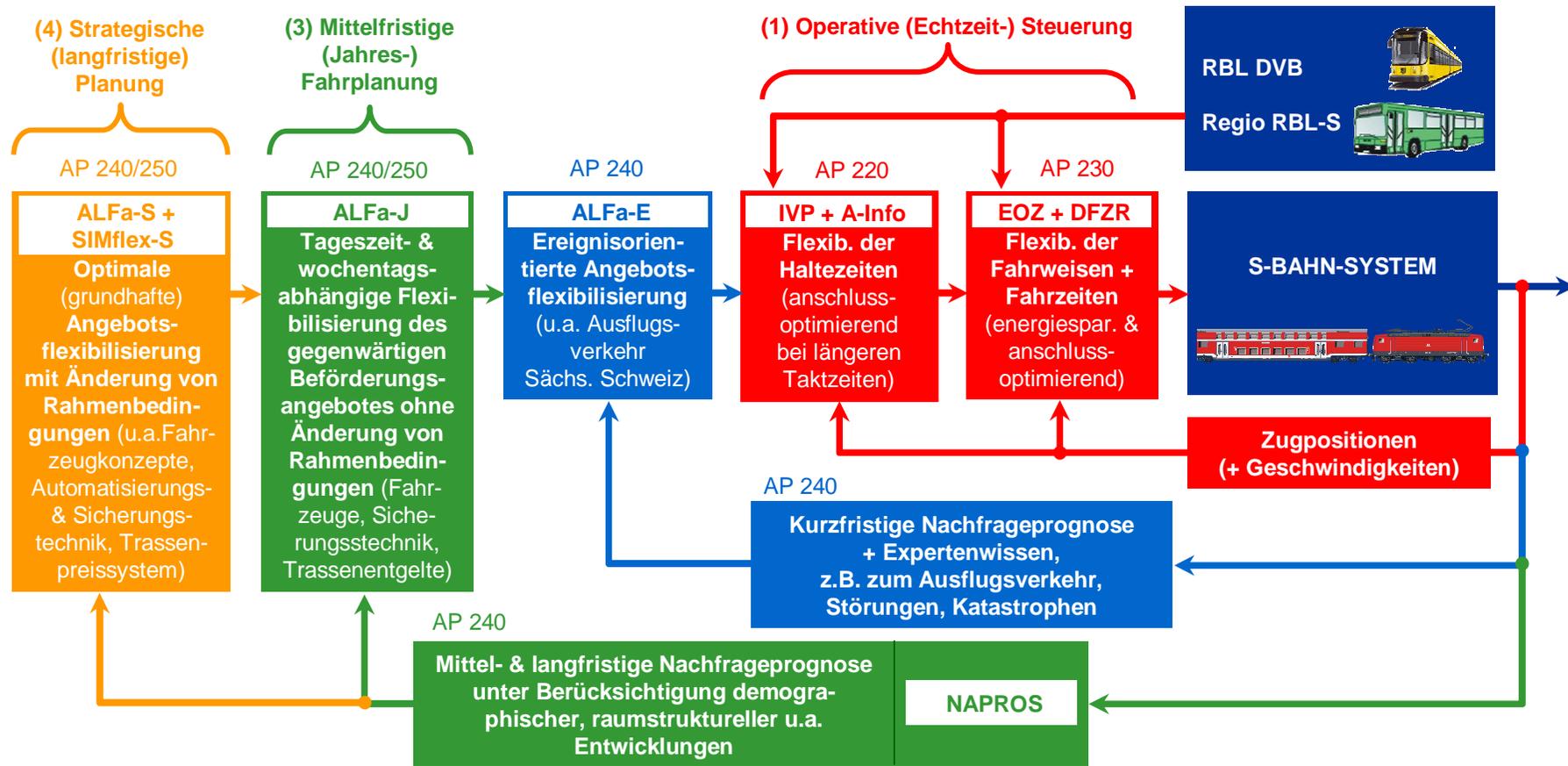


Abbildung 6.2: Systemkonzept „Die flexible S-Bahn“ (entworfen von H.STROBEL)

## **6.1 Grundständige Flexibilisierung eines Angebots: Erstellung eines flexiblen Betriebsregimes für das Szenario M2-PZB (Langzeitstrategie nach Abschluss des Infrastrukturausbaus und Realisierung eines Fahrzeugneubeschaffungsprogramms, ALFa-S)**

Das Szenario M2-PZB stellt das komplizierteste Liniennetz dar, das auf dem beim derzeitigen Ausbau entstehenden Netz der Dresdner S-Bahn realisiert werden könnte. Als Mindestzugfolgezeiten wurden fünf Minuten auf allen Abschnitten festgelegt, damit könnte das Verkehrsaufkommen mit einem Fahrzeug von etwa 300 Plätzen bei einer maximalen Besetzung von 70% realisiert werden [149].

Räumlich-flexibilisiert ist dieses Angebot durch den Einsatz folgender Linien (vgl. Abb. 5.1):

- S1-1 von Meißen-Triebischtal nach Schöna und zurück
- S1-2 von Meißen-Triebischtal nach Pirna und zurück
- S1-4 von Dresden-Neustadt nach Heidenau und zurück
- S2-1 von Dresden-Flughafen nach Heidenau und zurück

Für die Linien S1-1 und S1-2 wurde ein invariantes Mindestangebot in einem Halbstundentakt angenommen. Bei der Linie S1-1 wird dieses allerdings nur dann realisiert, wenn insgesamt nicht mehr als 2 Fahrten auf der Relation Meißen-Pirna angeboten werden.

Das Fahrtenangebot auf der S-Bahn enthält in diesem Szenario 282 Fahrten pro Tag, darunter 108 feste Fahrten als Teil des invarianten Mindestangebots (vgl. Abb. 5.13 auf Seite 72). Es werden also bei der Optimierung Abfahrtszeiten für 174 Fahrten gesucht. Dabei sind auf dem Abschnitt zwischen Pirna und Schöna die Fahrten des internationalen Fernverkehrs von Dresden nach Prag (6 Fahrten pro Tag und Richtung) zu beachten.

In der vereinfachten Bidfahrplandarstellung in Abb. 6.4 ist sehr gut zu erkennen, wie das Verkehrsangebot flexibel an die Nachfrage angepasst wird: Während in den Schwachverkehrszeiten ausschließlich das invariante Mindestangebot verkehrt, wird dieses bereits in den Nebenverkehrszeiten im Stadtzentrumsbereich verstärkt. Zu den Hauptverkehrszeiten verkehren zusätzlich Fahrzeuge in Doppeltraktion (dicke Linien). In der detaillierten Darstellung der Nachmittagsspitze in Abb. 6.5 wird der Kompromiss deutlich, der bei der Fahrplanoptimierung notwendig ist: einerseits wird versucht, zwischen Meißen und Dresden-Neustadt einen gleichmäßigen Takt anzubieten, andererseits eben auch zwischen Pirna und Schöna, obwohl auf dem ersten Abschnitt eine zusätzliche Linie verkehrt. Auf dem zentralen Abschnitt entsteht ein fast gleichmäßiger Takt mit nur geringen Abweichungen, die aufgrund der dort sehr dichten Zugfolge für den Fahrgast keine Rolle spielen.

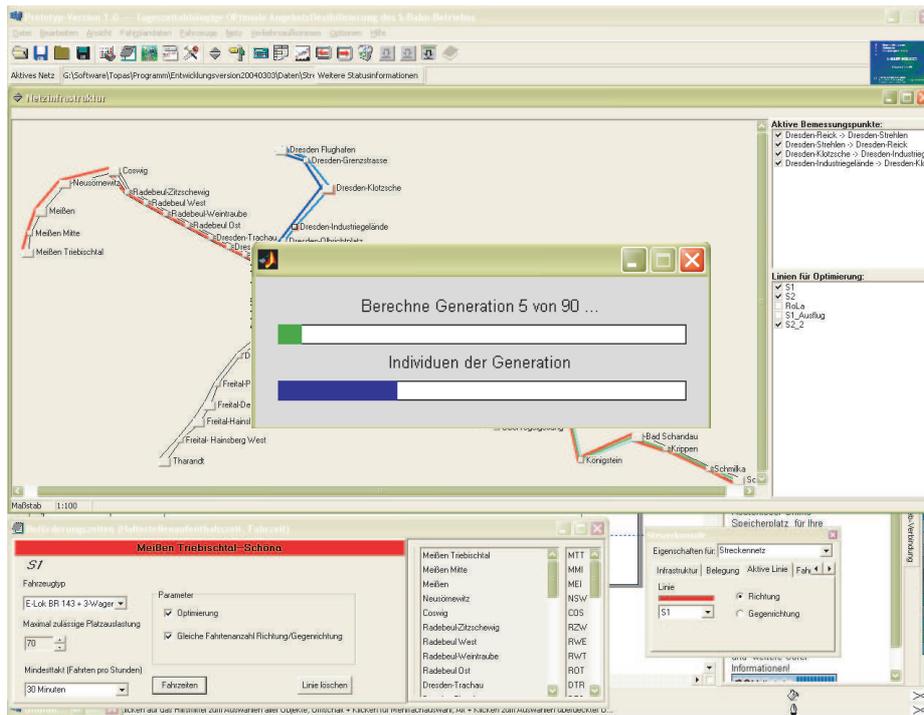


Abbildung 6.3: Ermittlung eines Fahrplans: Optimierung mit Genetischen Algorithmen (aus [9])

## 6.2 Parameteroptimierung für den Einsatz ALFa-J/S

Da es sich bei Genetischen Algorithmen um ein Suchverfahren unter Nutzung stochastischer Elemente handelt, kann ein Ergebnis niemals sicher erreicht werden. Ziel der Parameteroptimierung muss es sein, ein gewünschtes Ergebnis mit hoher Sicherheit in einer kurzen Rechenzeit zu erhalten.

Üblicherweise genutzte Parameter sind die Anzahl der Unterpopulationen, die Anzahl der Individuen in einer Unterpopulation, der Selektionsoperator sowie der Generationsabstand.

Wenn ein manuell erstellter Fahrplan oder eine bereits optimierte Lösung vorhanden ist, und diese nur in eine Unterpopulation eingestreut wird, dann muss durch geschickte Parameterwahl dafür Sorge getragen werden, dass diese Lösung ihre Parameter auch an viele andere Lösungen weitergeben kann. Dies spricht für den Einsatz der Elitismus-Strategie, d.h. die Verwendung eines Generationsabstandes von kleiner als 1.

In kleinen Populationen kann sich eine gute Lösung deutlich schlechter ausbreiten als in großen Populationen, was für die Verwendung letzterer spricht.

Bei den Selektionsoperatoren spricht für die Verwendung der „Truncation“-Selektion, dass die Ausgangslösung zunächst über mehrere Generationen sicher erhalten bleibe, mit den anderen Operatoren bestände zumindest theoretisch die Möglichkeit, dass diese schon früh im Entwicklungsprozess verloren gänge.

Für ein Beispielszenario, bei dem bei 5 Minuten Zugfolgezeit 161 Fahrten auf 5 Linien op-

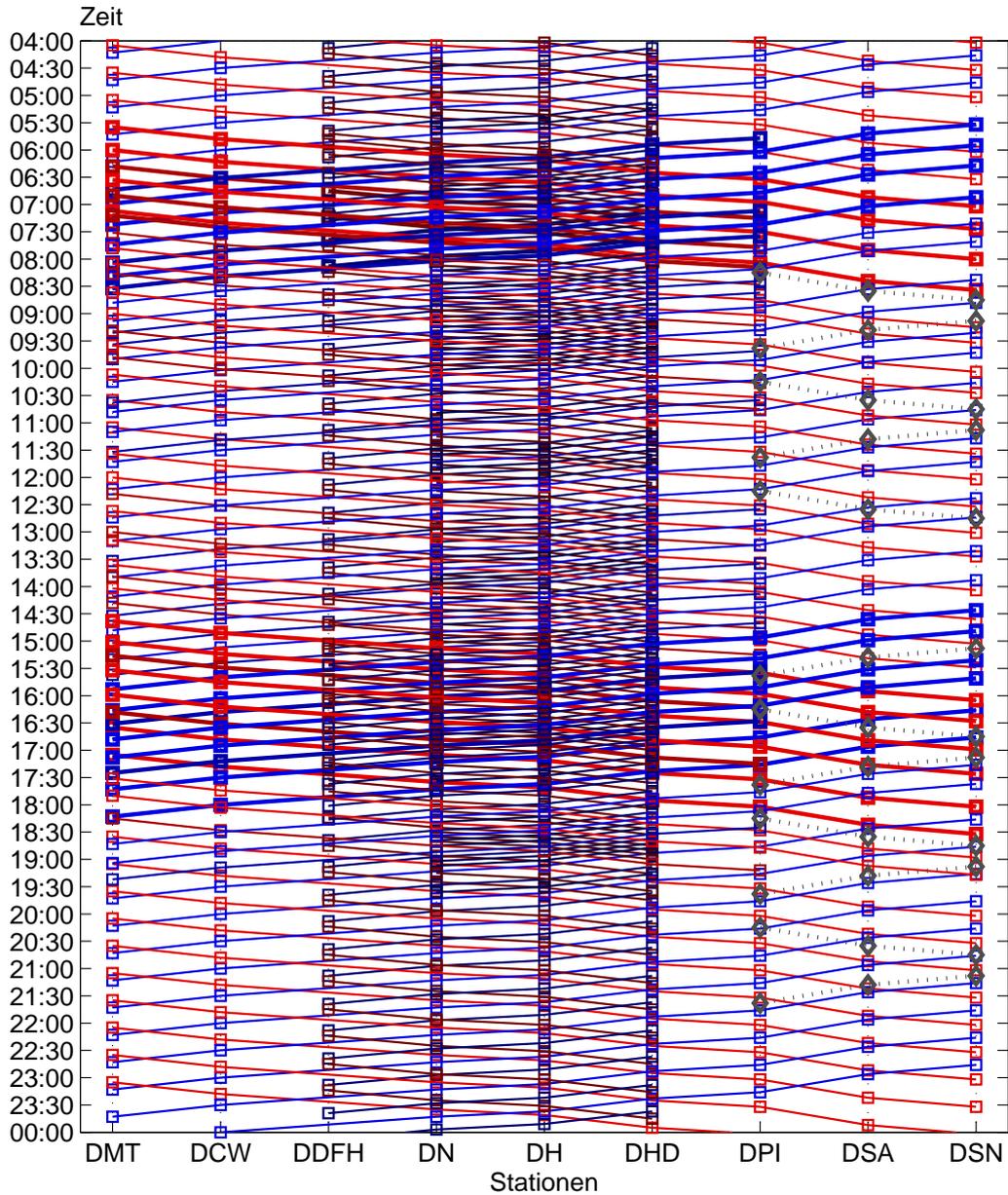


Abbildung 6.4: Vereinfachte Bildfahrplandarstellung aus GENflex-S : Haltebahnhöfe sind jeweils mit einem Quadrat markiert, die Dicke der Linien entspricht der Zahl Triebwagen auf dieser Fahrt, Fahrten des internationalen Fernverkehrs sind gepunktet dargestellt.

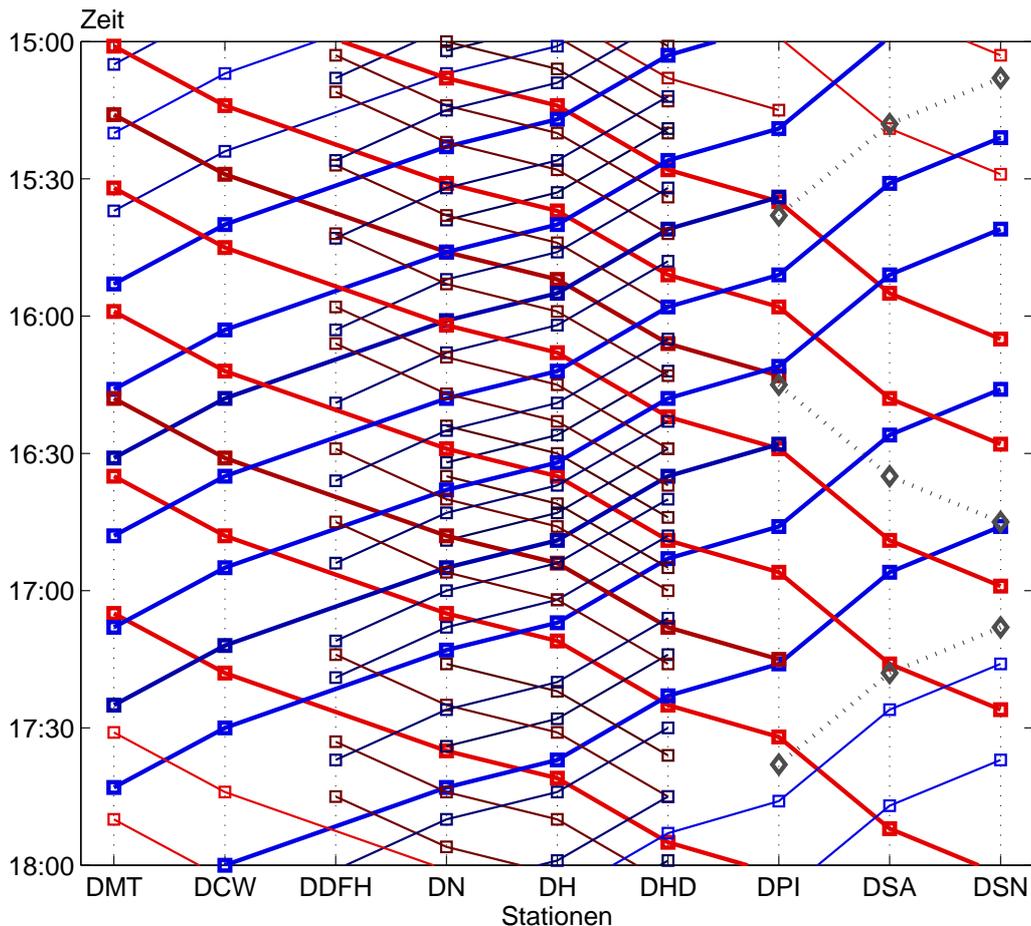


Abbildung 6.5: Detaillierte Darstellung der Nachmittagsspitze im M2-PZB-Szenario

timiert werden sollten, wurden Suchläufe über 200 und über 700 Generationen durchgeführt. Dabei wurde eine Gesamtzahl von 100 bis 400 Individuen untersucht, die in maximal 20 Unterpopulationen unterteilt wurden. Als Generationslücke wurden Werte zwischen 0,6 und 1,0 verwendet. Alle im Abschnitt 3.1.1 aufgeführten Selektionsoperatoren wurden ebenfalls getestet. Im folgenden sollen die wichtigsten Ergebnisse dieser Parameteruntersuchung zusammengefasst werden und mit dem bei der Vielzahl von untersuchten Szenarien niemals unterschrittenen Optimum von 23 Fahrzeugen bei einem Wert des Wartezeitindikators von  $1,131 \cdot 10^9 \text{ s}^2$  verglichen werden:

- Der minimale Wert für die Zahl der Fahrzeuge wird meist im Anfangsstadium der Optimierung erreicht ( $\leq 200$  Generationen). Wenn bis dahin diese Zahl noch nicht erreicht ist, so ist ihr Erreichen in noch späteren Generationen sehr unwahrscheinlich.
- Die Verwendung der Truncation-Selektion war hauptsächlich dann erfolgreich, wenn gleichzeitig eine niedrige Generationslücke eingestellt wurde, damit viele Individuen der Vorgängergeneration auch unter deren Nachfolgern noch zu finden waren.

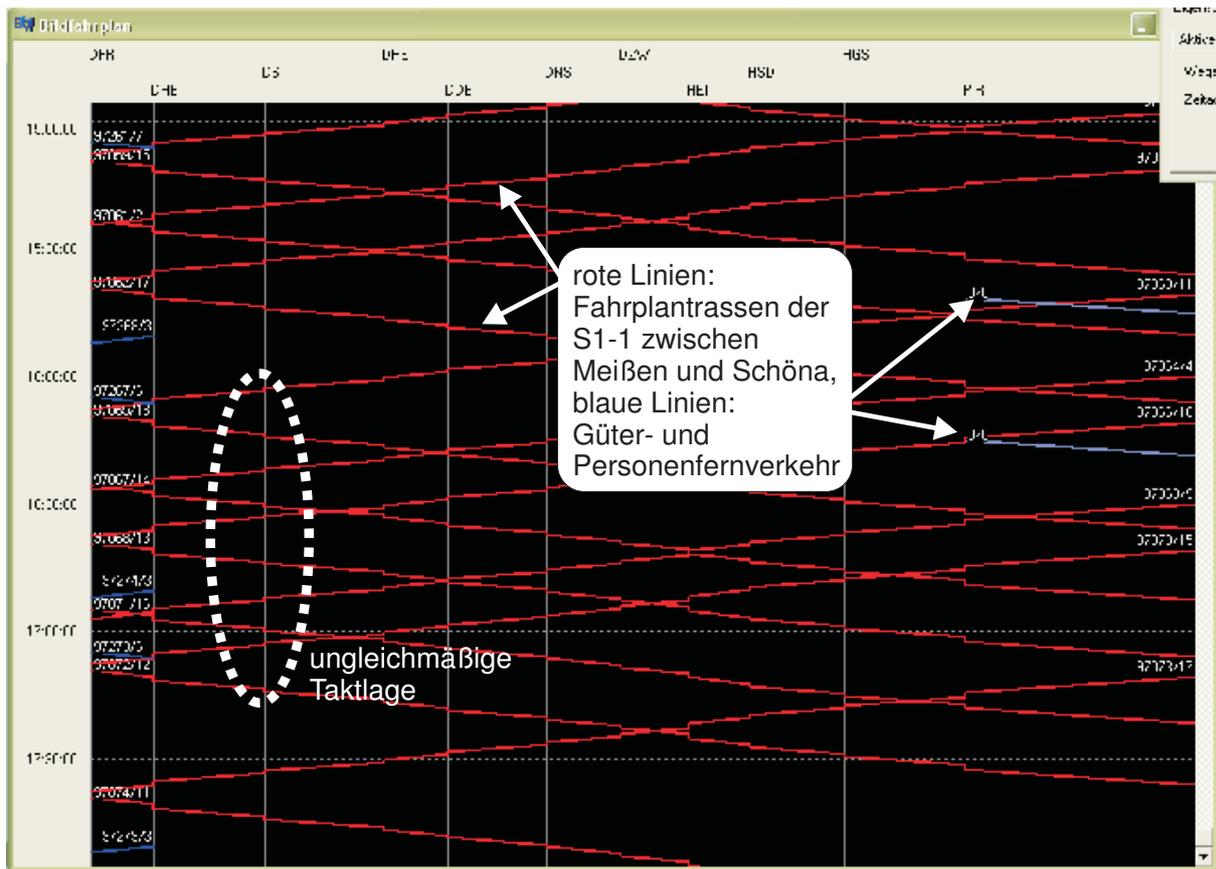


Abbildung 6.6: Optimierungsergebnis nach 10 Generationen: Die entstehende Zugfolge ist sehr ungleichmäßig (aus [9]).

- Auch bei den anderen Selektionsoperatoren trug eine Elitismus-Strategie zu größerem Erfolg (schnellerer Konvergenz) bei. Es wurden hier allerdings auch gute Ergebnisse mit der Turnierselektion und Generationslücke 1 erreicht.
- Eine große Generationslücke führt immer auch zu längeren Rechenzeiten, da für mehr Nachkommen die Gütefunktion ermittelt werden muss.
- Gute Resultate wurden erzielt mit Hilfe der „Universal Stochastic Sampling“-Selektion, 20 Individuen in je 10 Unterpopulationen und einer Generationslücke von 0,7. In vier von vier Versuchen wurde hier die 23-Züge-Marke deutlich vor der 200. Generation erreicht.
- Ähnlich gute Ergebnisse erreichte eine Kombination von Truncation-Selektion, einer Generationslücke von 0,6 und Verwendung einer einzigen Population von 200 Individuen (3/4 der Fälle konvergierten vor Erreichen der 200. Generation bei 23 Zügen).
- Die Optimierungsverläufe der erfolgreichen Durchläufe mit den letzten beiden Parameterkombinationen sind in Abbildung 6.8 dargestellt. Die Werte der Initiallösung<sup>1</sup> sind deutlich zu erkennen. Es ist bemerkenswert, dass es zufällig erzeugte Startlösungen gibt, die

<sup>1</sup>25 Fahrzeuge und Wartezeitindikator von  $1,161 \cdot 10^9 \text{ s}^2$

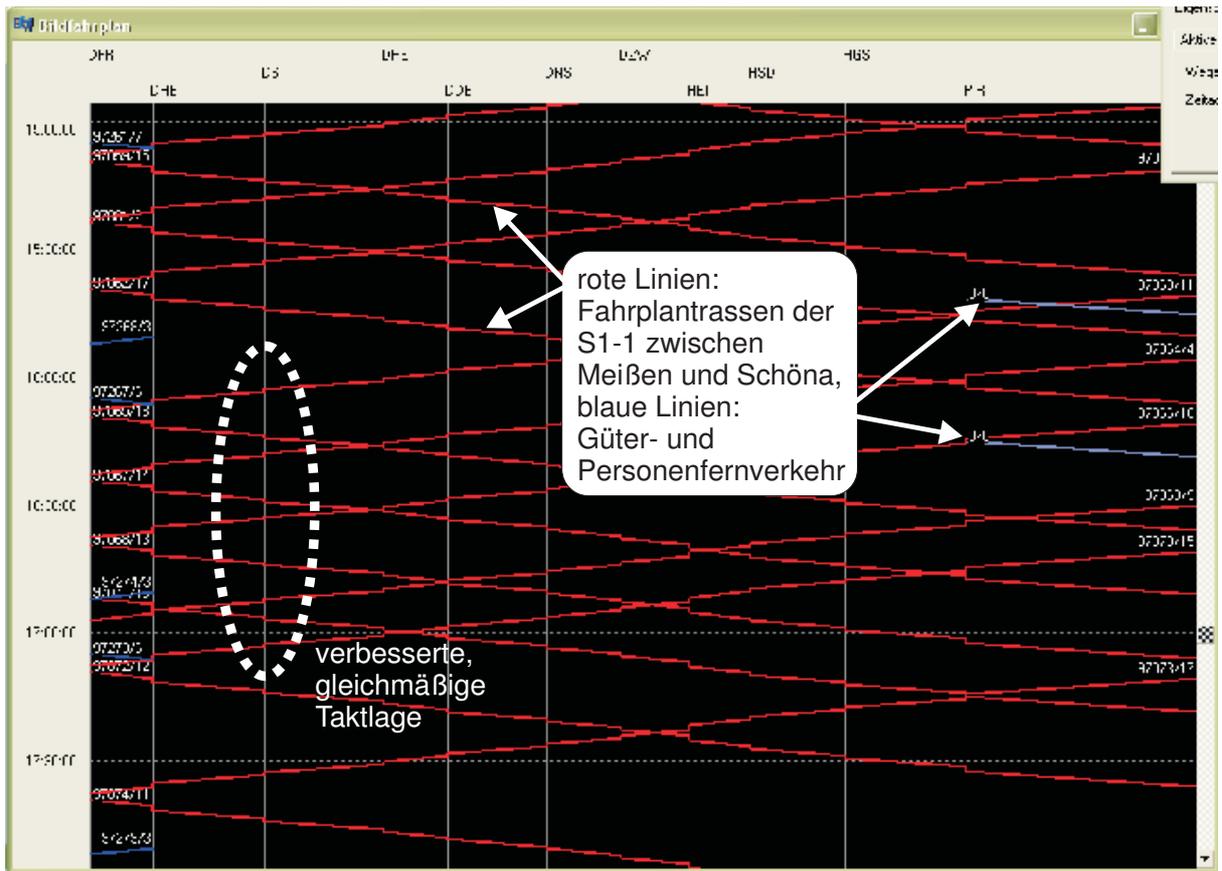


Abbildung 6.7: Optimierungsergebnis nach 50 Generationen: Die Zugfolge ist praktisch gleichmäßig (aus [9]).

direkt mit 23 Zügen auskommen. Die Wartezeit konvergiert zu zwei verschiedenen Werten. Während der höhere in der Größenordnung der Initiallösung liegt, liegt der niedrigere dicht an der besten überhaupt erzielten Lösung.

Das spätestmögliche Erreichen der 23-Züge-Marke liegt bei den vorliegenden Fällen der besten Konfigurationen bei 65 Generationen. Dies entspricht in etwa einer Rechenzeit von 30 Minuten auf einem Pentium IV Rechner mit 2,4 GHz Taktfrequenz. Ein kompletter Durchlauf der 200 Generationen dauerte etwa 90 Minuten.

Durch Nutzung eines kleineren Suchraums, z.B. Sechstel-Minuten (10-s-Basis) oder ganze Minuten, könnte der Suchraum reduziert und das Konvergenzverhalten des Algorithmus verbessert werden.

Die angegebenen Zeiten würden auf keinen Fall überschritten, wenn bei Anpassung von Teilen des Betriebsprogramms, z.B. durch geringfügige Modifikation der Fahrtenhäufigkeiten durch einen Experten, nur diese Teile neu optimiert würden (Anwendungen ALFa-E, ALFa-J).

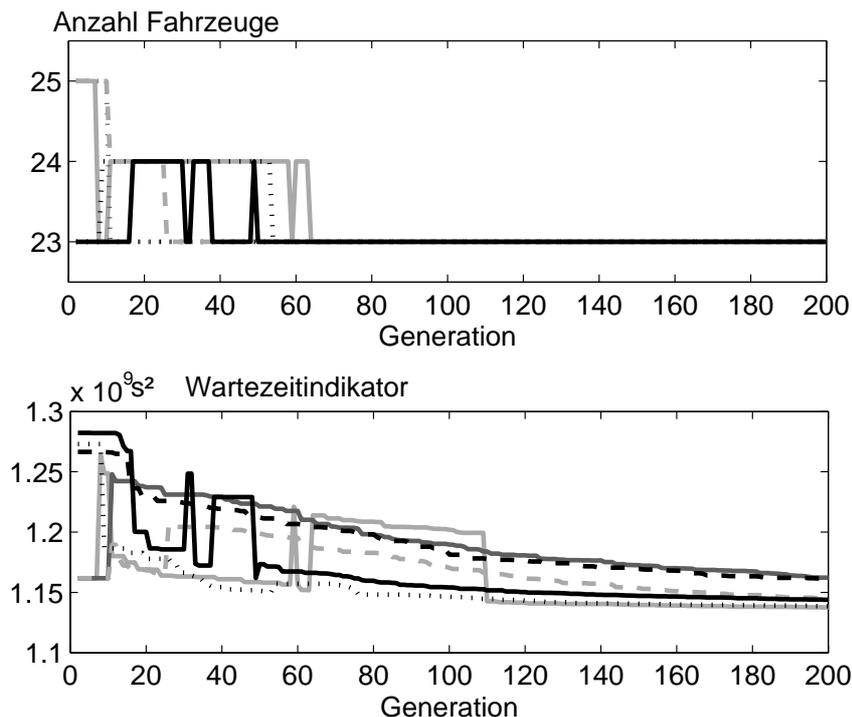


Abbildung 6.8: Optimierungverläufe für erfolgreiche Berechnungen

### 6.3 Angebotsflexibilisierung als operative Planung: Wochenendausflugsverkehr als Beispiel für kurzfristige Modifikationen vorhandener Betriebsregime (ALFa-E)

Diesem Fall wurde der heutige Betrieb zu Grunde gelegt mit jeweils halbstündigen Fahrten auf der S1-1 zwischen Meißen-Triebischtal und Schöna, die sämtlich Teil des invarianten Mindestangebots sind daher nicht in die Optimierung einbezogen werden.

Als Verstärkerlinie sollen Fahrten von Dresden-Hauptbahnhof in die Sächsische Schweiz betrachtet werden, mit denen bei Ausflugswecker das höhere Verkehrsaufkommen auf dieser Relation bewältigt werden kann. Diese Fahrten sollen am Vormittag in die Sächsische Schweiz fahren und am Nachmittag zurück nach Dresden. Die erforderlichen Abstellkapazitäten bietet der Bahnhof Bad Schandau. Mit einem solchen Regime ist es nicht sinnvoll, die Optimierung der Zahl der für das Betriebsprogramm benötigten Züge durchzuführen.

Das Gütekriterium besteht damit aus der Quadratsumme der Zugfolgezeiten auf dem Abschnitt zwischen Dresden-Hauptbahnhof und Bad Schandau. Auch hier müssen die schon in der vorigen Fallstudie verwendeten Fahrten des internationalen Fernverkehrs beachtet werden.

Zusätzlich zum Mindestangebot sollen in dieser Fallstudie jeweils eine Fahrt in der 9. und 10. Stunde ab Dresden-Hauptbahnhof und jeweils eine Fahrt zurück mit der Ankunft in der 17. und 18. Stunde in Dresden stattfinden.

Für jede dieser vier Fahrten gibt es innerhalb ihrer Stunde eine optimale Abfahrt, die genau zwischen zwei festen Fahrten liegt. Dieses triviale Problem fordert prinzipiell nicht unbedingt den Einsatz Genetischer Algorithmen, sollte aber ebenfalls dadurch lösbar sein. Der Suchraum enthält bei sekundengenauer Diskretisierung für jede Fahrt 3600 mögliche Lösungen (Abfahrtszeiten). Bei einer Populationsgröße von 60 Individuen ist zu erwarten, dass schon bei einer Initiallösung eine gute Lösung nicht weiter als 60 s von der optimalen Lösung entfernt liegt.

Diese Populationsgröße hat sich als geeignet für die vorliegende Optimierungsaufgabe erwiesen. Eine sehr gute Lösung wird schon nach 45 Generationen innerhalb weniger Sekunden gefunden. Die Abweichungen von der in diesem Fall bekannten optimalen Lösung lagen dabei häufig bei 0, allerdings immer unter 5 Sekunden (vgl. Abb. 6.10).

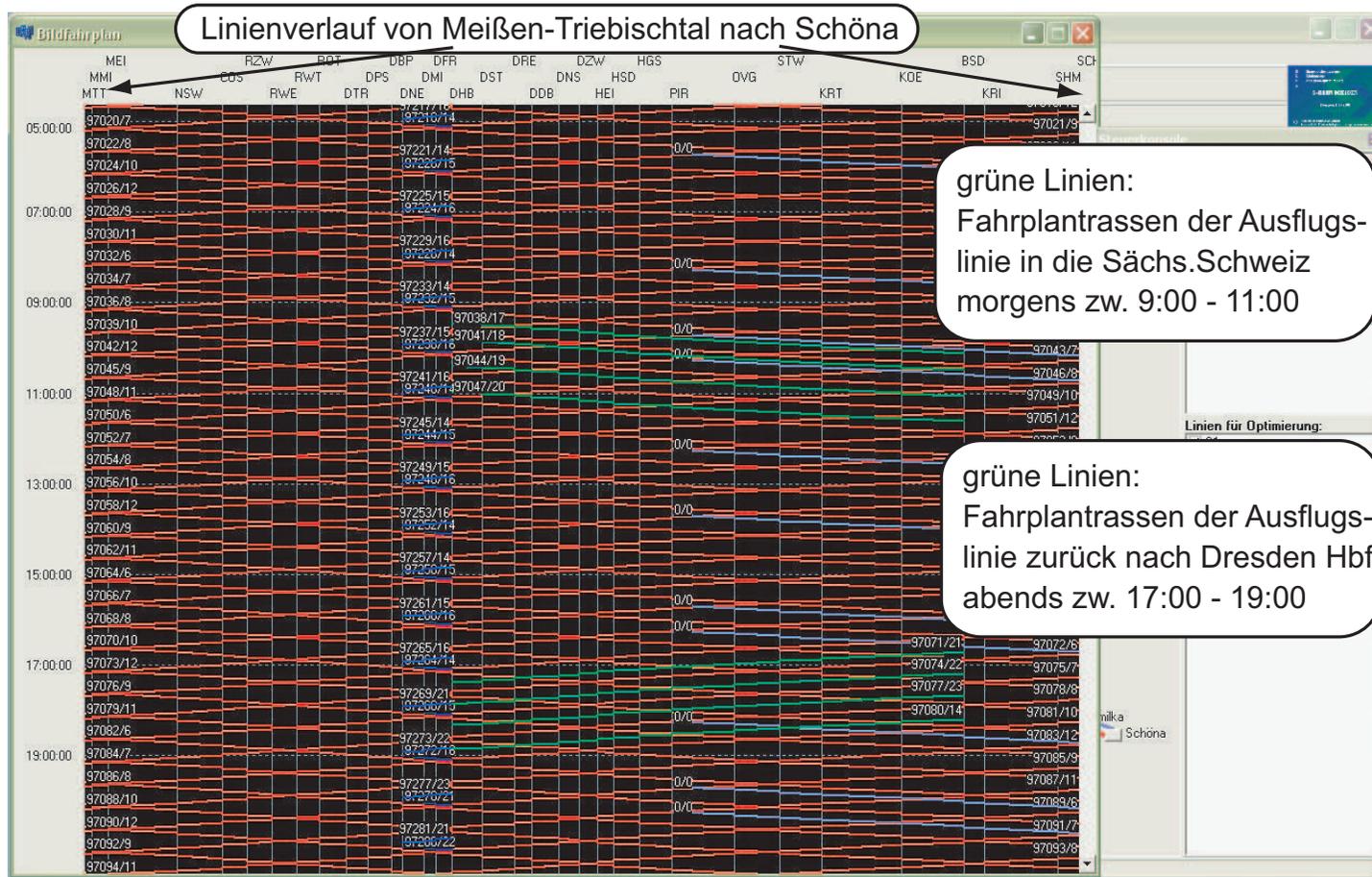


Abbildung 6.9: ALFa-E: Bildfahrplandarstellung des für den Ausflugsverkehr optimierten Fahrplans (aus [9])

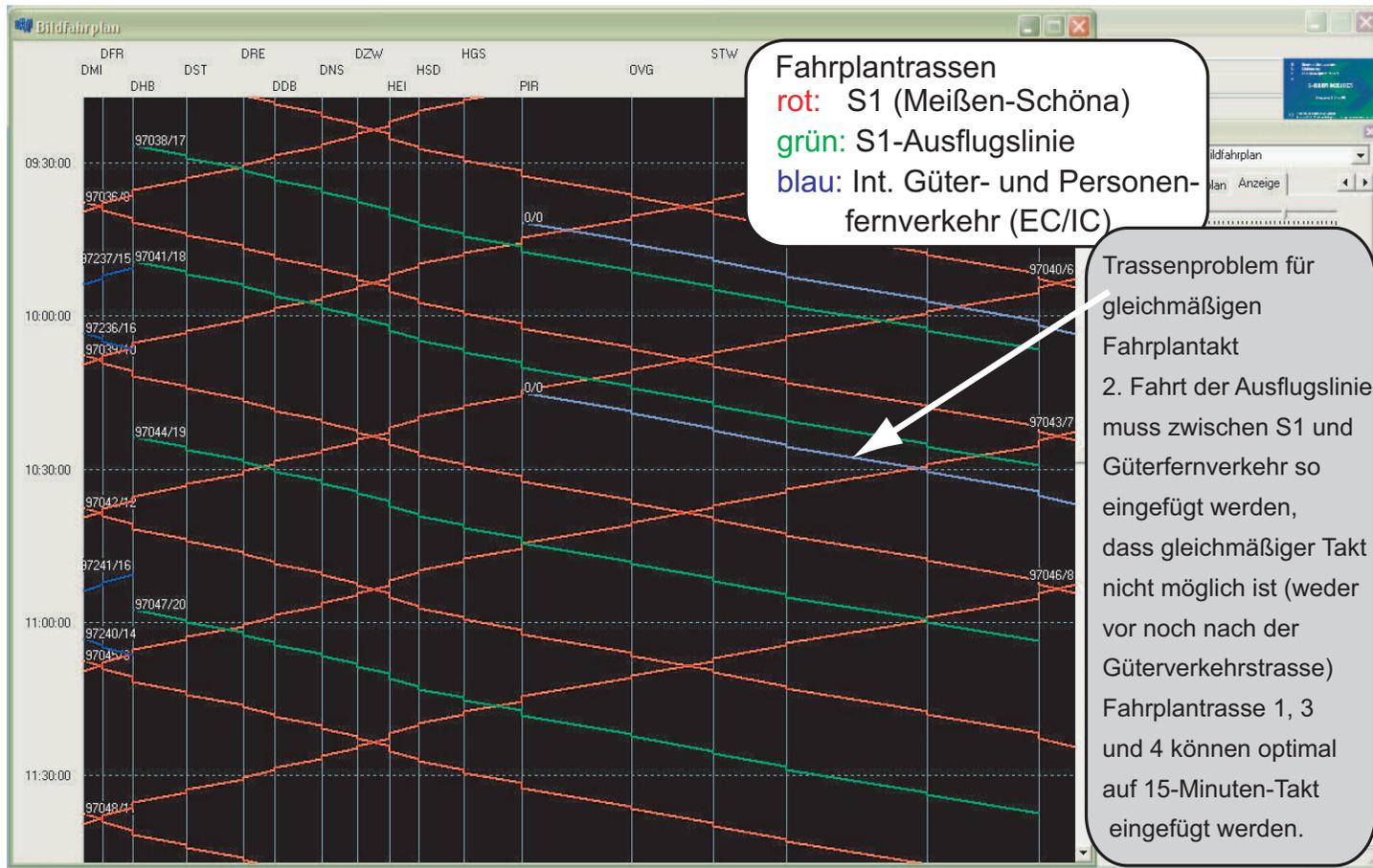


Abbildung 6.10: ALFa-E: Bildfahrplandarstellung des für den Ausflugsverkehr optimierten Fahrplans: Problem bei der Disposition der Ausflugsfahrt aufgrund von Konflikten mit dem Güterfernverkehr (aus [9])

## 6.4 Das Simulationswerkzeug *SIMflex-S* [8]

Zur Überprüfung und Demonstration der verkehrlichen und betrieblichen Machbarkeit der mit Hilfe von *GENflex-S* erstellten Fahrpläne müssen Simulationen durchgeführt werden, mit denen die Wirkungen einer nachfrageabhängigen, tageszeitlichen Flexibilisierung des Beförderungsangebots analysiert werden können.

Um dabei Entscheidungsträgern eine gute Beurteilung der neuartigen Betriebsregime zu ermöglichen, wurde besonderer Wert auf eine praxisnahe Darstellung gelegt.

Obwohl dem Thema der Simulation des Eisenbahnverkehrs sowohl von Seiten der Forschung als auch der Industrie seit Jahren intensive Aufmerksamkeit zugewandt wird (siehe u.a. [24, 45, 62, 76] als Übersichtsliteratur), sind Simulationen, die auch verkehrliche Wirkungen des Betriebs berücksichtigen nur sehr selten zu finden: nur in den komplexen kommerziellen Werkzeugen FALKO [156] und RAILSIM [168] wird diese Möglichkeit beschrieben, im Bereich der Einzelentwicklungen seien das AGT-Systemmodell [48], eine Studie von GUIEYSSE [71], ein Ansatz von PAOLUCCI und PESENTI [131] sowie ein Modell der Londoner U-Bahn [186] sowie eine Simulation mit Hilfe von Petri-Netzen [29] erwähnt.

Da neben der Problematik der Fahrgastsimulation auch die im Rahmen von „intermobil“ entwickelten neuartigen Methoden zur energiesparenden und anschlussoptimierenden Zugsteuerung [7, 123, 125] simuliert werden sollten, wurde der Simulator *SIMflex-S* geschaffen, der hier kurz vorgestellt werden soll.

Der Schwerpunkt dieses Simulationsprogramms liegt auf der Fahrgastsimulation, mit der die Bewegungen jedes einzelnen Fahrgastes im Schnellbahn-Netz und den anschließenden Verkehrsmitteln nachgebildet werden können. Daraus lassen sich Informationen über die verkehrliche Wirksamkeit und die Attraktivität eines Fahrplans ableiten, die sich anhand verschiedener messbarer Größen ausdrücken lassen (Besetzungsgrad der Züge, Anzahl wartender Fahrgäste am Bahnsteig, Wartezeiten der Fahrgäste, usw.).

Die Umsetzung der stundenfein vorliegenden Verkehrsstrommatrizen in konkrete Ankunftszeiten der Fahrgäste erfolgt mit Methoden der Monte-Carlo-Simulation [136]. Für jede Betriebsstunde werden in Abhängigkeit des Fahrplans die Ankunftszeiten jedes einzelnen Fahrgasts an seiner Einstiegshaltestelle per Zufallsversuch ermittelt. Bei kurzen Taktzeiten im flexiblen Betrieb und der deshalb von den Fahrgästen nicht benötigten Fahrplankenntnis wird dabei von einer rein zufälligen Verteilung der Fahrgastankünfte ausgegangen.

Die Anzahl der ein- und aussteigenden Fahrgäste an einem Haltepunkt wirkt auf die Länge der Haltestellenaufenthaltszeit eines Zuges. Diese wird nach gängigen Formeln der Betriebstechnologie während der Simulation ermittelt [141]. Je nach gewähltem Abfertigungsmodell kann die für den Fahrgastwechsel eingeplante und tatsächlich nicht genutzte Reserve am Bahnsteig abgewartet oder vom Zug auf den nächsten Streckenabschnitten als zusätzliche Fahrzeitreserve zum Energiesparen genutzt werden.

Zur Simulation von Fahrgästen, die auf dem Weg zu ihrem Ziel mehrere Linien benutzen müssen, sind weitere Modelle notwendig: Die Dauer von Umsteigevorgängen an Haltepunkten

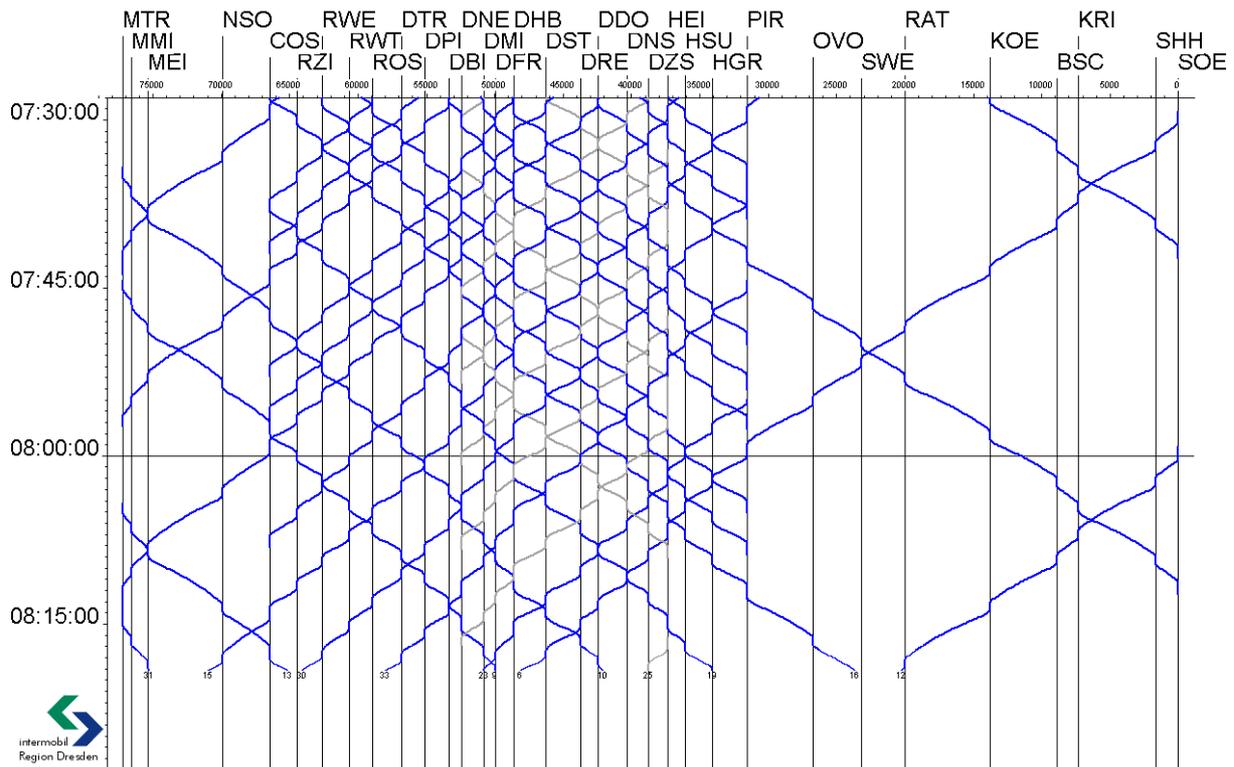


Abbildung 6.11: Darstellung als Bildfahrplan: Gut erkennbar ist der Übergang vom dichten 3'45"-Takt in einen 6' Takt auf dem zentralen Linienabschnitt (räumliche Flexibilisierung) am Ende der Hauptverkehrszeit (zeitliche Flexibilisierung).

wird anhand der für jeden Umsteigepunkt vorgegebenen Wahrscheinlichkeitsverteilungen mittels Zufallsversuch ermittelt.

Durch die Durchführung vieler Simulationen eines Fahrplans mit unterschiedlichen Ankunfts-szenarien der Fahrgäste kann eine Aussage zu dessen Stabilität bezüglich des zu bewältigenden Fahrgastaufkommens getroffen werden. Von besonderem Interesse sind dabei Übergangsvorgänge von Zeiten hohen Verkehrsaufkommens mit geringen Zugfolgezeiten zu Nebenverkehrszeiten mit größeren Abständen zwischen den Zügen.

Im speziellen Fall der S-Bahn Dresden stellt die Inhomogenität des Netzes einen weiteren wichtigen Untersuchungsgegenstand dar. Im Gegensatz zum stark verdichteten Ballungsraum zwischen Meißen, Dresden und Pirna hat der Streckenabschnitt von Pirna nach Schöna mit der Erschließung des Nationalparks Sächsische Schweiz eine fast ausschließlich touristische Funktion. Da durch den auf diesem Abschnitt vorhandenen Mischbetrieb mit dem Personen- und Güterfernverkehr außerdem nur wenige Fahrplantrassen für S-Bahn-Züge verfügbar sind, muss geprüft werden, ob und mit welchem Fahrzeug das stark schwankende Aufkommen an Fahrgästen in diesem Bereich verkehrlich bewältigt werden kann.

Um den Betrieb möglichst realitätsnah erproben zu können, wurde die Zugsteuerung gemäß den in [123–125] beschriebenen Prinzipien implementiert. Dazu wurden auch die Verfahren der Ermittlung energieoptimaler Fahrpläne durch Lösung von DGL-Systemen verwendet,

die in Teil III dieser Arbeit beschrieben sind. Die Ausrüstung der Strecke mit Sicherungstechnik kann hierfür in verschiedenen Detaillierungsstufen simuliert werden.

In der Systemvisualisierung wurden folgende Komponenten implementiert:

- Kennlinien und Diagramme:

Der Bildfahrplan (Weg-Zeit-Diagramm, Abbildung 6.11) zeigt die Umläufe und die aktuelle Lage und Reihenfolge der Züge auf den Strecken. Fahrgastseitig ist eine Darstellung der Zahl der wartenden Fahrgäste an den Bahnsteigen realisiert.

- Verkehrswirkungsgrad und Kostenmodelle:

Während der Simulation werden on-line wichtige Kenngrößen des Betriebes berechnet (Verkehrsleistung, Betriebsleistung, zurückgelegte Fahrzeugkilometer). Aus diesen Größen lassen sich tageszeitabhängig die bis dahin benötigten Betriebskosten, aus der Analyse der Fahrgastströme die Fahrgeldeinnahmen ermitteln und darstellen. Die Effizienz des Verkehrsmiteinsatzes wird mit Hilfe des Verkehrswirkungsgrades dargestellt.

- 2-D Darstellung: Diese bildet den Verkehrsraum (Schienennetz, Siedlungsstruktur usw.) und die wichtigsten Informationen über die Infrastruktur (Gleise, Bahnhöfe, Ortsgrenzen etc.) in Kartenform ab. Dazu werden die durch das Simulationsmodul aktuell berechneten dynamischen Daten dargestellt, u.a. Position, momentane Geschwindigkeit und Besetzungsgrad der Züge sowie die Zahl der wartenden Fahrgäste (richtungsbezogen) an den Haltepunkten. Durch Ein- und Ausblenden verschiedener Ebenen kann der Detaillierungsgrad der Darstellung beeinflusst werden.

In einer Ansicht ist es möglich, mehrere Fahrpläne parallel darzustellen, z.B. um die Auswirkungen eines unterschiedlichen Fahrzeugkonzepts sichtbar zu machen.

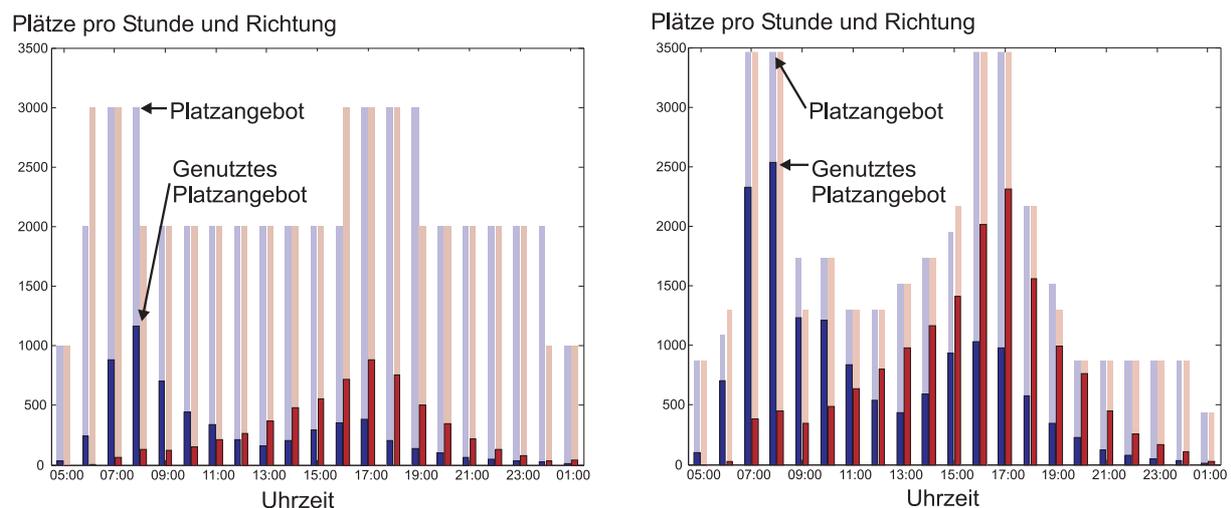


Abbildung 6.12: Platzangebot und besetzte Plätze im traditionellen Betrieb (links, Status quo) und im flexiblen Betrieb (rechts, M3-ETCS), blau dargestellt ist die stadtwärtige, rot dargestellt die landwärtige Richtung.



Abbildung 6.13: Anwendung von SIMflex-S in der intermodalen Leitzentrale am Lehrstuhl Verkehrsleitsysteme und -prozessautomatisierung der TU Dresden

Das Programm SIMflex-S verfügt neben den schon erläuterten on-line Anzeigemöglichkeiten über umfangreiche Auswertemöglichkeiten der Simulationsdaten, die sich naturgemäß am Ziel der Demonstration der verkehrlichen und wirtschaftlichen Machbarkeit des flexiblen Betriebes orientieren.

Dabei spielt besonders das Verhältnis von Verkehrsnachfrage zu Verkehrsangebot im Sinne des Verkehrswirkungsgrades eine Rolle, wie es für einen Abschnitt der S-Bahn Dresden in Abb. 6.12 dargestellt ist.

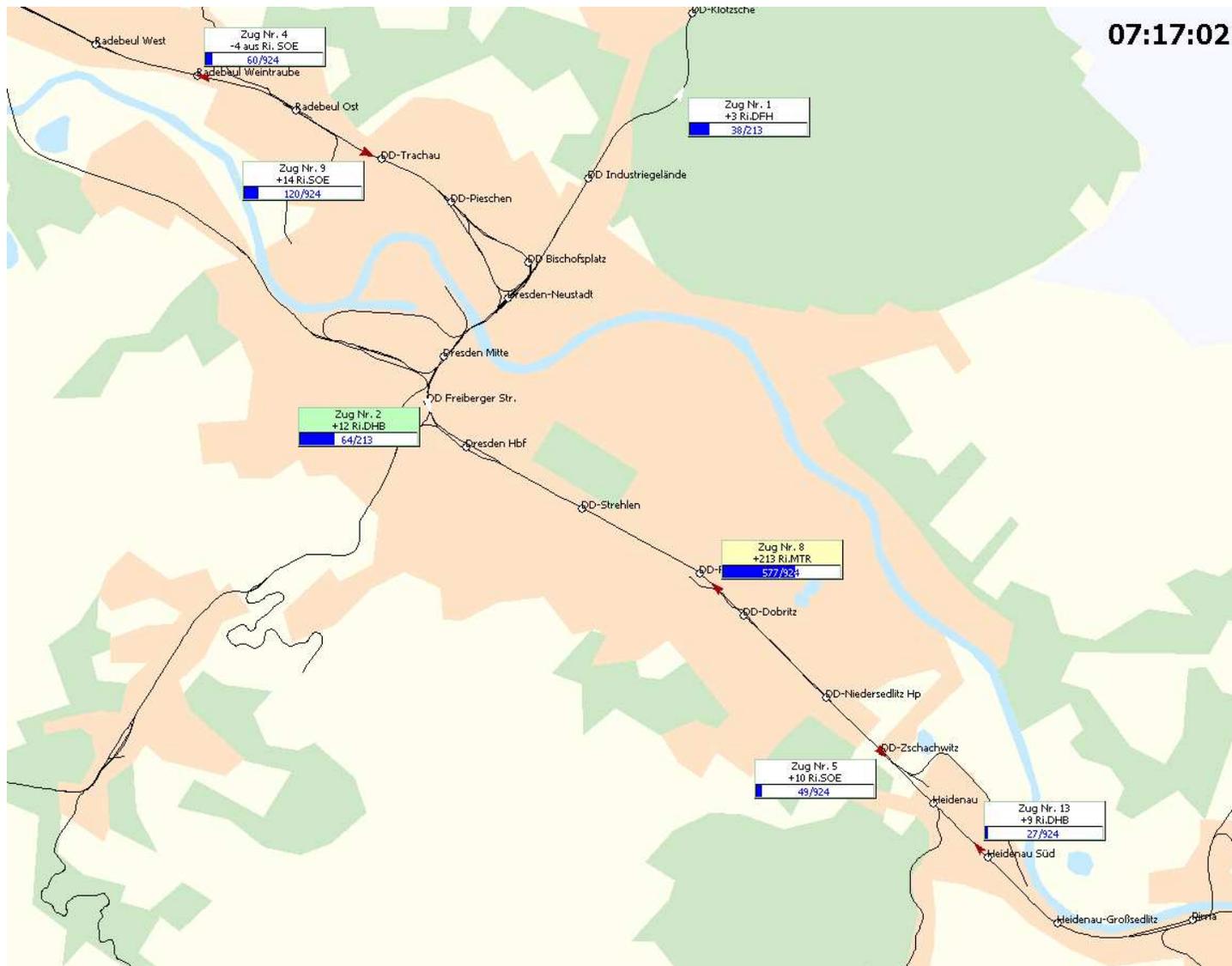


Abbildung 6.14: Traditioneller Betrieb (Status quo): Ganztägiger 30 min-Takt auf der Elbtallinie (Fahrzeuge mit 924 Plätzen) und Flughafenlinie (213 Plätze). Die Züge der S1 sind als rote Dreiecke, die Züge der S2 als weiße Dreiecke dargestellt. Die Farbe des Textfeldes ist ein Indikator für die Auslastung des Zuges: weiß: bis 25%, grün bis 50%, gelb bis 75%.

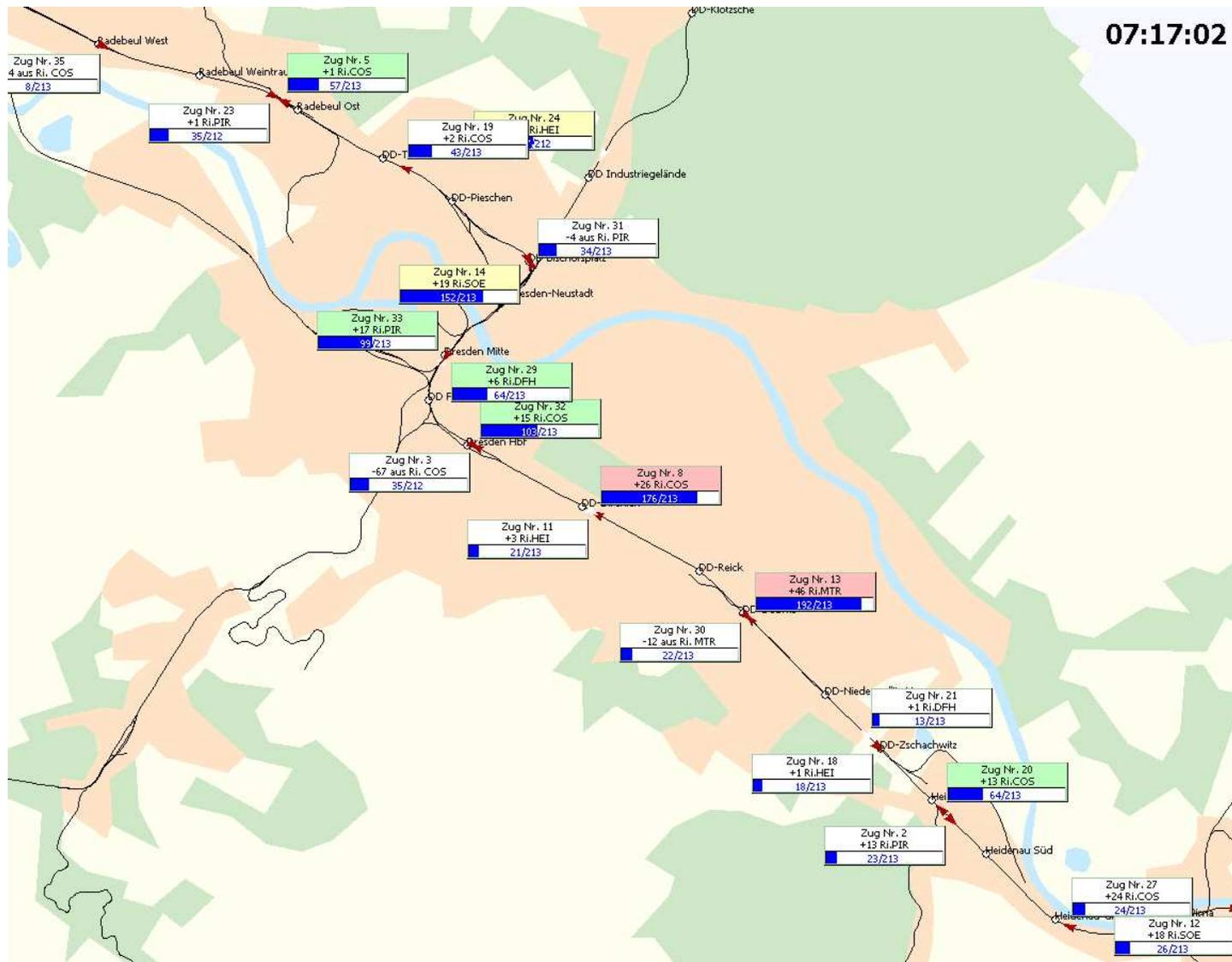


Abbildung 6.15: Flexibler Betrieb (Szenario M3-ETCS): 3,75 min-Takt, Fahrzeuge mit optimal angepasster Platzkapazität (213 Plätze). Züge mit rot gefärbtem Textfeld haben eine Auslastung von mehr als 75%. Gut zu erkennen ist auch die starke Asymmetrie der Verkehrsströme in stadt- und landwärtiger Richtung während der Morgenspitze.

## **Teil III**

# **Neue Ansätze zur störungs- und energiekostenminimierenden Flexibilisierung von Anfahr- und Bremsvorgängen in einem System von Stadtschnellbahnzügen**



# 7 Gütekriterien und Modellierung des elektrischen Stadtschnellbahnbetriebs

Die Minimierung von Energiekosten bei elektrischen Stadtschnellbahnen erfordert die Anwendung von Methoden der Simulation des Gesamtsystems „Elektrische Bahn“ [21]. Deswegen werden in diesem Kapitel die Modellierung der Zugbewegung, der elektrischen Komponenten der Fahrzeuge sowie der Anlagen der Bahnenergieversorgung vorgestellt, mit deren Hilfe anhand eines Fahrplans die die Energiekosten bestimmenden Größen ermittelt werden können (vgl. Abb. 7.1).

## 7.1 Verfahren zur Preisbildung für elektrische Energie im Stadtschnellbahnbetrieb: Ableitung der Gütekriterien

Energiekosten bei Stadtschnellbahnen setzen sich im wesentlichen aus drei Anteilen zusammen (nach [173]):

1. Festanteil, der verbrauchsunabhängig ist und deshalb durch Zugsteuerung nicht beeinflusst werden kann,
2. Arbeitsanteil, der die tatsächlich in einer Zeitdauer angeforderte Leistung im Sinne des Energieverbrauchs abbildet, die Energie wird dabei in kWh erfasst und abgerechnet,
3. Leistungsanteil, mit denen sich der Energieversorger die Erzeugungs-, Übertragungs- und Verteilungskapazität vergüten lässt, die für die Bereitstellung der Leistung notwendig ist. Die in kW gemessenen Leistungen werden anhand komplexer Formeln in eine Maximalleistung umgerechnet.

Bei einer Umfrage der UITP zum Thema Energieverbrauch bei U-Bahnen [3] stellte sich heraus, dass 17% der befragten Unternehmen einen Festanteil in ihren Kosten haben, 83% der Unternehmen einen Leistungsanteil und 97% einen Arbeitsanteil. Der Festanteil stellt dabei im Durchschnitt mit nur 6% den geringsten Anteil an den gesamten Energiekosten, 21% der Gesamtkosten werden durch den Leistungsanteil bestimmt und die verbleibenden 73% durch den Arbeitsanteil. Starke Abweichungen von diesen Durchschnittswerten bei den einzelnen Unternehmen sind möglich, nach [173] bestimmt in den USA der Leistungsanteil die Energiekosten zu etwa 50%.

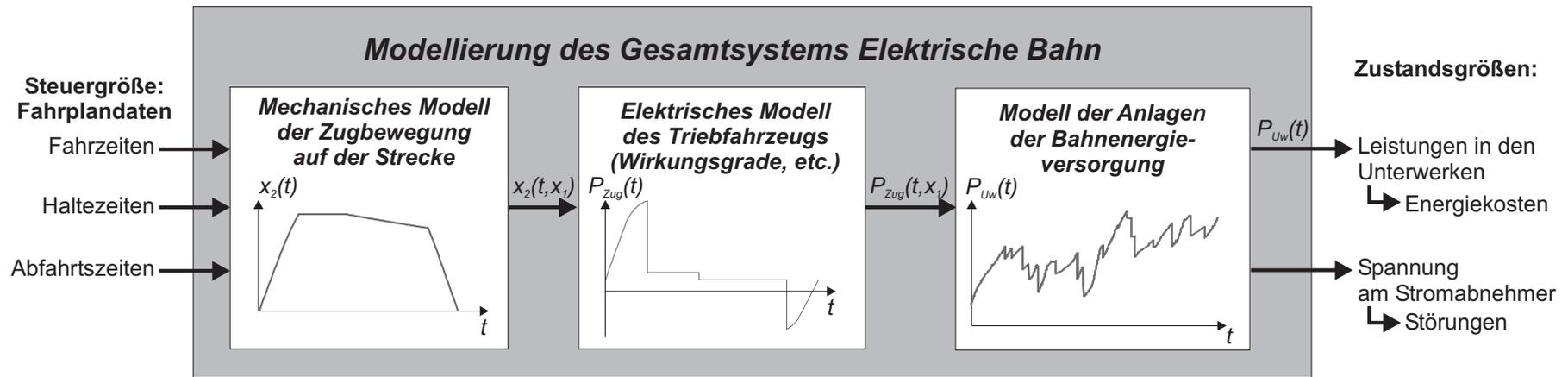


Abbildung 7.1: Modellierungsschritte zur Ermittlung der Energiekosten bei Elektrischen Bahnen

Während die Ermittlung der verbrauchten Energie als Grundlage des Arbeitskosten einfach ist, kann die konkrete Ermittlung der Leistungskosten je nach Unternehmen unterschiedlich komplex sein. Nach UHER [173] werden die Leistungskosten in fünf Stufen ermittelt:

- Messung der Leistung über eine gegebene Dauer, die zwischen 10 Minuten und einer Stunde betragen kann. In diesem Intervall wird im allgemeinen der quadratische Mittelwert (die Effektivleistung) bestimmt.
- Zusammenführung der Werte der verschiedenen Messgeber: Die Maximalwertbildung wird dabei als zufällig bezeichnet, wenn die maximale Summe gleichzeitig auftretender Leistungen erfasst wird, und als nicht-zufällig, wenn die Summe der Maxima der einzelnen Messgeber in Betracht gezogen wird.
- Ermittlung der monatlichen Leistung als monatliches Maximum der durch die Zusammenführung ermittelten Maximalwerte.
- Ermittlung einer Untergrenze, die als Mindestleistung in die Berechnung einfließt. Für die Ermittlung der Untergrenze können z.B. die Maximalwerte der vergangenen Monate genutzt werden.
- Ermittlung der Abrechnungsleistung als Maximum aus gemessenem Wert und Untergrenze.

Die detaillierte Betrachtung der Energiekostenstruktur für verschiedene US-amerikanische Bahnen in [173] zeigt auf, dass es zu jedem dieser Schritte eine große Zahl an verschiedenen Varianten gibt.

In dieser Arbeit sollen hauptsächlich zwei Gütekriterien untersucht werden:

- Systemenergieverbrauch, d.h. die Summe der in den einzelnen Unterwerken bezogenen Energie über einem gegebenen Zeitraum,
- Effektivleistung, hierbei werden die Unterwerke entweder völlig separat betrachtet oder die nicht-zufällige Zusammenführung der Messwerte genutzt.

Anhand dieser Kriterien lassen sich quantitative Aussagen zur Effizienz der vorgeschlagenen Optimierungsverfahren treffen. Die Ermittlung konkreter Auswirkungen auf die Energiekosten sind abhängig von den einzelnen Verträgen mit den Energieversorgungsunternehmen und können und sollen damit nicht Bestandteil dieser Arbeit sein.

Um diese Gütekriterien ermitteln zu können, müssen zunächst sowohl die Fahrt der Züge als auch die Anlagen der elektrischen Bahnenergieversorgung modelliert werden (vgl. Abb. 7.1). Die Beschreibung der verwendeten Modelle ist Gegenstand der weiteren Abschnitte dieses Kapitels.

## 7.2 Modellierung der Fahrt eines Zuges auf einem Streckenabschnitt zwischen zwei Halten [4, 128]

Die Modellierung des Systems Elektrische Bahn fordert die Kenntnis der von den Triebfahrzeugen angeforderten bzw. zurückgegebenen elektrischen Leistung. Diese ist vor allem von der zur Bewegung des Fahrzeugs notwendigen mechanischen Leistung abhängig, aber ebenfalls von den Energiewandlungsprozessen sowie weiteren Energieverbrauchern an Bord.

Die Modellierung der Fahrzeuge kann mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad vorgenommen werden. In dieser Arbeit soll das von HORN [85, 86] entwickelte und vom Autor ergänzte Zugmodell [4] verwendet werden, das für den Einsatz in einem Regler zur energieoptimalen Zugsteuerung entwickelt wurde [7, 124–126].

Für eine Anwendung im Rahmen eines Systems zur Koordination mehrerer Züge mit Betrachtungspunkt Unterwerk ist prinzipiell jedes Verfahren geeignet, mit dem für einen Abschnitt mit gegebenem Strecken- und Höchstgeschwindigkeitsprofil eine Trajektorie ermittelt werden kann, auf der der Zielhalt zu einer vorgegebenen Zeit erreicht wird. Sinnvoll ist die Nutzung der energieoptimalen Trajektorie, erlaubt die Zugsteuerung eine solche nicht, kann trotzdem mit dem vorhandenen Vorrat an Trajektorien gearbeitet werden.

Nachdem einführend das hier verwendete Zugmodell erläutert wird, soll kurz auf die Beschreibung der Bewegung eines Zuges während einer Fahrt zwischen zwei aufeinanderfolgenden Halten eingegangen werden. Aus dieser Betrachtung lässt sich die zum Vortrieb notwendige mechanische Leistung für jeden Zeitpunkt der Fahrt ermitteln. Basierend darauf wird in einem nächsten Schritt die elektrische Leistung ermittelt, die der Zug aus dem Fahrleitungsnetz beziehen muss, um die mechanische Leistung und den Betrieb anderer Anlagen an Bord zu realisieren (vgl. Abb. 7.1).

### 7.2.1 Modellierung der Zugbewegung

Die fahrdynamischen Eigenschaften [185] eines Zuges (Zug- und Bremskraft  $F$ ) auf einem Abschnitt mit konstantem Streckenwiderstand  $i_m$  und mit konstanter Maximalgeschwindigkeit  $v_m$  lassen sich mit folgender Differentialgleichung beschreiben:

$$F = m \frac{dx_2}{dt} + Ax_2^2 + Bx_2 + C + i_m F_G \quad (7.1)$$

mit

- $x_2$  Geschwindigkeit
- $m$  Masse des Zuges
- $F_G$  punktförmige Gewichtskraft des Zuges
- $i_m$  Streckenwiderstand

$$F_W = Ax_2^2 + Bx_2 + C \quad \text{nichtlinearer Fahrwiderstand}$$

Eine geschlossene mathematische Beschreibung der mit diesem Zugverhalten zu realisierenden Fahrtrajektorien erfordert die Überführung dieser Gleichung in eine lineare Differentialgleichung.

chung. Dazu soll der Fahrwiderstand zwischen der mittleren Geschwindigkeit auf dem entsprechenden Abschnitt  $v_u$  und der Höchstgeschwindigkeit auf dem Abschnitt  $v_m$  wie folgt linearisiert werden.

$$F_W(x_2) = ax_2 + b \quad (7.2)$$

mit

$$a = A(v_u + v_m) + B \quad (7.3)$$

$$b = -\frac{1}{3}A(v_m v_u + \frac{1}{2}(v_m + v_u)^2) + C + i_m F_G \quad (7.4)$$

Die Linearisierung wird so gewählt, dass der Energieverbrauch für die Überwindung des Fahrwiderstands in diesem Geschwindigkeitsbereich  $[v_u, v_m]$  jenem bei quadratischem Fahrwiderstand entspricht und der Anstieg der linearen Näherung dem Durchschnitt der quadratischen Näherung im Intervall entspricht.

Mit der Linearisierung des Fahrwiderstands lassen sich die Zustandsgrößen des Zugs

- Position  $x_1$
- Geschwindigkeit  $x_2$

mit folgendem Differentialgleichungssystem beschreiben.

$$\frac{dx_1}{dt} = x_2 \quad (7.5)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = \frac{F(x_2)}{m} - (ax_2 + b) \quad (7.6)$$

Eine Begrenzung des Rucks

$$j = \frac{dx_2^2}{dt^2}, \quad (7.7)$$

die im praktischen Betrieb unvermeidlich ist und in anderen Arbeiten diskutiert wird (z.B. [35]), soll für diese Modellierung keine Rolle spielen, da die dadurch einzuführende Komplexität in keinem Verhältnis zur erzielbaren Genauigkeitsverbesserung des Modells stehen würde.

Moderne Fahrzeuge für den elektrischen Bahnbetrieb werden heute in der Regel mit Drehstromasynchronmaschinen im Motorbetrieb angetrieben und im Generatorbetrieb gebremst. Diese Maschinen sind in der Lage, bis zum Erreichen ihrer Nennleistung bei der sogenannten Übergangsgeschwindigkeit eine konstante Zugkraft zu realisieren. Ab diesem Punkt kann die maximale Leistung abgerufen werden, womit die verfügbare Antriebskraft/ elektrische Bremskraft hyperbelförmig mit zunehmender Geschwindigkeit abnimmt [19]. Diese konstante Leistung kann bis zu der Geschwindigkeit abgerufen werden, bei dem das Motor-Kippmoment genau auf der Leistungshyperbel liegt. Bei noch höheren Geschwindigkeiten würde dann die Leistung quadratisch abnehmen. Allerdings wird dieser Übergangspunkt im Nahverkehr üblicherweise nicht erreicht und soll damit auch nicht in die Modellierung einbezogen werden.

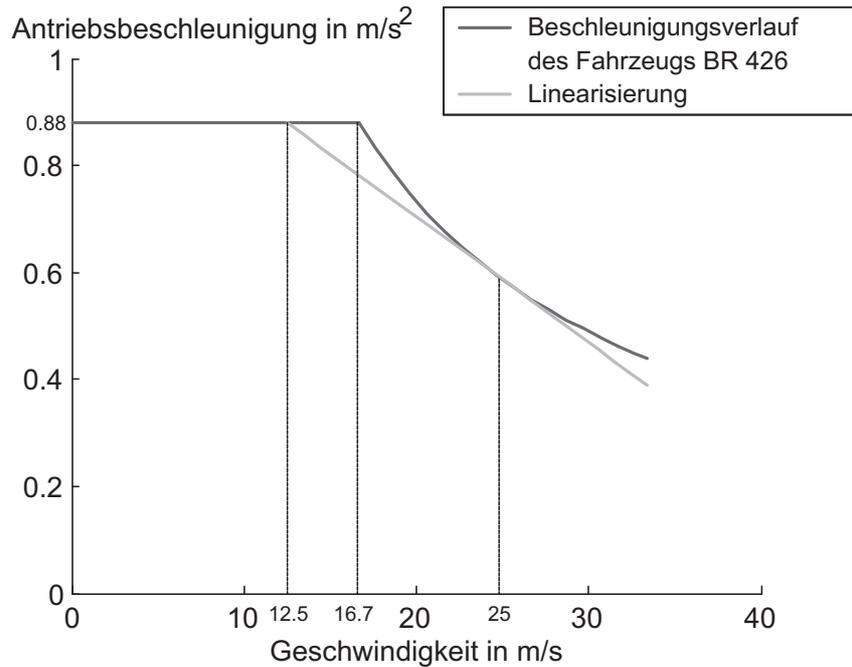


Abbildung 7.2: Linearisierung der Antriebsbeschleunigung oberhalb der Übergangsgeschwindigkeit für BR 426 [104]:  $v_P = 12.5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ,  $v_{P0} = 16.6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ,  $v_2 = 25 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Neben der elektrischen Bremse verfügen die meisten modernen Fahrzeuge über ein zusätzliches pneumatisches oder mechanisches Bremssystem, mit dem die Bremskraft bei hohen Geschwindigkeiten auf den zulässigen Maximalwert ergänzt werden kann. Da dabei Verluste in Form von Wärme und mechanischem Verschleiß auftreten, soll im verwendeten Modell von einem rein elektrischen Bremsen ausgegangen werden, wie es aus den selben Gründen auch von CHANG [36], MEYER [117] und SONE [158, 159] vorgeschlagen wurde.

Damit die Bewegungsdifferentialgleichungen des Zuges explizit lösbar bleiben, muss die verfügbare Antriebs- bzw. Bremskraft einer Drehstromasynchronmaschine im Bereich konstanter Leistung linearisiert werden [4, 124, 125]. Als Parameter dienen dabei die Übergangsgeschwindigkeit  $v_P$ , unterhalb derer die Maschine eine konstante Kraft liefert, sowie die Konstanten  $g_{ant}$  resp.  $g_{brems}$ , die den Abfall der verfügbaren Antriebs-/ Bremskraft bei einer weiteren Geschwindigkeitszunahme angeben. Für jede Geschwindigkeit lassen sich mit folgenden Gleichungen verfügbare Antriebsbeschleunigung und Bremsverzögerung berechnen.

$$u_{ant}(x_2) = \begin{cases} u_T & \text{für } x_2 \leq v_P \\ u_T - g_{ant}(x_2 - v_P) & \text{für } x_2 > v_P \end{cases} \quad (7.8)$$

$$u_{brems}(x_2) = \begin{cases} -u_B & \text{für } x_2 \leq v_P \\ -u_B + g_{brems}(x_2 - v_P) & \text{für } x_2 > v_P. \end{cases} \quad (7.9)$$

Bei der Annahme einer tangentialen Berührung des tatsächlichen, hyperbelförmigen Verlaufs mit der Näherungslösung bei der Geschwindigkeit  $v_2$  und der tatsächlichen Übergangsgeschwindigkeit des Fahrzeugs  $v_{P0}$  kann man die Modellparameter  $v_P$  und  $g_{ant}$  mit folgenden Formeln

ermitteln (vgl. Abb. 7.2):

$$v_P = -\frac{v_2^2}{v_{P0}} + 2v_2 \quad (7.10)$$

$$g_{ant} = \frac{u_T v_{P0}}{v_2^2} \quad (7.11)$$

Damit ist gewährleistet, dass die maximal vom Modell erreichbare Leistung der maximal vom Zug erreichbaren Leistung entspricht, d.h. die Linearisierung überschreitet die tatsächliche Antriebsparabel nicht.

### 7.2.2 Das energieoptimale Fahrspiel für eine Fahrt zwischen zwei Halten

Aufgabe bei der energieoptimalen Zugsteuerung zwischen zwei aufeinanderfolgenden Halten ist es, den Zug unter genauer Einhaltung des Fahrplans sowie anderer betrieblicher Randbedingungen (vorgegebene Maximalgeschwindigkeiten, Anfahrbeschleunigung, Bremsverzögerung, Ruck u.a.) so zum nächsten Halt zu steuern, dass dafür ein Minimum an Energie benötigt wird.

Um das dafür notwendige Fahrspiel ermitteln zu können, wurden seit den 1970er Jahren weltweit zahlreiche Untersuchungen durchgeführt. Die dabei eingesetzten Algorithmen reichen von der Theorie der optimalen Steuerung [85, 88, 148] über den Einsatz von Fuzzy-Reglern [34] bis zur Ermittlung optimaler Trajektorien durch Suchverfahren [41], den Einsatz der Dynamischen Programmierung [96, 171] oder Evolutionärer Algorithmen [35].

Viele dieser Algorithmen wurden in die Zugsteuerung integriert oder als Assistenzsysteme in der Praxis getestet und betrieben [15, 99, 114, 164]. Die Bedeutung solcher Systeme zum Energiesparen wird als sehr hoch eingeschätzt [3, 122, 167].

#### 7.2.2.1 Das optimale Fahrspiel auf einem Abschnitt mit konstanten Randbedingungen [85]

Durch Anwendung der Theorie der optimalen Steuerung, insbesondere des Maximumprinzips von PONTRJAGIN, kommt HORN [85] zu der Erkenntnis, dass für die energieoptimale Zugsteuerung auf einem Abschnitt mit konstanten Randbedingungen nur folgende vier Fahrregime eingesetzt werden brauchen:

- Antrieb mit maximaler, betrieblich und fahrzeugseitig realisierbarer Antriebsbeschleunigung
- Beharrungsfahrt mit konstanter Geschwindigkeit, die entweder durch Antrieb oder Bremsen realisiert wird
- Auslauf (Ausrollen ohne Antriebs- oder Bremskraft)
- Bremsen mit maximaler, betrieblich und fahrzeugseitig realisierbarer Bremsverzögerung

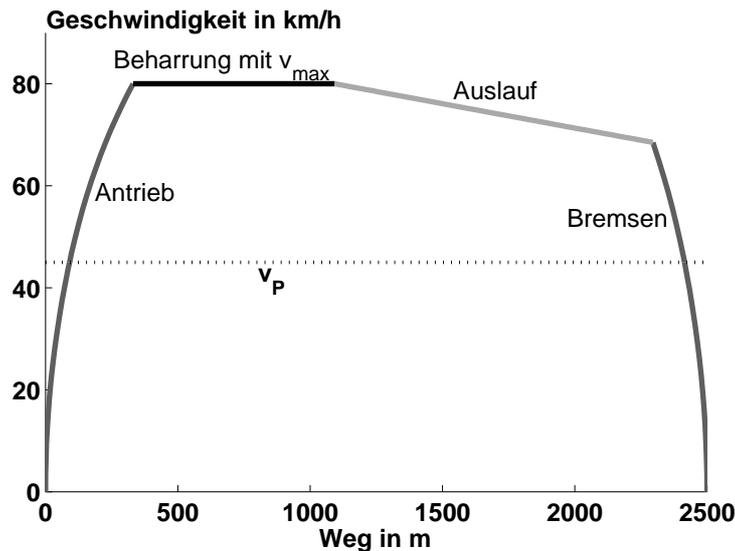


Abbildung 7.3: Fahrtschaulinie für eine Fahrt auf einem 2500 m langen Abschnitt (Dauer 142 s, Fahrzeug BR 426 [104])

HORN hat gezeigt, dass im Nahverkehr auf das Regime Beharrungsfahrt unterhalb der Maximalgeschwindigkeit verzichtet werden kann, was er auch durch praktische Erfahrungen bestätigt.

Eine typische energieoptimale Fahrtschaulinie aus dem Nahverkehr, die alle vier Regime enthält, ist in Abb. 7.3 dargestellt.

### 7.2.2.2 Ermittlung der Bewegungs- und Leistungstrajektorien

Erste Untersuchungen zur effizienten Ermittlung der Bewegungs- und Leistungstrajektorien bei der energieoptimalen Fahrt für das von HORN vorgeschlagene Zugmodell wurden unter Anleitung des Verfassers dieser Arbeit durch LEHNERT [108] realisiert. Eine Erweiterung für das Zugmodell mit linear geschwindigkeitsabhängiger Zugkraft wurde in [128] ausführlich für alle möglichen Fälle der Kombination von Fahrregimen beschrieben. Hier soll nur die prinzipielle Herangehensweise anhand einiger typischer Beispiele beschrieben werden, ohne auf das über den Rahmen dieser Arbeit hinausgehende Formelwerk einzugehen.

Für eine gegebene Fahrzeit  $t_f$  ist für einen gegebenen Teilabschnitt mit den Randbedingungen

$i_m$  Streckenneigung

$v_m$  Höchstgeschwindigkeit

$x_{1f}$  Länge des Abschnitts

$x_{2A}$  Geschwindigkeit zu Beginn des Abschnitts (Anfangsgeschwindigkeit)

$x_{2E}$  Geschwindigkeit am Ende des Abschnitts (End- oder Zielgeschwindigkeit)

das optimale Fahrregime zu ermitteln.

Nach Prüfung der Gültigkeit der gewählten Randbedingungen (Erreichbarkeit  $x_{2E}$  von  $x_{2A}$  aus innerhalb  $x_{1f}$ ), ist die Dauer der zeitoptimalen Fahrt zu ermitteln, die abhängig vom kon-

kreten Abschnitt mit oder ohne Beharrungsfahrt an der Geschwindigkeitsgrenze durchgeführt wird. Dazu ist eine Gleichung der Form

$$x_{1f} = x_{1,ant}(x_{2A}, v_m) + x_{1,beh}(v_m, t_f - t_{ant} - t_{brems}) + x_{1,brems}(x_{2E}, v_m) \quad (7.12)$$

zu lösen.

Ist die geplante Fahrzeit  $t_f$  kleiner oder gleich der mit der zeitoptimalen Fahrt erreichbaren Mindestfahrzeit, so ist die ermittelte zeitoptimale Trajektorie gleichzeitig die energieoptimale.

Da für die hier untersuchte Anwendung im Nahverkehr auf das Regime Beharrungsfahrt unterhalb der Maximalgeschwindigkeit verzichtet wurde, existiert eine längstmögliche Fahrt, die unter den gegebenen Randbedingungen zu realisieren ist [128]. Diese besteht im nicht trivialen Fall der Übereinstimmung mit der zeitoptimalen Fahrt entweder aus den Regimen Antrieb und Auslauf (bei ansteigender oder flacher Strecke) bzw. Auslauf und Bremsen (bei abfallender Strecke). Bei großen Streckenlängen muss evtl. eine Phase Beharrungsfahrt an der Geschwindigkeitsgrenze eingefügt werden. Überschreitet die geplante Fahrzeit die maximale Fahrzeit mit den möglichen Regimen, dann ist die Fahrt mit der maximalen Fahrtdauer zu wählen.

Liegt die geplante Fahrtdauer  $t_f$  zwischen minimaler und maximaler Fahrtdauer, so ist schließlich zu ermitteln, ob diese kürzer ist als bei der Fahrt, bei der genau zu Beginn oder Ende des Auslaufs die Geschwindigkeitsgrenze berührt wird. Ist dies der Fall, dann besteht das optimale Fahrspiel aus allen vier möglichen Fahrregimen, die Reihenfolge der Regime Auslauf und Beharrungsfahrt wird danach festgelegt, ob zum Halten der Maximalgeschwindigkeit Antriebskraft aufgebracht werden muss (Beharrungsfahrt vor Auslauf) oder hierzu gebremst wird (abschüssige Strecke, Auslauf vor Beharrungsfahrt). Das vierphasige Fahrspiel kann nur bei Fahrten vorkommen, bei denen schon bei der zeitoptimalen Fahrt die Geschwindigkeitsgrenze berührt wurde und wird sicher vorkommen, wenn diese auch bei der Fahrt mit maximaler Dauer erreicht wird.

In allen anderen Fällen, und diese stellen die Regel dar im Stadtschnellbahnbetrieb, besteht das optimale Fahrspiel aus den Regimen

- Antrieb
- Auslauf
- Bremsen

Um die Übergangspunkte (gekennzeichnet durch die Zielentfernung, verbleibende Fahrzeit und Geschwindigkeit) für den Wechsel zwischen den Fahrregimen zu finden, muss wie im folgenden Beispiel für die Fahrregime Antrieb, Auslauf und Bremsen demonstriert, ein Gleichungssystem aufgestellt und mit numerischen Methoden gelöst werden:

$$0 = x_{1,f} - x_{1,ant}(t_{ant}) - x_{1,ausl}(x_{2,ant}(t_{ant}), t_{ausl}) - x_{1,brems}(x_{2,ausl}(x_{2,ant}(t_{ant})), t_{ausl}) \quad (7.13)$$

$$0 = t_f - t_{ant} - t_{ausl} - t_{brems}(x_{2,ausl}(x_{2,ant}(t_{ant}), t_{ausl})) \quad (7.14)$$

Die unbekanntenen Größen sind in diesem Fall die Dauer des Antriebsvorgangs  $t_{ant}$  und die Dauer des Auslaufvorgangs  $t_{ausl}$ , die so gewählt werden müssen, dass Weg und Zeit für die Gesamtfahrt den erforderlichen Werten entsprechen.

### 7.2.2.3 Energieoptimale Zugsteuerung auf einem Abschnitt mit unterschiedlichen Randbedingungen

Enthält ein Abschnitt zwischen zwei Halten starke Neigungswechsel, die nach der gängigen Praxis nicht zu einer durchschnittlichen Neigung zusammengefasst werden können [185], oder gelten unterschiedliche Maximalgeschwindigkeiten, so darf der oben beschriebene Zugang nicht für den gesamten Abschnitt sondern nur für die Teilabschnitte mit konstanten Bedingungen verwendet werden.

Analog zum Prinzip der Dynamischen Programmierung [18] wurde von HORN und ZINKE [87, 191] ein Gradientenverfahren entwickelt, mit dem aufbauend auf der Kenntnis der optimalen Fahrregime in den einzelnen Teilabschnitten eine Lösung für den Gesamtabschnitt ermittelt werden kann. Dieses Verfahren wurde vom Autor auf die speziellen Bedürfnisse des Nahverkehrs zugeschnitten und ist ausführlich in [128] beschrieben. Dabei werden für jeden Teilabschnitt Anfangs- und Endgeschwindigkeit sowie die Fahrzeit des Zuges ermittelt, so dass für die Fahrt auf dem gesamten Abschnitt möglichst wenig Energie benötigt wird.

Die für den Abschnitt zur Verfügung stehende Fahrzeitreserve wird dabei stückweise auf die einzelnen Teilabschnitte verteilt, wobei für jeden Teilabschnitt eine von zwei alternativen Fahrweisen untersucht wird:

- Die Verlängerung der Fahrzeit auf dem Teilabschnitt um eine Zeit  $\Delta t$
- Das Absenken der Übergangsgeschwindigkeit zwischen zwei Teilabschnitten, auf denen die längstmögliche Fahrweise bereits praktiziert wird.

Schrittweise wird dann geprüft, auf welchem Teilabschnitt und mit welcher alternativen Fahrweise der Gradient

$$Grad = \frac{\Delta E}{-\Delta t} = \frac{E_{alt} - E_{neu}}{t_{f,neu} - t_{f,alt}} \quad (7.15)$$

maximal wird. Auf jenem wird dann die alternative Fahrweise durchgeführt. Der Rest der Fahrzeitreserve wird nach dem selben Prinzip verteilt.

Für einen Beispielabschnitt sind Lösungen für unterschiedliche Fahrzeiten in Abb. 7.4 zusammengestellt.

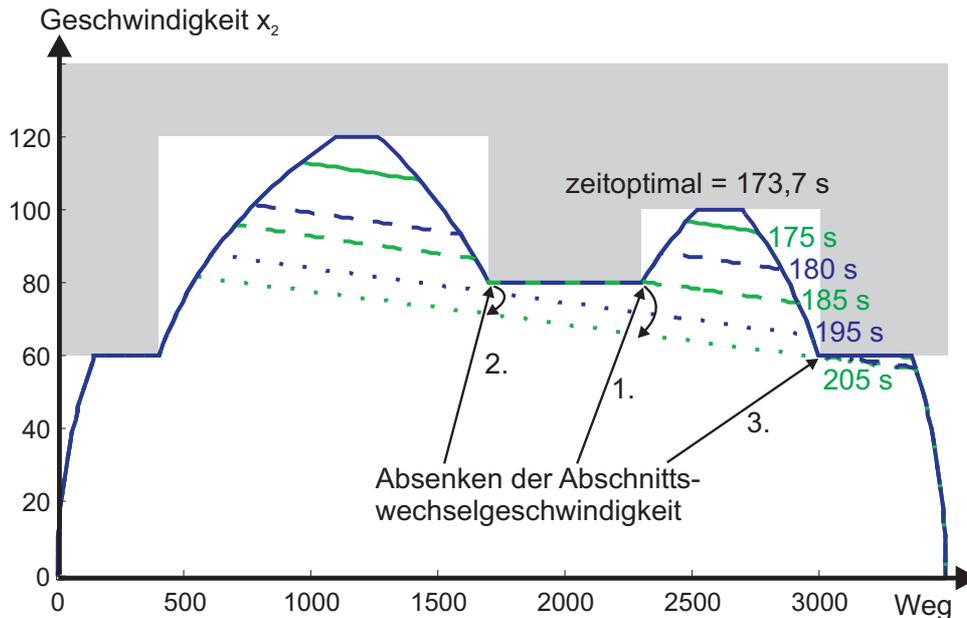


Abbildung 7.4: Mit dem Gradientenverfahren ermittelte Fahrtafeln für unterschiedliche Fahrzeiten

### 7.2.3 Andere Möglichkeiten zur Steuerung einer Zugfahrt zwischen zwei Halten

Die praktische Anwendung der in den letzten Abschnitten beschriebenen Erkenntnisse ist weltweit zwar verbreitet, dennoch gibt es eine Vielzahl von Verkehrsunternehmen, die eine andere Strategie zur Steuerung zwischen zwei Halten verwenden.

Hier kommt das Prinzip Tempomat zum Einsatz [17], bei dem bis zu einer vorgegebenen Geschwindigkeit beschleunigt wird und diese dann automatisch bis zum Bremsbeginn gehalten wird. Auch mit diesem Prinzip lässt sich jede mögliche Fahrzeit zwischen zwei Halten realisieren, auch wenn vor allem bei geringen Fahrzeitreserven deutlich mehr Traktionsenergie verbraucht wird als mit der optimalen Strategie. Die Ermittlung der Umschaltzeitpunkte kann analog zu dem in Abschnitt 7.2.2.2 beschriebenen Verfahren durch Lösen eines Systems von Differentialgleichungen erfolgen.

Diese Art der Steuerung wird u.a. eingesetzt bei BART in San Francisco [65] sowie (in weiter vereinfachter Form) bei dem System VAL u.a. in Lille und Toulouse [132].

## 7.3 Modellierung des elektrischen Verhaltens des Triebfahrzeugs

Anhand der Bewegungstrajektorie lässt sich das vom Zug aufzunehmende Leistungsprofil durch Multiplikation von aktueller Geschwindigkeit und eingesetzter Zugkraft ermitteln:

$$P = Fx_2 = mux_2 \quad (7.16)$$

Der Einfluss der Besetzung der Züge hängt von deren Leermasse und Platzkapazität ab: Bei lokbespannten Zügen mit hoher Eigenmasse ist er im Gegensatz zu leichten Triebwagen z.B. vom Typ VAL zu vernachlässigen (vgl. [161]).

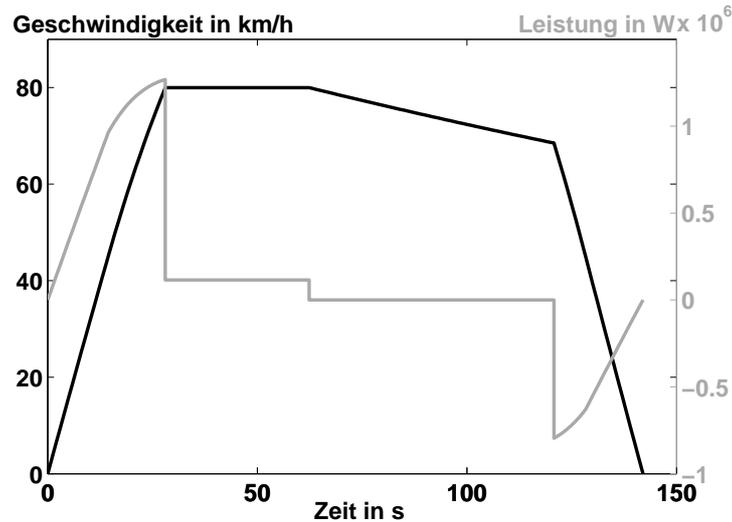


Abbildung 7.5: Leistung und Geschwindigkeit als Funktion der Zeit für eine Fahrt auf einem 2500 m langen Abschnitt (Fahrzeit 142 s)

Um diese mechanische Leistung über das Treibrad tatsächlich auf die Schiene zu bringen und damit einen linearen Vortrieb zu erzeugen, sind unterschiedlichste Energiewandlungsprozesse nötig.

Für die im Rahmen dieser Arbeit zu untersuchenden prinzipiellen Zusammenhänge ist es ausreichend, die Energiewandlungsprozesse pauschal mit einem aus der Erfahrung stammenden Wirkungsgradfaktor  $\eta$  zu bewerten. Bei modernen Triebfahrzeugen liegt dieser zwischen 0,8 und 0,9 [19, 105].

$$P_{ant,elektrisch} = \frac{P_{ant,mechanisch}}{\eta_{Motor}} \quad (7.17)$$

$$P_{brems,elektrisch} = P_{brems,mechanisch} \eta_{Generator} \quad (7.18)$$

Eine resultierende Leistungskurve ist zusammen mit dem Zeit-Geschwindigkeits-Verlauf in Abb. 7.5 dargestellt. Das Beispiel entspricht dem aus Abb. 7.3 von Seite 122.

Zusätzlich zu der allein zum Vortrieb notwendigen elektrischen Leistung wird über den Stromabnehmer Leistung zur Versorgung aller zum Betrieb des Fahrzeugs notwendigen Geräte wie Heizung, Klimaanlage, Lüfter, Beleuchtung etc. bezogen. Moderne Fahrzeuge verfügen dabei über die Möglichkeit, solche Geräte vorrangig während der Bremsphasen zu betreiben, um dafür ausschließlich Bremsenergie zu nutzen [3]. Bei der hier vorgestellten Modellierung soll diese Möglichkeit nicht in Betracht gezogen werden, sondern von einer konstanten Grundlast  $P_{GL}$  während der gesamten Fahr- und Haltezeit des Zuges ausgegangen werden.

## 7.4 Modellierung der Anlagen der Bahnenergieversorgung

Mit den im vorigen Abschnitt beschriebenen optimalen Zugtrajektorien lassen sich für jeden gegebenen Moment für alle Züge im S-Bahn-System die elektrischen Leistungen ermitteln, die am Stromabnehmer angefordert werden bzw. zur Rückspeisung zur Verfügung stehen. Die Anlagen der Bahnenergieversorgung müssen nun für die Verteilung der elektrischen Energie zwischen den Unterwerken und den Zügen sorgen. Dabei sind technische und regulatorische Grenzwerte einzuhalten.

Dieser Abschnitt erläutert die Modellierung der Anlagen der Bahnenergieversorgung. Zunächst wird kurz auf die Unterschiede zwischen Wechselstrom- und Gleichstrom-Versorgung eingegangen. Anschließend sollen Modelle vorgestellt werden, mit denen die elektrischen Eigenschaften der Komponenten der Energieversorgung beschrieben werden. Ein weiterer Abschnitt widmet sich der Berechnung des gesamten Netzwerks sowie der dadurch ermöglichten Ermittlung von Optimierungskriterien aus Sicht der Energieversorgung.

### 7.4.1 Vergleich der Bahnstromsysteme

Die große Mehrheit der Untergrund- und Stadtschnellbahnen weltweit wird mit Gleichstrom betrieben, im Straßenbahnbereich wird ausschließlich Gleichstrom verwendet.

Die gewöhnlichen Nennspannungen betragen zwischen 600 und 750 Volt im Straßenbahnbereich, sowie zwischen 750 und 1500 V bei U- und S-Bahnen [147, 176]. Die Energieversorgung besteht in der Unterwerksebene in der Regel aus Gleichrichtern, die aus einer Wechselstrom-Mittelspannung eine Gleichspannung erzeugen [3, 176]. Mit dieser Technik ist es nicht möglich, Energie aus dem Fahrleitungsnetz in das übergeordnete Netz zu übertragen. Wenn also in einer möglichen Rückspeisesituation keine Verbraucher im Fahrleitungsnetz verfügbar sind, so kann nicht zurückgespeist werden.

Anders stellt sich der Fall bei modernen Wechselrichter-Unterwerken dar. Hier ist auch eine Rücktransformation von Energie in übergeordnete Netze möglich, wenn dort Verbraucher vorhanden sind. Obwohl solche Anlagen mittlerweile Stand der Technik sind, werden sie aufgrund der sehr hohen damit verbundenen Investitionen bei elektrischen Bahnen weltweit nur in einer äußerst geringen Zahl eingesetzt. Als Beispiele seien hier die in [3] referenzierte Metro von Barcelona und die Schweizer Jungfraubahnen als Bergbahn genannt [146], wobei für letztere besondere Bedingungen gelten.

Aufgrund der niedrigen Spannungen im Gleichstrombereich erfordern die im modernen Nahverkehr aufzubringenden großen Leistungen die Übertragung sehr hoher Ströme, die in den Anlagen hohe Verluste verursachen.

Wechselstrombahnen sind im Fern- und Regionalbahnbereich üblicherweise eingesetzt, finden aber in vielen Teilen Europas auch im Stadtschnellbahnbetrieb Anwendung. Spannungen sind in der Regel 15 kV bei 16 2/3 Hz und 25 kV bei 50 Hz [147]. Die Kopplung von Hochspannungs- und Fahrleitungsnetz im Unterwerk ist rein transformatorischer Art, d.h. eine Rücktransformation von Energie in übergeordnete Netze ist immer möglich, wenn dort Verbraucher vorhanden sind.

Hohe angeforderte Leistungen erfordern bei Wechselstrombahnen aufgrund ihrer hohen Spannungen deutlich geringere Ströme als bei Gleichstrombahnen, so dass hier auch weniger Übertragungsverluste im Leitungssystem entstehen.

Alle aufgeführten Punkte führen zu der Erkenntnis, dass die Flexibilisierung und Synchronisierung von Anfah- und Bremsvorgängen im Gleichstrombereich von besonderem Interesse ist. Aus diesem und den im Kapitel 2 aufgeführten Gründen soll sich in dieser Arbeit auf Gleichstrombahnen beschränkt werden.

### 7.4.2 Modellierung der einzelnen Komponenten

Anlagen der Bahnenergieversorgung lassen sich als elektrische Netzwerke betrachten und modellieren [139]. Für die hier zu untersuchende Aufgabenstellung soll die Modellierungsgrenze mit den Gleichrichter-Unterwerken festgelegt werden, in denen die Betriebsspannung des Bahnsystems bereitgestellt wird und die Abrechnung der Energiekosten mit dem Energieversorgungsunternehmen erfolgt.

Eine Modellierung mit hohem Detaillierungsgrad ist für die hier zu untersuchende Aufgabenstellung nicht wesentlich. Hierfür stehen Werkzeuge zur Verfügung, die in jahrelanger Entwicklungsarbeit entstanden sind (Verweise finden sich in den Übersichtsaufsätzen [62, 76, 81]). Die Abschätzung der Potenziale der hier zu entwickelnden Algorithmen und Verfahren soll mit einem vereinfachten Modell geschehen, das sich auf die Arbeiten von CAI et al. [26, 27, 80] und RÖHLIG [139] stützt. Weitere Hinweise zur Netzberechnung wurden aus [77–79, 129, 174] entnommen.

#### 7.4.2.1 Fahrleitungen und Gleise

Fahrleitungen und Gleise bilden Hin- und Rückleiter für die Energieübertragung von den Unterwerken zu den Fahrzeugen. Im Modell werden diese als OHMSche Widerstände berücksichtigt. Querverbinder zwischen den Leitungen der verschiedenen Richtungen können ebenfalls als OHMSche Widerstände berücksichtigt werden.

Obwohl das Modell prinzipiell geeignet wäre, eine Betrachtung der Ableitungsvorgänge Gleis-Erde durchzuführen (wie dies z.B. in [139] erfolgt ist), soll hier aus zwei Gründen darauf verzichtet werden:

- Die Gleis-Erde-Spannung muss nach den geltenden Vorschriften [46] innerhalb bestimmter Grenzwerte liegen. Dies ist bei der Dimensionierung der Anlagen zu beachten und sollte nicht mit Hilfe einer Steuerung korrigiert werden müssen.
- Zusätzliche Elemente, wie durch die Modellierung der Ableitung Gleis-Erde in das Modell aufzunehmen wären (vgl. [139]), kosteten zusätzliche Rechenzeit.

Eine qualitative Aussage, dass niedrigere Ströme weniger Spannungsabfälle im Gleis verursachen und damit die Gleis-Erde-Spannung absinkt, lässt sich auch mit dem hier verwendeten Modell durchführen.

### 7.4.2.2 Unterwerke

Unterwerke werden von einem leistungsfähigen übergeordnetem Netz gespeist, wobei es sich um ein Mittelspannungsnetz oder unmittelbar um das Landesnetz handeln kann [147]. Die dortigen Spannungsschwankungen sollen als vernachlässigbar betrachtet werden, so dass ein speisendes Unterwerk als Spannungsquelle mit konstanter Leerlaufspannung  $U_0$  und einem Innenwiderstand  $R_i$  interpretiert wird.

Bei der Modellierung soll sich ausschließlich auf Gleichrichterunterwerke konzentriert werden, die laut der bereits mehrfach zitierten Studie der UITP [3] noch mehr als 80% der heute und in Zukunft eingesetzten Unterwerke ausmachen. Gleichrichterunterwerke bieten die Möglichkeit nicht, Energie in das übergeordnete Netz zurückzuspeisen, wenn diese im Fahrleitungsnetz keine Abnehmer findet. In einem solchen Fall muss das Modell der Spannungsquelle mit Innenwiderstand durch einen großen Sperrwiderstand  $R_S$  ersetzt werden. Dieser wird in der Realisierung mit  $1\text{ M}\Omega$  gewählt. Im Netzwerk mit wesentlich geringeren Widerständen fließt damit kein Strom mehr durch das betroffene Unterwerk (vgl. Abb. 7.7).

Alle Unterwerke im Netz werden dabei als parallel geschaltet betrachtet. Diese Schaltungsart ist im Gleichstrombereich weit verbreitet und stellt die beste Möglichkeit zur Nutzung rückgespeister Bremsenergie dar [139].

### 7.4.2.3 Fahrzeuge

Die im Netz verkehrenden Fahrzeuge sind in jedem Moment des Untersuchungszeitraums durch eine angeforderte elektrische Leistung  $P$  charakterisiert, deren Berechnung in den vorigen Abschnitten dieses Kapitels beschrieben wurde. Diese Leistung wird an einem ebenfalls bekannten Ort  $x_1$  punktförmig entnommen.

In der Netzberechnung wird ein Zug als ideale Stromquelle interpretiert, deren Strom sich aus der angeforderten Leistung und der am Zug anliegenden Spannung ergibt:

$$I = \frac{U}{P} \quad (7.19)$$

Die Spannung am Zug wird im Rahmen des im nächsten Abschnitt vorgestellten Knotenspannungsverfahren ermittelt, sie sinkt bei hohen entnommenen Leistungen und steigt an bei hohen Rückspeiseleistungen (vgl. auch Abb. 1.8 auf S. 10). Dabei muss sie aber laut gültigen Richtlinien [47] innerhalb eines Bereiches von -30% (bei Straßenbahnen und O-Bussen)/ -33 $\frac{1}{3}$ % (bei sonstigen Bahnen) bis +20 % der Systemspannung liegen.

Um dies auch bei ungünstigen Netzverhältnissen zu garantieren, werden fahrzeugseitig Schutzmaßnahmen vorgesehen. Die sogenannte spannungsabhängige Leistungsbegrenzung sorgt dafür, dass bei Unterschreiten einer Spannung wenig oberhalb der kritischen Grenze die Leistung der Fahrmotoren so reduziert wird, dass eine Unterschreitung der Mindestspannung mit hoher Wahrscheinlichkeit vermieden wird. Um diesen Effekt wirklichkeitsnah zu modellieren, müsste die Simulation der Anlagen der Bahnenergieversorgung auf die Simulation der Zugbewegung zurückwirken. Einige fortgeschrittene Simulationsprogramme, die zur Dimen-

sionierung der Anlagen der Bahnenergieversorgung genutzt werden, bieten diese Möglichkeit [81, 160]. Im Rahmen dieser Arbeit soll aus folgenden Gründen darauf verzichtet werden:

- Wenn im Regime Antrieb mit maximaler Betriebsbeschleunigung die spannungsabhängige Leistungsbegrenzung aufgrund zu niedriger Spannungen eingeschaltet wird, so hat dies eine Reduktion des Beschleunigungsvermögens des Zugs zur Folge. Dies würde eine Verletzung der durch Anwendung des Maximumprinzips gewonnen Erkenntnis über die optimalen Fahrregime bedeuten und damit zu einer nicht-optimalen Lösung führen.
- Der zusätzliche Aufwand an Rechenzeit durch Rückkopplung beider Systeme ist sehr hoch.

Um das Modul zur Simulation der Anlagen der Bahnenergieversorgung für den Fall niedriger Spannungen aussagekräftig zu machen, wurde folgendes Verfahren implementiert:

Wenn während einer Simulation der Anlagen der Bahnenergieversorgung Situationen entstehen, in denen die Spannung unter die vorgeschriebene Grenze fällt, dann wird das gesamte Simulationsergebnis als ungültig und der gegebene Fahrplan als nicht realisierbar erklärt, obwohl durch den Einsatz der spannungsabhängigen Leistungsbegrenzung dies nicht unbedingt eintreten muss. Für die durchzuführende Optimierung bedeutet dies, dass nur Fahrpläne entstehen können, mit denen immer die für die Fahrt zwischen zwei Halten optimalen Fahrregime durchgeführt werden können, insbesondere das Regime Antrieb mit maximaler Beschleunigung, dass nicht mit eingesetzter spannungsabhängiger Leistungsbegrenzung machbar wäre.

Das Zurückspeisen von Energie ist mit einer Spannungsanhebung am Zug verbunden. Erreicht die Spannung den Maximalwert, wird die Leistungsabgabe des Zuges ins Netz derart begrenzt, dass diese Maximalspannung nicht überschritten wird [178]. Die verbleibende Bremsleistung wird in Bremswiderständen in Wärme gewandelt. In der Modellierung der Fahrzeuge soll dies folgendermaßen berücksichtigt werden:

Ist die maximale Bremsspannung eines Zuges nach einem Berechnungsschritt überschritten, wird der Zug im nächsten Iterationsschritt nicht mehr als Strom-, sondern als Spannungsquelle betrachtet, deren Ursprungspannung der maximalen Bremsspannung und deren Innenwiderstand dem der Unterwerke entspricht. Tritt im Verlaufe der Iterationen an einem als Spannungsquelle modellierten Zug eine höhere Leistung auf, als mit der Zugfahrtsimulation ermittelt, dann wird dieser im nächsten Schritt wieder als Stromquelle interpretiert [26] (vgl. auch Abb. 7.8).

### 7.4.3 Berechnung des Netzwerkes

Die Berechnung elektrischer Netzwerke unter Nutzung digitaler Rechentechnik ist seit den frühen 1970er Jahren Gegenstand zahlreicher Untersuchungen weltweit. Mit zunehmenden Anforderungen an die Breite der Ergebnisse ging der Trend vom weniger Rechenleistung beanspruchenden Überlagerungsverfahren, dass z.B. noch in [20, 73, 175] verwendet wird, hin zum universell einsetzbaren Knotenspannungsverfahren, dass sich aufgrund seines einfach aufzustellenden Ansatzes in der Praxis auch gegenüber dem Maschenstromverfahren durchgesetzt hat [174]. Im folgenden soll der auch hier gewählte Ansatz des Knotenspannungsverfahrens

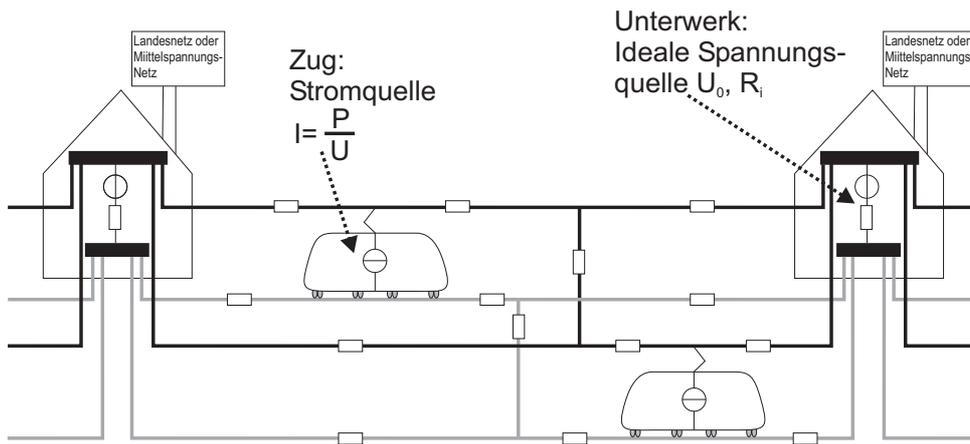


Abbildung 7.6: Modellierung des Systems Gleichstrombahn im Normalzustand

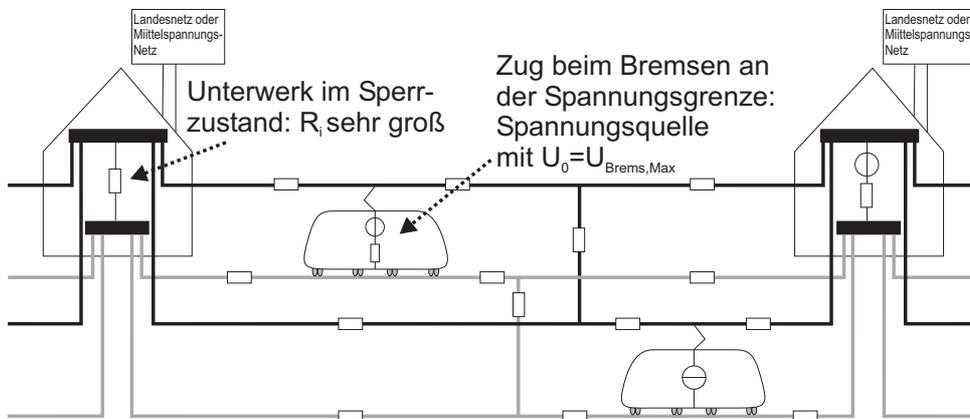


Abbildung 7.7: Modellierung von Spezialfällen im Gleichstromnetz: Bremsen an der zulässigen Maximalspannung und Unterwerk im Sperrzustand

kurz eingeführt werden, wobei den Ausführungen von RÖHLIG [82, 139] und UNBEHAUEN [174] gefolgt wird. Dieses Verfahren ist sowohl für Gleichstrom- als auch Wechselstromnetze verwendbar, weshalb für die Beschreibung im folgenden komplexe Variablen Verwendung finden sollen. Anschließend folgen spezielle Ergänzungen, die sich aus dem speziellen Modellierungsansatz von CAI et al. [26, 27, 80] für Gleichstromnetze ergeben.

#### 7.4.3.1 Das Knotenspannungsverfahren [139, 174]

Das Knotenspannungsverfahren basiert auf den KIRCHHOFFSchen Sätzen.

- Der Knotensatz besagt, dass die Summe der in einen Knoten hineinfließenden Ströme gleich der der aus dem Knoten wegfließenden Ströme ist.
- Der Maschensatz führt aus, dass innerhalb einer Masche die Summe der vorzeichenbehafteten Spannungsabfälle ebenfalls 0 wird.



dass sich mit

$$\begin{pmatrix} \underline{I}_{00} \\ \underline{I}_{11} \\ \underline{I}_{22} \\ \vdots \\ \underline{I}_{nn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{Y}_{00} & \underline{Y}_{01} & \underline{Y}_{02} & \cdots & \underline{Y}_{0n} \\ \underline{Y}_{10} & \underline{Y}_{11} & \underline{Y}_{12} & \cdots & \underline{Y}_{1n} \\ \underline{Y}_{20} & \underline{Y}_{21} & \underline{Y}_{22} & \cdots & \underline{Y}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \underline{Y}_{n0} & \underline{Y}_{n1} & \underline{Y}_{n2} & \cdots & \underline{Y}_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{U}_0 \\ \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \\ \vdots \\ \underline{U}_n \end{pmatrix} \quad (7.28)$$

oder in der komprimierten Schreibweise

$$\underline{I} = \underline{Y} \underline{U} \quad (7.29)$$

darstellen lässt, wobei  $\underline{Y}$  die Admittanzmatrix darstellt, die quadratisch, symmetrisch, singulär und in den meisten Fällen spärlich besetzt ist.

Das Knotenspannungsverfahren basiert darauf, in einem Knoten die Spannung 0 vorzugeben. Damit ergibt sich für alle Produkte mit den Admittanzen der Wert 0, ebenso für den Knotenstrom. Erfolgt diese Spannungsvorgabe für den Punkt 0, kann die 1. Zeile automatisch aus der Matrix gelöscht werden. Da sämtliche Produkte der ersten Spalte ebenfalls zu Null werden, kann auch diese gelöscht werden. Die neue Gleichung lautet damit

$$\begin{pmatrix} \underline{I}_{11} \\ \underline{I}_{22} \\ \vdots \\ \underline{I}_{nn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{Y}_{11} & \underline{Y}_{12} & \cdots & \underline{Y}_{1n} \\ \underline{Y}_{21} & \underline{Y}_{22} & \cdots & \underline{Y}_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \underline{Y}_{n1} & \underline{Y}_{n2} & \cdots & \underline{Y}_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \\ \vdots \\ \underline{U}_n \end{pmatrix} \quad (7.30)$$

Zur Berechnung der Werte  $\underline{Y}_{ii}$  wird weiterhin Gl. (7.25) verwendet, d.h. hier werden die Admittanzen  $\underline{Y}_{0i}$  berücksichtigt.

Das Gleichungssystem ist bestimmt und kann gelöst werden. Eine Möglichkeit besteht in der Invertierung der Admittanzmatrix, die nur einmal pro Leistungsiteration erfolgen muss. Da es sich um eine nur spärlich besetzte Matrix handelt, können hierfür verschiedene effiziente Verfahren eingesetzt werden, auf die u.a. in [26,62] verwiesen wird. Voraussetzung für die Anwendung ist eine effiziente Nummerierung der Knoten, die so erfolgen sollte, dass die von Null verschiedenen Elemente der Admittanzmatrix in der Nähe der Hauptdiagonalen angeordnet sind. Für eine solche Anordnung sind sehr schnelle Verfahren zur Matrix-Invertierung bekannt [154].

In der hier durchgeführten MATLAB<sup>®</sup>-Implementierung erweist sich für die einfache Netzmodellierung die Standardinvertierung als das schnellste Verfahren.

### 7.4.3.2 Spezielle Umwandlungen

Sämtliche im Netz befindliche Spannungsquellen (speisende Unterwerke, rückspeisende Züge an der Spannungsgrenze) werden für die Netzberechnung als Stromquellen betrachtet.

Hierzu wird die NORTON/ THEVENIN - Umrechnung verwendet [111], mit der eine beliebige Sammlung von Batterien mit zwei Ausgängen als Stromquelle mit einem parallelen Innenwider-

stand betrachtet werden kann. Dieser Widerstand  $R_{ii}$  lässt sich an den Anschlüssen ermitteln, in dem man sämtliche Spannungsquellen durch Kurzschlüsse und sämtliche Stromquellen als nicht verbundene Leitungen betrachtet. Den Kurzschlussstrom  $I_K$  erhält man, in dem man die Leerlaufklemmenspannung durch den ermittelten Widerstand  $R_{ii}$  dividiert.

Im hier einfachen Fall mit nur einer zu ersetzenden Spannungsquelle ergeben sich:

$$R_{ii} = R_i \quad (7.31)$$

$$I_K = \frac{U_0}{R_i} \quad (7.32)$$

Sind alle Unterwerke im Sperrzustand und tritt dann während des Iterationsvorganges an einem Zug eine Spannung größer als das doppelte der zulässigen Bremsspannung auf, dann werden die Iterationen abgebrochen und die betroffenen Züge in den Spannungsquellen-Betrieb umgeschaltet (vgl. Abb. 7.8 und [26]). Dies betrifft Situationen, in denen mehr Leistung ins Netz zurückgespeist wird, als dafür Abnehmer vorhanden sind. In der Modellierung entartet das gesamte Netzwerk dann zu einer Parallelschaltung von Spannungsquellen, in denen einzig die Ausgleichsströme zwischen den Spannungsquellen fließen.

#### 7.4.3.3 Iterationsverfahren/ Simulation mehrerer aufeinanderfolgender Zeitpunkte

Für das vorgestellte Knotenspannungsverfahren werden als Eingangsgröße die von den Zügen angeforderten Ströme anhand deren Leistung und der am Stromabnehmer anliegenden Spannung ermittelt. Die Spannungen selbst müssen dazu bekannt sein, hängen aber wiederum von den bezogenen Leistungen ab. Um dieses „Henne-Ei-Problem“ zu lösen, wird im Allgemeinen ein Iterationsverfahren durchgeführt, das mit einem Vektor von geschätzten Spannungen an den Zügen als Startlösung beginnt, mit denen eine erste Näherung für die Zugströme bestimmt werden kann.

Im nächsten Iterationsschritt werden dann die im ersten Schritt ermittelten Spannungen eingesetzt, so dass sich eine bessere Näherung für die von den Zügen bezogenen Ströme ergibt. Liegen die Spannungen von zwei aufeinanderfolgenden Iterationsschritten nur minimal auseinander, so kann der erreichte Zustand als stabil betrachtet und der Iterationszyklus an dieser Stelle abgebrochen werden.

Das gesamte Verfahren ist in einem Ablaufplan in Abb. 7.8 dargestellt, in dem auch die Nichtlinearitäten beim Betreiben der Unterwerke in Sperrrichtung und das elektrische Verlustbremsen berücksichtigt sind.

Der beschriebene Algorithmus muss immer dann angewendet werden, wenn sich die Konfiguration von Positionen und Leistungen der Züge ändert. Da dies praktisch quasi kontinuierlich der Fall ist, wird in den meisten Simulationsprogrammen ein Abtastintervall von 1 s verwendet, d.h. pro Sekunde wird eine Lastfluss-Berechnung für das Netz der Bahnenergieversorgung durchgeführt. Für die in dieser Arbeit durchzuführenden Berechnungen soll dies ebenfalls so realisiert werden. Zusätzlich sollen die Umschaltvorgänge (Abschalten nach Antrieb, Beginn des Bremsens, etc.) noch exakter modelliert werden, indem für den Umschaltzeitpunkt (in dem sich

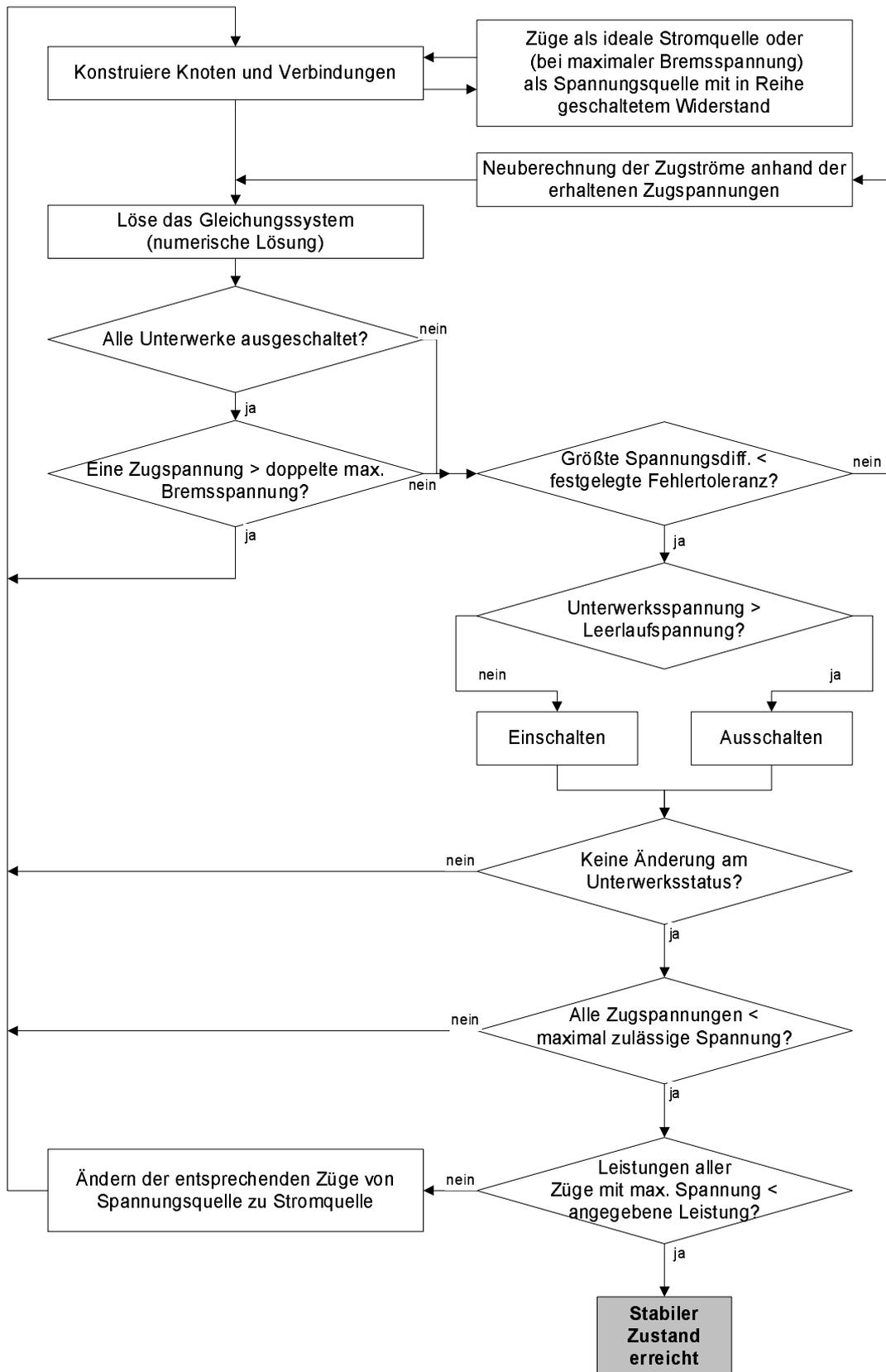


Abbildung 7.8: Ablaufbeschreibung für das Verfahren zur Simulation des Anlagen der Bahnenergieversorgung (aus [26])

der Zug noch im vorigen Fahrregime befindet) und einen sehr kurz darauf folgenden Zeitpunkt (in dem der Zug das nächste Fahrregime anwendet) ebenfalls die Anlagen der Bahnenergieversorgung simuliert werden.

Bei der sukzessiven Berechnung mehrerer, aufeinanderfolgender Zeitpunkte kann i.A. die im letzten Zeitpunkt ermittelte Konfiguration der Unterwerke (Leistungsabgabe oder Sperrzustand) sowie der dort ermittelte Spannungsvektor als Initiallösung für den nächsten Zeitpunkt verwendet werden.

## 7.4.4 Ermittlung der die Energiekosten bestimmenden Faktoren

### 7.4.4.1 Systemenergieverbrauch

Der Energieverbrauch ab Unterwerk, der in dieser Arbeit als Systemenergieverbrauch bezeichnet wird, entspricht dem Integral der dort gemessenen Leistung über der Zeit.

$$E = \int P(t)dt \quad (7.33)$$

### 7.4.4.2 Mittelwert der Leistung über einem gegebenem Zeitintervall

Für die Ermittlung des Mittelwerts einer elektrischen Größe wird in der Regel der Effektivwert betrachtet, der sich als quadratischer Mittelwert des zeitlichen Verlaufs der Dauer  $t_m$  ergibt [147]:

$$P_{eff}(t_m) = \sqrt{\frac{1}{t_m} \int_0^{t_m} P(t)^2 dt} \quad (7.34)$$

Die Anwendung dieser Leistung  $P_{eff}$  während einer Dauer von  $t_m$  hätte die selben thermischen Beanspruchungen zur Folge, wie diese durch den variablen Verlauf von  $P$  erzeugt werden.

Um aus dem gemessenen Verlauf einer Leistungsgröße den maximalen Wert der Effektivleistung für ein gegebenes Zeitintervall herauszufinden, wird das Verfahren zur Bestimmung der zeitgewichteten Belastungsdauerkurve verwendet [83, 139].

Dabei wird über das gesamte gemessene Zeitintervall der Länge  $t_m$  ein Fenster mit der Intervallbreite  $t^*$  verschoben, innerhalb dessen die Effektivleistung ermittelt wird. Die Intervallbreite  $t^*$  entspricht dabei dem zu untersuchenden Abrechnungsintervall, bei der Ermittlung der Viertelstundenleistung (Abrechnungsgröße in Deutschland) ist mit  $t^* = 15$  min zu rechnen.

$$P_{max,eff}(t^*) = \max_{x \in [0; t_m - t^*]} \left( \sqrt{\frac{1}{t^*} \int_x^{x+t^*} P(t)^2 dt} \right) \quad (7.35)$$

#### 7.4.4.3 Rückspeisegrade

KLINGE und RÖHLIG benennen in ihrem Aufsatz [95] zwei Größen, die eine Aussage dazu erlauben, wie gut ein Energieversorgungsnetz für die Aufnahme von Bremsenergie geeignet ist.

Der netzbezogene Nutzbremswirkungsgrad  $\zeta_{Netz}$  wird definiert als Quotient aus abgegebener und verfügbarer Bremsenergie.

$$\zeta_{Netz} = \frac{\text{abgegebene Bremsenergie}}{\text{verfügbare Bremsenergie}} = \frac{E_{ab}}{E_{verf}} \quad (7.36)$$

Dieser in der Realität nicht messbare, aber in Simulationsprogrammen ermittelbare Wert erlaubt in erster Linie Rückschlüsse auf die Eignung eines Netzes zur Rückspeisung. Kleine Werte (um 40 %) weisen laut KLINGE und RÖHLIG entweder auf eine zu geringe Verfügbarkeit von Verbrauchern rückgespeister Energie, z. B. bei zu großen Zugfolgezeiten, oder eine ungeeignete Konfiguration der Anlagen der Bahnenergieversorgung hin. Bei Werten größer als 70 % ist das Netz nahezu optimal für die Nutzung rückgespeister Energie gestaltet.

Der Systemrückspeisegrad wird definiert als Quotient aus abgegebener Bremsenergie und gesamter aufgenommener Energie, also der Summe aus abgegebener Energie aller Unterwerke  $E_{Uw}$  und der abgegebenen Bremsenergie  $E_{ab}$ .

$$\zeta_{Sys} = \frac{\text{abgegebene Bremsenergie}}{\text{gesamte aufgenommene Energie}} = \frac{E_{ab}}{E_{ab} + E_{Uw}} \quad (7.37)$$

Durch den Systemrückspeisegrad, der sich ebenfalls nur mit Simulationsrechnungen bestimmen lässt, lassen sich für den Betreiber Rückschlüsse auf mögliche Einsparungen durch Nutzung der rückgespeisten Bremsenergie abschätzen.

Obwohl die von KLINGE und RÖHLIG definierten Größen keinen Einfluss auf die Energiekosten haben, stellen sie ein gutes Mittel dar, die bei der Systembetrachtung auftretenden Erscheinungen zu erklären und sollen deswegen hier weiterhin verwendet werden.

#### 7.4.4.4 Andere Gütekriterien

Ein weiteres Gütekriterium aus Sicht eines Bahnbetriebs könnte die minimale Spannung am Zug sein, die nicht unterhalb vorgegebener Grenzen liegen soll. ERBIN und SOULAS weisen z.B. in [54] darauf hin, dass bei dem vollautomatisch betriebenen System VAL in Lille 18 Prozent der fahrzeugbedingten Verspätungen auf zu niedrige Spannungen zurückzuführen sind.

In anderen Veröffentlichungen [36, 173] wird als Optimierungsziel eine möglichst gleichmäßige Belastung aller Unterwerke angestrebt.



## 8 Flexibilisierung und Synchronisierung von Anfahr- und Bremsvorgängen mit Hilfe Genetischer Algorithmen

In diesem Kapitel soll gezeigt werden, wie durch optimale Gestaltung eines Fahrplans Energiekosten gesenkt und die Gefahr von Störungen durch Spannungszusammenbrüche reduziert werden können. Dabei wird sich zunächst auf die Analyse des flexiblen Betriebs auf einzelnen Linien beschränkt. Eine typische Tagesganglinie der Zugfolgezeit ist in Abb. 1.9 dargestellt (vgl. auch Abb. 1.4). Es lassen sich zwei Betriebsphasen feststellen:

1. Phasen, in denen Züge mit konstanter Zugfolgezeit verkehren sowie
2. Phasen, in denen ein Übergang zwischen zwei aufeinanderfolgenden Zugfolgezeiten realisiert wird.

Beide Phasen können in der Optimierung getrennt betrachtet werden, bei der Betrachtung eines vollständigen Betriebstags sollte entsprechend dieser Phaseneinteilung schrittweise vorgegangen werden.

Da Phasen konstanter Zugfolgezeit auch bei flexiblen Bahnen den Tagesverlauf bestimmen, wird deren Optimierung in einem ersten Abschnitt vertieft untersucht. Als Steuergrößen für diese Phase sollen Fahr- und Haltezeitreserven vorgeschlagen werden.

Anschließend können Übergänge zwischen den Zugfolgezeiten in die Optimierung einbezogen werden. Hier haben insbesondere die Zugfolgezeiten der den Übergang realisierenden Fahrten Einfluss auf die Güte der Synchronisierung zwischen Anfahr- und Bremsvorgängen, wie dies durch praktische Erfahrungen bestätigt wird<sup>1</sup>. Die energieorientierte Gestaltung solcher Übergänge wird deshalb in einem weiteren Abschnitt dieses Kapitels betrachtet.

**Im Gegensatz zum hier zu behandelnden flexiblen Betrieb besteht der konventionelle Taktbetrieb fast ausschließlich aus Phasen mit konstanter Zugfolgezeit.** Er kann deshalb als Sonderfall des flexiblen Betriebs betrachtet werden.

Die Erschließbarkeit der Potenziale hängt stark von der Präzision der Zugsteuerung ab: Da die koordinierte Steuerung von Anfahr- und Bremsvorgängen im Sekundenbereich angesiedelt ist, kann bei vollautomatischer Zugsteuerung das vorhandene Optimierungspotenzial voll erschlossen werden. Bei manueller Fahrzeugführung ist die mögliche Präzision bei der Einhaltung von

---

<sup>1</sup>Nach Aussage der Betreiber gibt es bei den Übergängen zwischen aufeinanderfolgenden Zugfolgezeiten häufig Probleme durch hohe Leistungsspitzen [53].

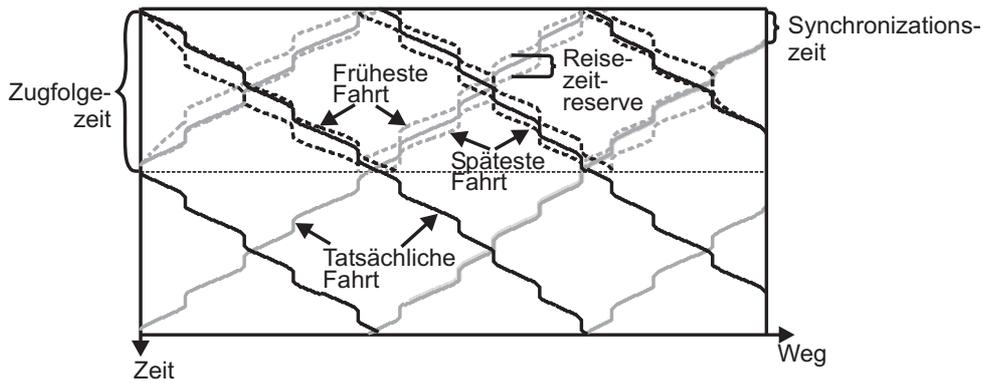


Abbildung 8.1: Bildfahrplan mit der Darstellung aller Parameter bei konstanten Zugfolgezeiten

Fahr- und Haltezeiten nicht ausreichend, um eine sekundengenaue Synchronisierung zwischen Anfahr- und Bremsvorgängen zu garantieren. Erst durch Einführung eines Fahrerassistenzsystems (vgl. Abb. 1.2) mit hoher Befolgungsrate der dort gegebenen Anweisungen ist auch bei manueller Zugsteuerung das zumindest teilweise Erschließen dieser Potenziale möglich (vgl. Portfolio in Abb. 1.3).

## 8.1 Reduktion von Energiekosten in Phasen mit konstanter Zugfolgezeit

### 8.1.1 Festlegung der zu optimierenden Größen

Ein Fahrplan, bei dem Züge in jeder Fahrtrichtung mit konstanten Intervallen verkehren (vgl. Abb. 8.1) ist eindeutig durch vier Parameter gekennzeichnet:

- Zugfolgezeit  $T$
- Synchronisationszeit oder Versatz (Unterschied der Abfahrtszeit der beiden Fahrtrichtungen in Bezug auf eine Zugfolgezeit)
- Fahrzeiten auf den einzelnen Abschnitten
- Haltezeiten an den einzelnen Haltepunkten

Die Zugfolgezeit wird im flexiblen Betrieb anhand des vorliegenden Verkehrsaufkommens ermittelt und stellt daher einen fixen Eingangsparameter für die Optimierung dar. Die Synchronisationszeit hat Einfluss auf die zur Durchführung eines Fahrplans notwendige Zahl Fahrzeuge sowie (bei langen Zugfolgezeiten) auch auf die Qualität von Anschlüssen zu anderen Linien [110]. Auch sie soll deshalb im Sinne eines Parameters für die Optimierung von Energiekosten betrachtet werden. Die in diesem Abschnitt zu beantwortende Frage lautet daher:

**Wie müssen Fahr- und Haltezeiten bei gegebener Zugfolge- und Synchronisationszeit gewählt werden, damit die Energiekosten minimal werden?**

Dabei soll davon ausgegangen werden, dass für jede Zugfahrt einer Richtung immer der selbe Fahrplan gilt, d.h. die selben Fahr- und Haltezeiten. Abweichende Verfahrensweisen sind in der Praxis durchaus anzutreffen, sollen aber hier ohne Beschränkung der Allgemeinheit nicht betrachtet werden.

Die zur Ermittlung der Gütefunktion Energiekosten (d.h. Systemenergieverbrauch, maximale Effektivleistung, vgl. Abschnitt 7.1) notwendige Rechenarbeit lässt sich durch die konstante Zugfolgezeit und damit auftretende Periodizität stark begrenzen: Da nach Ablauf der Zugfolgezeit auf der Strecke genau die selbe Konstellation aus Position und Leistungsanforderung der Züge vorzufinden ist, müssen die Netzberechnungen ausschließlich für die Dauer einer Zugfolgezeit erfolgen.

Bei Zugfolgezeiten, die größer als das Zeitintervall zur Mittelwertbildung der Leistung sind, erfolgt die Berechnung der maximalen Effektivleistung wie im Abschnitt 7.4.4 beschrieben. Ist die Zugfolgezeit geringer als das entsprechende Messintervall, so vereinfacht sich die Berechnung, wie in Abb. 8.2 skizziert ist. Wenn die Zeitperiode  $t^*$  (im Beispiel 10 min) die Zugfolgezeit  $T$   $n$ -mal enthält (im Beispiel  $T = 3$  min,  $n = 3$ ), dann vereinfacht sich Gl. (7.35) zu

$$P_{max,eff}(t^*) = \sqrt{\frac{1}{t^*} \left( n \int_{t=0}^T P(t)^2 dt + \max_{x \in [0;T]} \left( \int_{t=x}^{x+t^*-nT} P(t)^2 dt \right) \right)} \quad (8.1)$$

mit

$$P(t \geq T) = P(t - T). \quad (8.2)$$

Ist das betrachtete Zeitintervall für die Mittelwertbildung gar ein ganzzahliges Vielfaches der Zugfolgezeit (für das oben angegebene Beispiel des 10-min-Intervalls Zugfolgezeiten von 1, 2 und 5 min), so wird der zweite Term aus Gl. (8.1) zu null. Die Effektivleistung im Abrechnungsintervall entspricht dann exakt der Effektivleistung während einer Zugfolgezeit.

## 8.1.2 Ermittlung optimaler Fahrzeiten

### 8.1.2.1 Darstellung des Problems und die Größe des Suchraums

Die Ermittlung optimaler Fahrzeiten für eine Fahrt entlang einer Strecke, mit der bei gegebener Abfahrtszeit am Startbahnhof und gegebener Ankunftszeit im Ziel ein Optimierungskriterium bestmöglich erfüllt wird, ist eine Frage der Verteilung der für die gesamte Strecke vorgesehenen Fahrzeitreserve auf die einzelnen Abschnitte. Diese Fahrzeitreserve ergibt sich als Differenz von geplanter und minimaler Fahrzeit auf einem Streckenabschnitt und sollte üblicherweise zwischen 3 und 7% der gemessenen oder simulierten Dauer der zeitoptimalen Fahrt betragen, doch sind das nur grobe Richtwerte.

Die Anzahl möglicher Verteilungen von Fahrzeitreserve  $n$  auf einer Strecke ist abhängig von

- der Zahl der befahrenen Abschnitte  $N$  mit  $N > 1$ ,

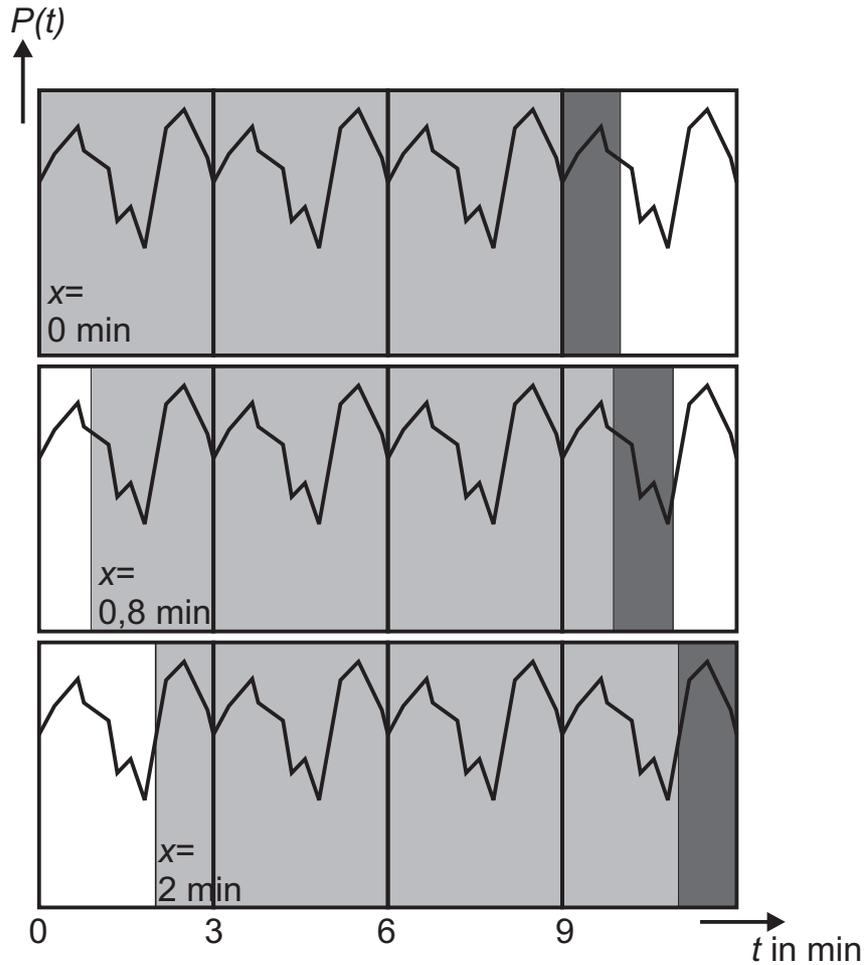


Abbildung 8.2: Berechnung der mittleren Unterwerksleistung ( $t^*=10$  min) bei einer Zugfolgezeit von  $T = 3$  min

- der Anzahl möglicher Fahrzeiten pro Streckenabschnitt  $z$  mit  $z \geq 1$ .

Sie lässt sich anschaulich als Zufallsversuch erläutern, in dem für  $z$  Einheiten Fahrzeitreserve einer aus  $N$  Abschnitten ausgewählt werden muss, auf dem diese Einheit Verwendung finden soll. Dabei spielt ausschließlich die Häufigkeit eine Rolle, mit der ein Abschnitt ausgewählt wurde. Mit Hilfe der Kombinatorik lässt sich die Zahl alternativer Verteilungen  $n$  als Anzahl Kombinationen mit Wiederholung beschreiben, wenn für alle Streckenabschnitte die gleiche Zahl unterschiedlicher Fahrweisen verfügbar ist.

$$n = \binom{N + z - 1}{z} = \frac{(N + z - 1)!}{z!(N - 1)!}. \quad (8.3)$$

Für ein einfaches Problem mit zehn Halten und 61 Zuständen pro Halt (Fahrzeitreserve von 60 s für die Gesamtstrecke führt zu möglichen Fahrzeitreserven pro Abschnitt zwischen 0 und 60 s und bei einer Diskretisierung von 1 s damit zu 61 möglichen Fahrweisen auf jedem Abschnitt) erhält man 7 392 009 768, d.h. mehr als 7 Milliarden, verschiedene mögliche Fahrpläne.

Die Größe des Suchraums steigt bei einer nur geringen Erhöhung der Zahl der Abschnitte oder der Größe der Fahrzeitreserve dramatisch an: erhöht man beides etwa um ein Viertel (13 Abschnitte und 72 s Fahrzeitreserve) ergibt sich eine Vergrößerung des Suchraums um den Faktor 10 000 auf etwa  $10^{14}$ .

### 8.1.2.2 Ermittlung von Fahrzeiten für minimalen Traktionsenergieverbrauch eines einzelnen Zuges [4, 7, 123, 125]

Zur Ermittlung energiekostenminimierender Fahrpläne für ein System von Zügen sollte ein Fahrplan eine gute Ausgangslösung darstellen, mit dem ein einzelner Zug seine gesamte Fahrtstrecke mit minimalem Traktionsenergieverbrauch zurücklegen kann. Eine optimale Lösung für dieses Problem kann mit Hilfe der Dynamischen Programmierung von BELLMAN [18] ermittelt werden, wie bereits in den 1970er Jahren von HORN und STROBEL [86] vorgeschlagen wurde. Erst durch die Verfügbarkeit moderner Rechentechnik ist eine praktische Anwendung dieses Verfahrens auch für die Online-Regelung bei einfachen Gütefunktionen möglich [4, 7, 123, 124, 126].

Die Zuglaufoptimierung über mehrere Abschnitte kann als diskreter Entscheidungsprozess angesehen werden. In jedem Haltepunkt  $k$  (insgesamt endliche Zahl  $N + 1$  der Haltepunkte, d.h. der Prozess ist diskret) muss für den Zustand  $x(k)$ , d.h. den Zeitpunkt der Abfahrt des Zuges, entschieden werden, mit welcher Fahrzeit  $u(k)$  bis zum nächsten Haltepunkt gefahren wird. Mit der getroffenen Entscheidung steht die Fahrweise des Zuges und die dafür benötigte Traktionsenergie  $f_0(k, u(k))$  fest, mit der in den neuen Zustand  $x(k + 1)$  gelangt wird (siehe auch Abb. 8.3). Damit handelt es sich also um einen deterministischen Prozess. Der Traktionsenergieverbrauch von einem Zustand bis ins Ziel hängt ausschließlich vom Zustand selbst und von den bis ins Ziel zu tätigen Entscheidungen ab, womit auch die für die Anwendbarkeit der Dynamischen Programmierung notwendige MARKOFF-Eigenschaft des Prozesses [18] erfüllt ist.

Um eine endliche Zahl möglicher Fahrzeiten und Ankunftszeiten zu erhalten, muss für jeden Halt eine Diskretisierung möglicher Ankunftszeiten erfolgen. Es lässt sich leicht zeigen, dass hierfür ein konstantes Diskretisierungsintervall am besten geeignet ist.

Die Anwendung des Verfahrens ist in Abb. 8.4 in Form eines Bildfahrplans dargestellt, wobei die Haltezeiten nicht berücksichtigt sind.

Randbedingungen sind in dem gewählten Beispiel die Abfahrtszeit 0 und die Ankunftszeit  $t_{RZ}$ . Aus diesen ergibt sich die Fahrzeitreserve für die Gesamtstrecke zwischen Start und Ziel. In jedem Halt besteht die Möglichkeit, zwischen mehreren Fahrten auszuwählen. Es kann auf einer Fahrt zwischen zwei Halten die gesamte Fahrzeitreserve, ein Teil davon oder keine Fahrzeitreserve verbraucht werden (zeitoptimale Fahrt). An den Halten 1, 2, 3 und 4 muss eine Entscheidung so getroffen werden, dass insgesamt der Traktionsenergieverbrauch minimal wird. Der Raum möglicher Trajektorien wird durch die schnellste Fahrt (gesamte Fahrzeitreserve wird erst im letzten Teilabschnitt verbraucht) und die langsamste Fahrt (gesamte Fahrzeitreserve wird im ersten Teilabschnitt verbraucht) eingegrenzt.

Die Optimierung mit Hilfe der Dynamischen Programmierung wird vom Ende beginnend durchgeführt, d.h. zunächst für den Halt  $N$  und alle dort möglichen Ankunftszeiten  $x(k)$ , an-

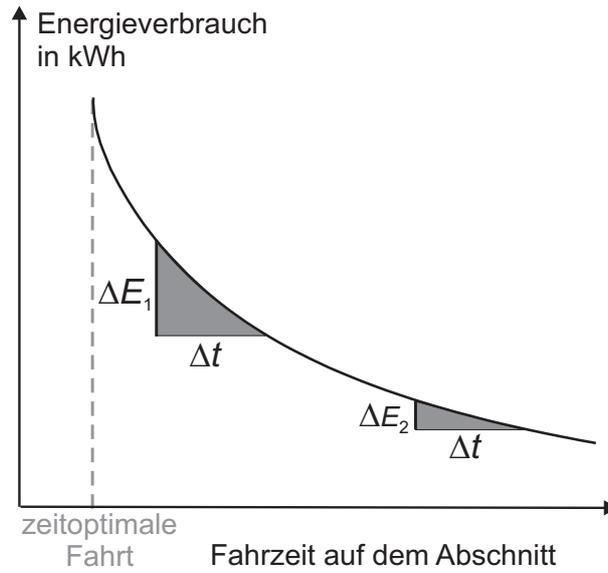


Abbildung 8.3: Zusammenhang von Fahrzeit und Traktionsenergieverbrauch des einzelnen Zuges

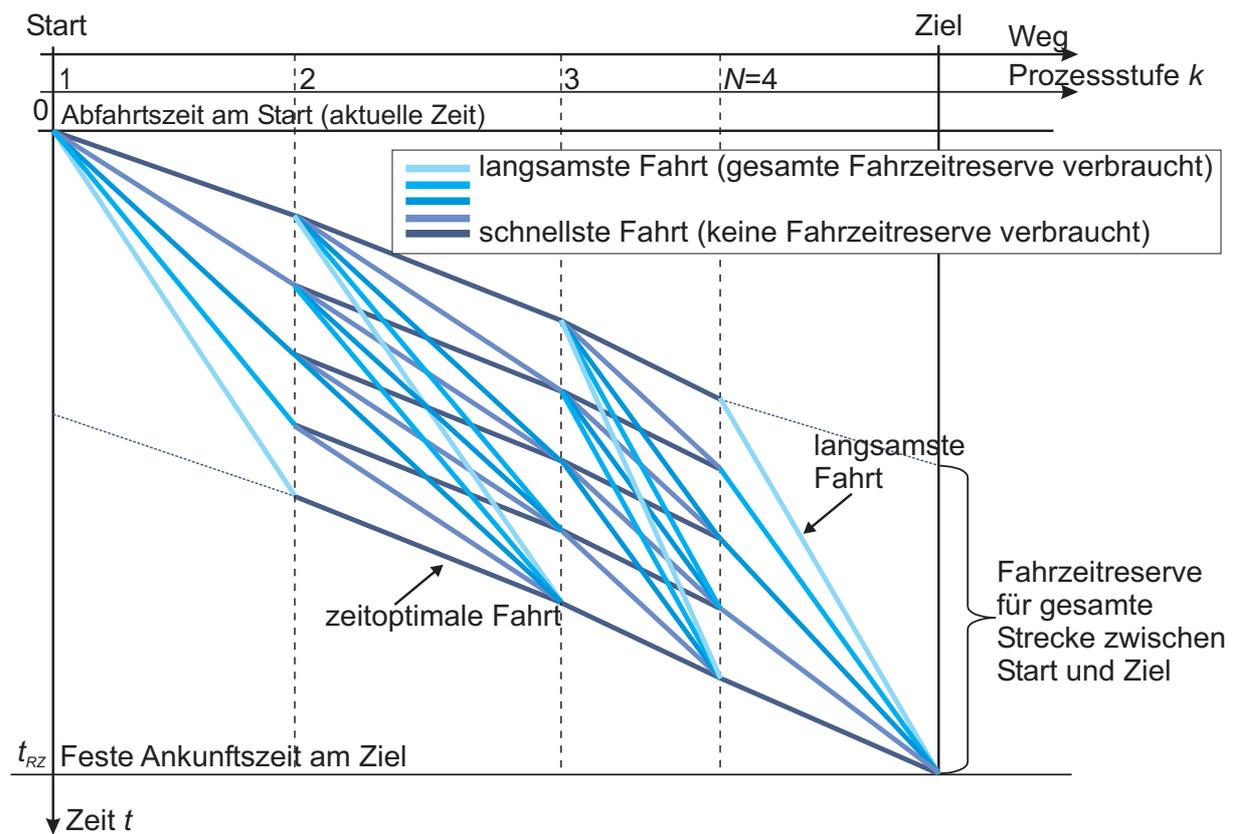


Abbildung 8.4: Dynamische Programmierung als vereinfachter Bildfahrplan unter Vernachlässigung der Haltezeiten

schließlich für den Halt  $N - 1$  usw. Für jeden Zustand wird aus allen möglichen Entscheidungsalternativen diejenige gewählt, bei der die Summe aus dem Traktionsenergieverbrauch auf der nächsten Teilstrecke und der vom nächsten Halt bis ins Ziel verbrauchten Traktionsenergie ein Minimum annimmt.

Als Ergebnis erhält man eine Entscheidungsmatrix, in der für jeden Zustand der Fahrplan mit minimalem Traktionsenergieverbrauch bis ins Ziel enthalten ist.

### 8.1.2.3 Ermittlung optimaler Fahrzeiten für ein System von Zügen mit Hilfe Genetischer Algorithmen [5, 6]

Bei der Optimierung eines Systems von Zügen müssen Fahrzeiten mehrerer Züge gleichzeitig betrachtet werden. Der Einsatz der Dynamischen Programmierung zur optimalen Verteilung von Fahrzeitreserven, wie er für die Betrachtung eines einzelnen Zuges im vorigen Abschnitt dargestellt wurde, ist dann nicht mehr möglich, da dieses Problem sich nicht in mehrere, voneinander unabhängige Prozessstufen gliedern lässt, wie anhand folgender zwei Punkte begründet werden kann:

Erstens erfolgt die Ermittlung des Gütekriteriums immer unter Einbeziehung beider Fahrtrichtungen. Zweitens werden zur Ermittlung der Gütefunktion für einen bestimmten Zug zu einem bestimmten Zeitpunkt die Positionen anderer Züge, die in der selben Richtung mit dem selben Fahrplan verkehren, und deren Leistung berücksichtigt. So finden in dem in Abb. 8.5 illustrierten Beispiel gleichzeitig Zugfahrten mit dem selben (unbekannten) Fahrplan auf den Abschnitten 1, 5 und 8 statt. Damit hängt der Wert des Gütekriteriums nicht ausschließlich vom erreichten Zustand des Prozesses (von der Abfahrtszeit auf den Abschnitt 8) und den noch zu treffenden Entscheidungen, sondern in diesem Fall auch von den bereits zum Erreichen dieses Zustands getroffenen Entscheidungen ab (von der Fahrweise auf den Abschnitten 1 und 5), d.h. von der Verteilung der Fahrzeitreserve auf den bisherigen Abschnitten und nicht ausschließlich von der Größe der Fahrzeitreserve.

**Die MARKOFF-Eigenschaft, die Voraussetzung für die Anwendung der Dynamischen Programmierung ist [18], wird damit verletzt.**

Unter Anleitung des Verfassers dieser Arbeit hat LEHNERT in [109] gezeigt, dass es mit der wiederholten, zyklischen Anwendung der Dynamischen Programmierung möglich ist, ein System von Zügen bezüglich der Energiekosten zu minimieren. Dabei lässt sich allerdings nicht berücksichtigen, dass aufeinanderfolgende Zugfahrten mit dem selben Fahrplan entlang einer Strecke verkehren sollten.

Da eine solche Randbedingung praktisch von sehr hoher Relevanz ist, wird für die optimale Verteilung von Fahrzeitreserve bei Betrachtung eines Systems von Zügen die Anwendung Genetischer Algorithmen vorgeschlagen.

Die Steuervariable, nämlich die den einzelnen Abschnitten zuzuordnenden Fahrzeitreserven, ist dafür auf einem Chromosom zu kodieren. Die Summe aller auf allen Abschnitten verbrauchten Fahrzeitreserven muss dabei gleich der für die Gesamtstrecke vorhandenen Fahrzeitreserve sein. Um diese Randbedingung realisieren zu können, wird folgende Kodierung vorgeschlagen, die auch in Abb. 8.6 erläutert wird.

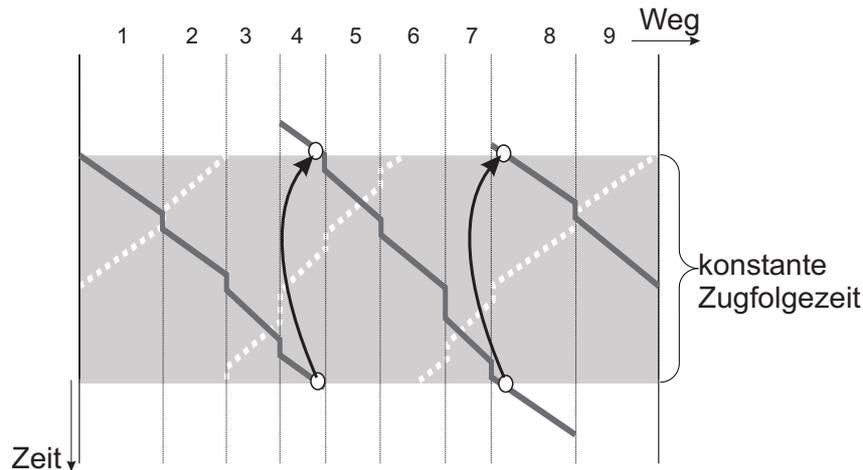


Abbildung 8.5: Verknüpfung aufeinanderfolgender Fahrten im Taktfahrplan

Die gesamte, zur Verfügung stehende Fahrzeitreserve wird in Einheiten unterteilt. Die Größe einer Einheit sollte der Genauigkeit der Zugsteuerung entsprechen, in Abb. 8.6 wird wie bei den realisierten Fallstudien als maximale Genauigkeit ein Diskretisierungsintervall von 1 s verwendet. Jeder dieser Einheiten ist ein Gen auf dem Chromosom zugewiesen. Inhalt des Gens ist die Nummer des Streckenabschnitts, auf dem diese Einheit Fahrzeitreserve angewendet werden soll. Zur Dekodierung wird die Anzahl des Vorkommens jeder Abschnittsnummer auf dem Chromosom gezählt, diese entspricht dann der Anzahl Einheiten der Fahrzeitreserve, die auf dem entsprechenden Abschnitt eingesetzt werden soll.

Mit Hilfe dieser Beschreibung lässt sich anschaulich die Zahl der möglichen Fahrpläne entwickeln, wie sie in Abschnitt 8.1.2.1 dargelegt wurde.

Jeder mögliche Fahrplan kann, wie in Abb. 8.6 dargestellt, durch verschiedene Chromosomen dargestellt werden. Die Zahl möglicher Darstellungen hängt von der Lösung selbst ab: Sie ist binomial verteilt und ist somit 1 für Lösungen, bei denen sämtliche Reserve auf einen Abschnitt verteilt wird, und maximal bei Gleichverteilung der Reserve auf die einzelnen Abschnitte.

Bei zufälliger Erzeugung der Anfangspopulation, wie dies beim Einsatz Genetischer Algorithmen üblich ist, werden daher hauptsächlich Lösungen mit etwa gleich verteilter Reserve entstehen. Dies kommt einerseits dem Grundsatz entgegen, aus betrieblicher Sicht die Reserven relativ gleichmäßig zu verteilen, um jederzeit auf Verspätungen reagieren zu können, andererseits sind solche Fahrpläne im allgemeinen durch einen relativ niedrigen Traktionsenergieverbrauch gekennzeichnet, stellen daher also gute Ausgangslösungen für das hier untersuchte Problem dar.

Um mögliche betriebliche Randbedingungen zu realisieren, kann für jedes Gen ein Abschnitt als untere und obere Grenze festgelegt werden, zwischen denen die entsprechende Einheit Fahrzeitreserve verteilt werden darf und muss. Eine mögliche derartige Randbedingung wäre, pro Fahrtrichtung in etwa die selbe Reserve zu verteilen. Innerhalb einer Richtung kann es wünschenswert sein, die Größe der auf die ersten Abschnitte zu verteilenden Fahrzeitreserve zu begrenzen (so dass auf den letzten Abschnitten genügend Möglichkeiten zum Aufholen von

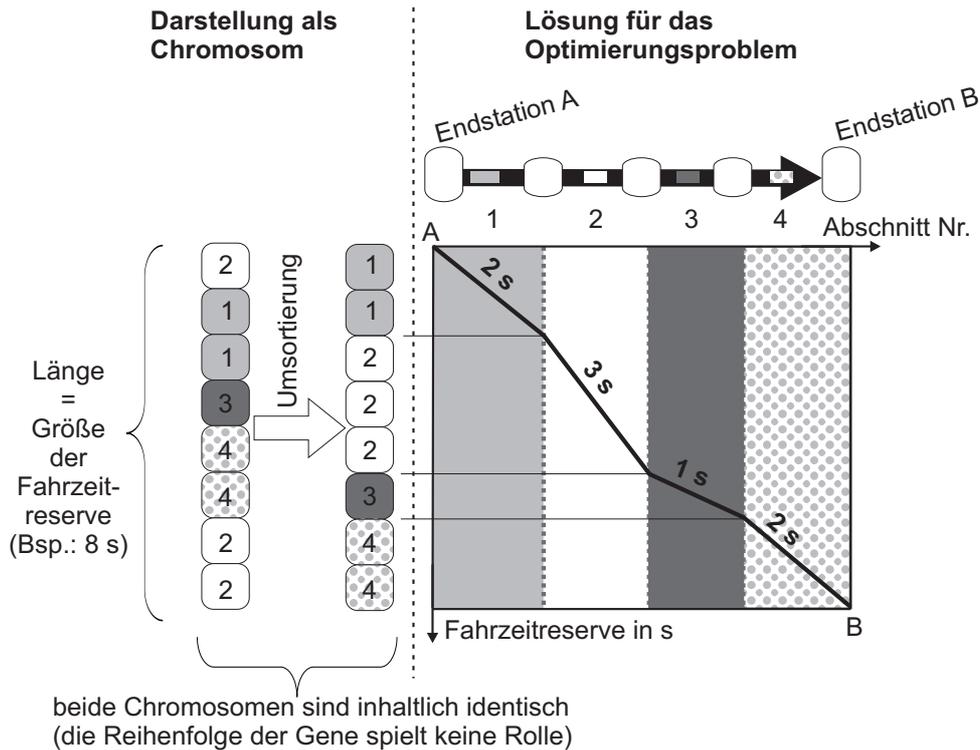


Abbildung 8.6: Dekodierung des Chromosoms für ein einfaches Beispiel (Verteilung von 8 s Fahrzeitreserve auf 4 Abschnitte)

Verspätungen bestehen). Dazu müsste sich ein Betreiber festlegen, wieviel Reserve auf wieviele Abschnitte der Strecke verteilt werden soll. Andere Zwangspunkte, z.B. die exakt pünktliche Ankunft an einem Bahnhof in der Mitte der Strecke, können ebenfalls berücksichtigt werden.

Eine Übersicht über verschiedene Einflussmöglichkeiten und der damit verbundenen Festlegung von unterer und oberer Grenze ist für eine einfache Strecke in Tabelle 8.1 aufgelistet. Dort wird ebenfalls deutlich, welchen reduzierenden Einfluss sinnvolle Beschränkungen auf die Größe des Suchraums aufweisen. Die angegebenen Beispiele sind zusammen mit den Einschränkungen für den Suchraum und einer Streckenskizze in Abb. 8.7 grafisch veranschaulicht.

### 8.1.3 Ermittlung optimaler Haltezeiten: Optimale Verteilung von Haltezeitreserve

Bei einer Modifikation von Haltezeiten ändert sich nicht wie bei der Verteilung der Fahrzeitreserven der Traktionsenergieverbrauch des einzelnen Zuges. Mit dieser Steuergröße kann nur der Beginn des auf den Halt folgenden Beschleunigungsvorgangs sowie die Größe der an diesem Halt für die Grundlast des Zuges angeforderten Energie beeinflusst werden. Damit ist diese Steuergröße als weniger mächtig als die Steuergröße Fahrzeit anzusehen. Bei einigen Unternehmen können deshalb Haltezeitreserven als Fahrzeitreserven genutzt werden, z.B. bei dem Verfahren „Fahren auf Ankunft“, das bei der Hamburger Hochbahn eingesetzt wird [90].

	Art der Restriktion	Grenzen										Beispiel										Größe des Suchraums
1	keine (völlig freie Verteilung)	1 12	1 12	1 12	3 12	1 1	8 6	1 7	10 11	352 716												
2	Verteilung der gleichen Reserve pro Fahrtrichtung	1 6	1 6	1 6	1 6	1 6	7 12	7 12	7 12	7 12	7 12	3 2	1 1	5 9	7 7	10 11	63 504					
3	Kombination aus richtungsweiser und freier Verteilung	1 6	1 6	1 6	7 12	7 12	7 12	1 12	1 12	1 12	1 12	3 2	5 8	7 12	4 11	12 1	204 568					
4	nur 50% Fzr auf der 1. Hälfte je Richtung	1 3	1 3	4 6	4 6	4 6	7 9	7 9	10 12	10 12	10 12	2 3	6 4	4 4	7 9	12 10	11	3600				

Tabelle 8.1: Beachtung möglicher Restriktionen bei der Festlegung von Grenzen für die Kodierung (Verteilung von 10 s Fahrzeitreserve auf eine Strecke mit 6 Abschnitten pro Fahrtrichtung = 12 Abschnitte insgesamt (vgl. Abb. 8.7))

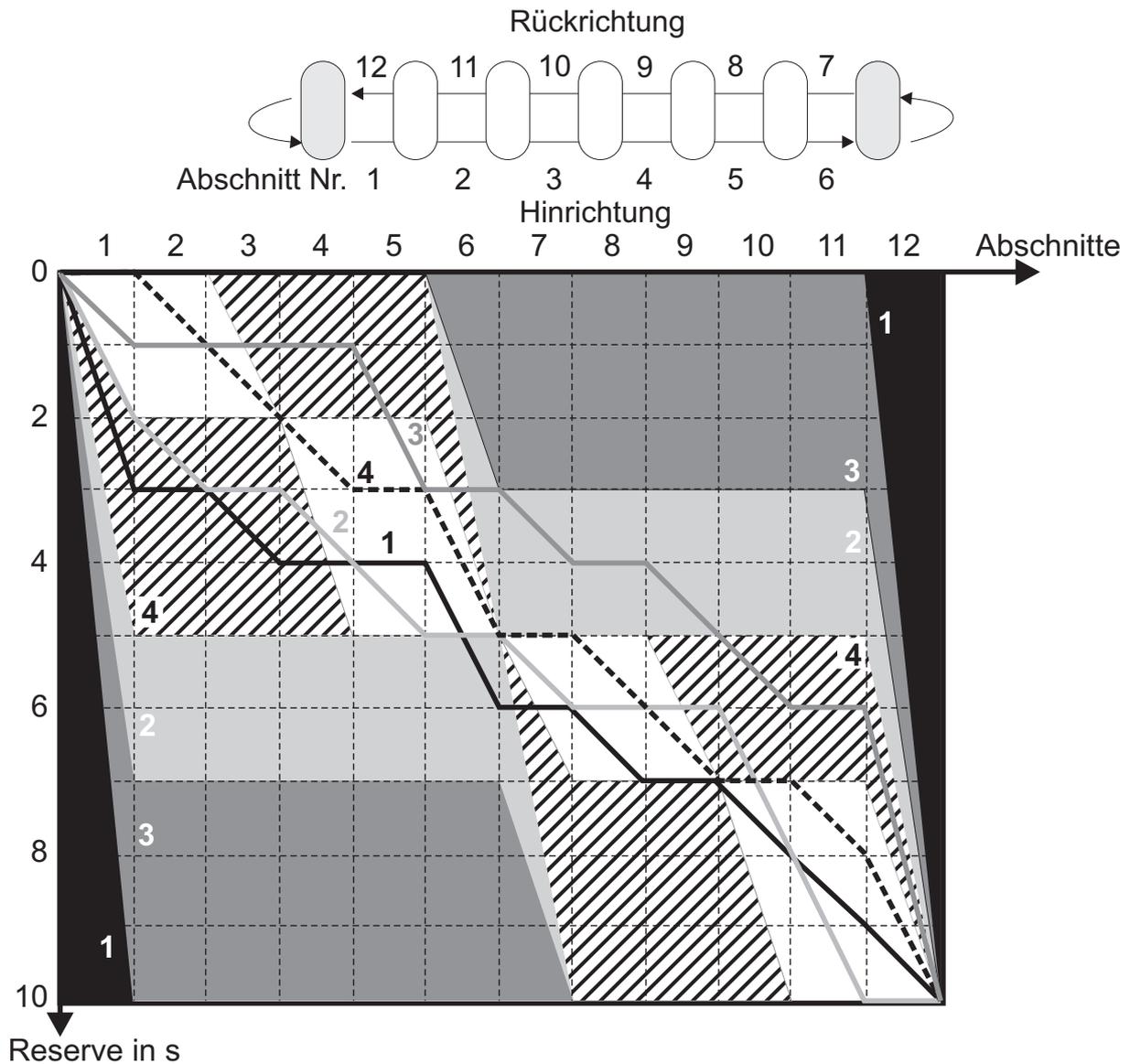


Abbildung 8.7: Darstellung möglicher Suchräume und Lösungen für die Verteilung von Reserve entlang einer Strecke am Beispiel der vier Fälle aus Tabelle 8.1

Bei vollautomatischen Bahnen wird i.A. eine feste Haltezeit vorgegeben, die nie unterschritten wird. Hier kann eine Nutzung des zusätzlichen Potenzials der Umwandlung von Haltezeitreserven in Fahrzeitreserven zur Reduktion des Traktionsenergieverbrauchs nicht genutzt werden. Eine optimale Verteilung der Haltezeitreserven zur Flexibilisierung und Synchronisierung von Anfahr- und Bremsvorgängen ist hier aber ebenfalls möglich.

Die Haltezeiten an den einzelnen Stationen werden im wesentlichen durch die Dauer des Fahrgastwechsels bestimmt. Für die Metro in Lille wurde in [56] erläutert, dass bei flexiblem Betrieb mit teilweise sehr kurzen Zugfolgezeiten die Anzahl Fahrgäste an Bord zwischen zwei aufeinanderfolgenden Zügen stark schwanken kann: Je geringer die Zugfolgezeit ist, desto stärker treten diese Schwankungen auf. Naturgemäß variiert damit auch die notwendige Aufenthaltsdauer an

den einzelnen Haltepunkten sehr stark. Deshalb wird zur Ermittlung der Mindesthaltezeit bei der Metro in Lille die Zeit verwendet, zu der 95% der Fahrgäste sicher an Bord gelangt sind (d.h. in 5% der Fälle kann ein Fahrgast durch die sich schließende Bahnsteigtür aufgehalten werden). Diese 95%-Marke ist u.a. abhängig von der Struktur des Eintreffens, d.h. ob sich die Fahrgäste hauptsächlich aus Gruppen, Paaren oder Einzelreisenden zusammensetzen etc. Bei einem mittleren Eintreffen von 37 Personen muss beispielsweise mit einem 95%-Wert von 51 Personen gerechnet werden. Die Ermittlung der Haltezeit erfolgt dann mit Formeln, die z.B. in [141] beschrieben sind. Wird, wie im Beispiel Lille, die Haltezeit für eine Station für den gesamten Tag festgelegt, so ist festzustellen, dass auch hier während großer Zeiträume des Tages Reserven in der Haltezeit vorhanden sind.

Zu deren optimaler Verteilung können dabei Genetische Algorithmen mit der selben Kodierung verwendet werden, wie sie im vorherigen Abschnitt für die optimale Verteilung der Fahrzeitreserve beschrieben wurde. Auch die oben beschriebenen Randbedingungen können hier zur Anwendung kommen.

## 8.2 Optimierung von Übergängen zwischen verschiedenen Zugfolgezeiten

Übergänge zwischen zwei aufeinanderfolgenden Zugfolgezeiten werden z.B. bei den jeweils auf eigenen Fahrwegen verkehrenden Linien der Metro VAL in Lille (vgl. Abb. 1.4) sprungförmig durchgeführt. Dabei treten nach Aussagen der Betreiber dieses Systems häufig hohe Leistungsspitzen und kritische Spannungen auf [53]. In diesem Abschnitt soll die Frage beantwortet werden, ob und wie ein energieorientierter Übergang zwischen zwei Zugfolgezeiten möglich ist, d.h. ob eine geringfügige Modifikation von Zugfolgezeiten in solchen Übergangsphasen, wie sie in Abb. 8.8 dargestellt ist, zur Reduktion von Energiekosten und zur Vermeidung von Störungen geeignet ist und wie diese optimalen Zugfolgezeiten bestimmt werden können.

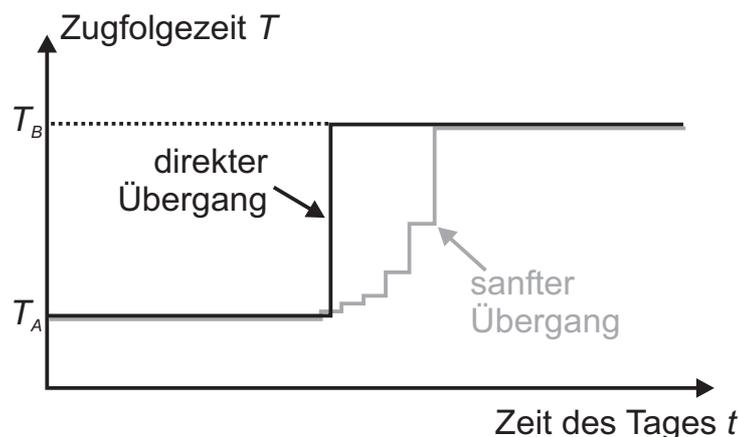


Abbildung 8.8: Unterschied zwischen einem direkten Übergang zwischen zwei Zugfolgezeiten und einem sanften Übergang

### 8.2.1 Die Betrachtung von Übergangsphasen als Problem der Verteilung von Zeitreserven

Bei der Gestaltung solcher Übergänge sollte aus Kundensicht darauf geachtet werden, dass die Intervalle zwischen den Zügen monoton wachsen bzw. fallen (vgl. Abb. 8.8).

Weiterhin muss für jeden solchen Übergang zwischen zwei Zugfolgezeiten definiert werden, zu welchem Zeitpunkt die letzte Fahrt der alten Phase und zu welchem Zeitpunkt die erste Fahrt der neuen Phase konstanter Zugfolgezeiten verkehrt.

Damit sind die beiden wichtigsten Parameter für einen Übergang festgelegt:

1. Die Anzahl der Zugfahrten, die den Übergang zwischen zwei Zugfolgezeiten realisieren soll sowie deren zeitlicher Abstand.
2. Der Unterschied zwischen den aufeinanderfolgenden Zugfolgezeiten.

Das Betriebsprogramm, d.h. Fahrzeiten und Haltezeiten eines einzelnen Zuges, die sogenannte Musterfahrlage, sei für die beiden Takte und die Übergangsfahrten zunächst als konstant angenommen. Diese Einschränkung soll aus Gründen der Übersichtlichkeit erfolgen. Die Optimierung von Fahr- und Haltezeiten der den Übergang zwischen zwei Zugfolgezeiten realisierenden Fahrten mit den im vorigen Abschnitt beschriebenen Verfahren könnte zusätzliches Einsparpotenzial erschließen.

Das Prinzip des sanften Übergangs zwischen zwei aufeinanderfolgenden Zugfolgezeiten lässt sich nach Abb. 8.9 folgendermaßen mathematisch formulieren:

Festgelegt wird eine Folge von Intervallen um den Zeitpunkt des Wechsels  $t_W$  zwischen den Zugfolgezeiten  $T_A$  und  $T_B$ . Dies seien  $i_A$  Intervalle vor dem ursprünglichen Wechsel sowie  $i_B$  Intervalle danach.

Zwischen dem Ende der vorigen Phase mit der konstanten Zugfolgezeit  $T_A$  und dem Beginn der nächsten Phase konstanter Zugfolgezeit  $T_B$  liegt damit eine Zeit

$$\Delta T = i_A T_A + i_B T_B \quad (8.4)$$

Diese Zeit soll nun auf  $i_A + i_B$  Intervalle  $T_{ABi}$  aufgeteilt werden. Dabei sei ohne Beschränkung der Allgemeingültigkeit zunächst angenommen, dass  $T_A > T_B$  gelte. Dann müssen alle  $T_{ABi}$  folgenden Bedingungen genügen:

$$T_B \leq T_{ABi} \leq T_A \quad (8.5)$$

$$T_{ABi} \geq T_{ABj} \text{ für } 1 \leq i \leq j \leq (i_A + i_B) \quad (8.6)$$

$$\sum_{j=1}^{i_A+i_B} T_{ABj} = \Delta T = i_A T_A + i_B T_B \quad (8.7)$$

Gleichung (8.5) lässt sich auch folgendermaßen schreiben:

$$T_{ABi} = T_B + \delta t_{ABi} \text{ mit } 0 \leq \delta t_{ABi} \leq (T_A - T_B) = t_{R,Max} \quad (8.8)$$

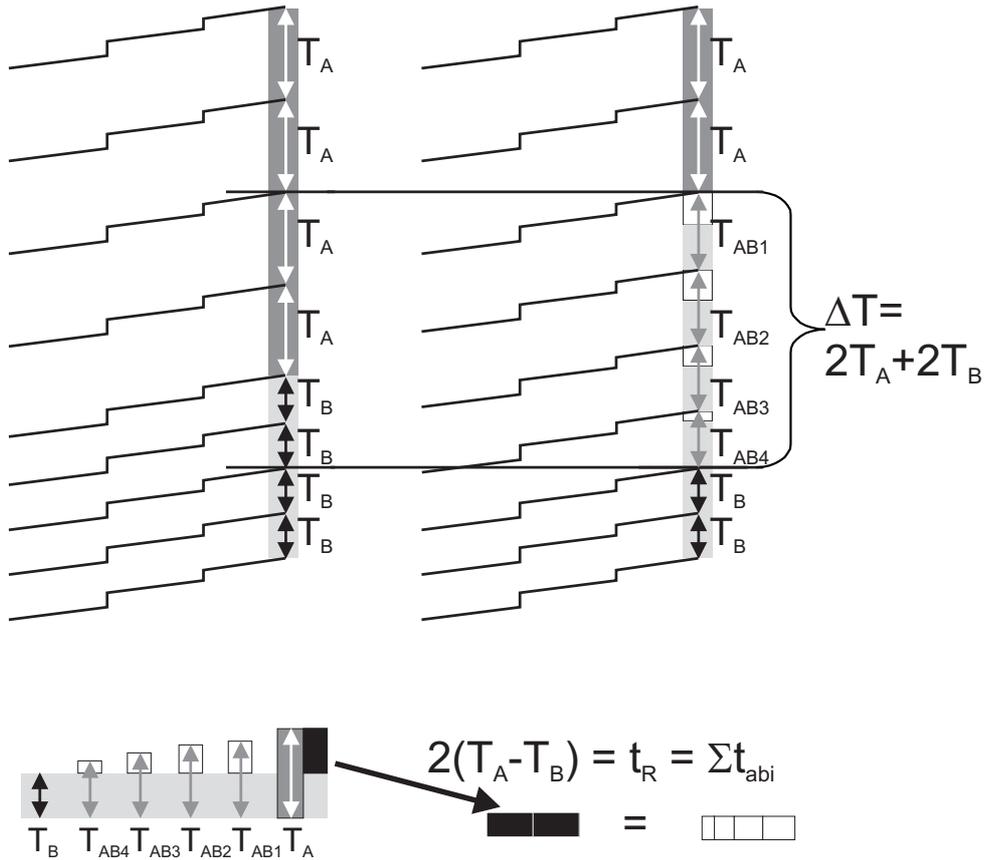


Abbildung 8.9: Prinzip des sanften Übergangs zwischen zwei aufeinanderfolgenden Zugfolgezeiten

Damit erhält man aus Gl.(8.7) die Zusammenhänge

$$\sum_{j=1}^{i_A+i_B} T_{ABj} = \sum_{j=1}^{i_A+i_B} (T_B + \delta t_{ABj}) \quad (8.9)$$

$$= (i_A + i_B)T_B + \sum_{j=1}^{i_A+i_B} \delta t_{ABj} = i_A T_A + i_B T_B \quad (8.10)$$

und

$$\sum_{j=1}^{i_A+i_B} \delta t_{ABj} = i_A T_A + i_B T_B - (i_A + i_B)T_B \quad (8.11)$$

$$= i_A (T_A - T_B) = t_R \quad (8.12)$$

Es handelt sich dabei offenbar wie im Falle der Fahr- und Haltezeitoptimierung ebenfalls um ein Problem der Verteilung einer Zeit  $t_R$ , in diesem Falle auf die  $i$  Zugfolgezeiten des Übergangs.

Im Gegensatz zur Verteilung von Fahr- oder Haltezeitreserven sind hier zusätzliche Randbedingungen zu beachten. Einerseits dürfen spätere Intervalle niemals länger sein als davor-

liegende Intervalle (siehe Gl.(8.5)), außerdem gibt es einen Maximalwert  $t_{R,Max}$ , der bei der Verteilung zu beachten ist.

Die Größe des Suchraums lässt sich mit folgender Rekursionsformel beschreiben:

$$v(t_R, i = i_A + i_B, t_{R,Max}) = \begin{cases} \sum_{j=0}^{\lfloor \frac{t_R}{i} \rfloor} v(t_R - ji, i - 1, t_{R,Max} - j) & \text{falls } k > 1, \\ 1 & \text{falls } k = 1 \text{ und } t_R \leq t_{R,Max}, \\ 0 & \text{falls } k = 1 \text{ und } t_R > t_{R,Max}. \end{cases} \quad (8.13)$$

Mit dieser Rekursionsanweisung lassen sich auch sämtliche Lösungen erzeugen. Dabei ist die gültige Lösung im Falle  $i = 1$  exakt  $t_R$ . Wenn dieses größer als der Maximalwert ist, so entsteht für diesen Rekursionsschritt keine Lösung.

Eine deutliche Verringerung der Rechenzeit für diese Funktion lässt sich erreichen, wenn der letzte Rekursionsschritt für  $i = 1$  nicht mehr ausgeführt wird und stattdessen der für  $i = 2$  noch relativ überschaubare Lösungsraum explizit angegeben wird.

$$v(t_R, i = 2, t_{R,Max}) = \begin{cases} \lfloor \frac{n}{2} \rfloor + 1 & \text{falls } t_R \leq t_{R,Max}, \\ t_{R,Max} - \lceil \frac{t_R}{2} \rceil + 1 & \text{falls } t_{R,Max} \leq t_R \leq 2t_{R,Max}, \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} \quad (8.14)$$

Die Überschreitung des Maximalwerts ist nur möglich, wenn die Zahl der langen Intervalle (in diesem Fall  $i_A$ ) größer als eins ist. Bei Verwendung eines einzigen langen Intervalls ist die Beschränkung implizit enthalten, da hier  $t_R = t_{R,Max}$  ist, wie sich leicht zeigen lässt.

In Abb. 8.10 ist die Größe des Suchraums dargestellt für ausgewählte  $t_R$  (in Sekunden) und  $i_B$  für den Fall  $i_A = 1$ , dabei wird wie bisher von der Möglichkeit einer sekundengenauen Verteilung der Zeitreserven auf die einzelnen Intervalle ausgegangen.

Man erkennt, dass der Suchraum in einigen Fällen nur wenige 100 Lösungen umfasst, für solche Größenordnungen ist das Berechnen aller Lösungen (Verfahren der vollständigen Enumeration) der Anwendung Genetischer Algorithmen vorzuziehen. Bei den meisten Fällen übertrifft der Suchraum jedoch 10 000 Lösungen, so dass hier eine Anwendung Genetischer Algorithmen nicht nur möglich scheint sondern auch sinnvoll.

### 8.2.2 Zeitraum für die Berechnung der Gütefunktion

Es muss ein Zeitintervall festgelegt werden, in dem eine definierte Zahl Zugfahrten stattfindet und deren Beginn und Ende für alle möglichen Übergänge zwischen aufeinanderfolgenden Zugfolgezeiten gleich ist.

Das kleinste solcher Zeitintervalle beginnt zu dem Zeitpunkt, an dem zum letzten Mal die vorige Zugfolgezeit  $T_A$  vergangen ist und eine Zugfahrt startet. Das Zeitintervall endet zu dem Zeitpunkt, an dem die erste Fahrt, deren Folgefahrten alle im Zeitabstand  $T_B$  verkehren, das Ziel erreicht.

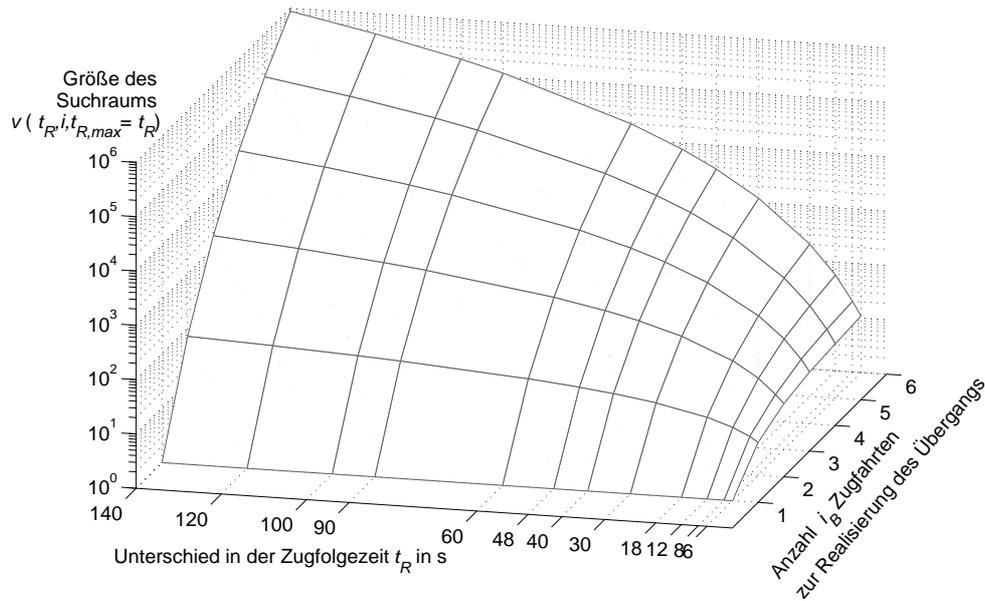


Abbildung 8.10: Größe des Suchraums für ausgewählte Übergänge und Anzahl Zugfahrten der kleineren Zugfolgezeit  $i_B$

Wenn man die Fahrt, der bei sprungförmigem Übergang eine Zugfolgezeit  $T_A$  vorausging und eine Zugfolgezeit  $T_B$  folgte, mit dem Index  $i_W$  bezeichnet, so lässt sich der Beginn des Intervalls  $t_{Start}$  mit folgender Gleichung angeben:

$$t_{Start} = t_{Abf,W} - i_A T_A. \quad (8.15)$$

Das Ende des Intervalls ergibt sich dann unter Verwendung der Reisezeit  $t_{RZ}$  bis zum entsprechenden Ende der Trajektorie aus

$$t_{Ende} = t_{Abf,W} + i_B T_B + t_{RZ} \quad (8.16)$$

Analog ist für  $T_A < T_B$  zu verfahren.

### 8.2.3 Kodierung

Analog zur Fahr- und Haltezeitreservenverteilung soll hier ebenfalls die Kodierung „1 Einheit Reserve = 1 Gen“ verwendet werden. Zwei wesentliche Unterschiede müssen bei der Dekodierung beachtet werden.

Erstens müssen die Intervalle nach ihrer Größe sortiert vorliegen. Dies ist relativ einfach zu erreichen. Die Nummer der Kodierung entspricht damit nicht konkret einem Intervall  $i$ , dem dann diese Reserve zugeordnet wird, sondern einem von  $i = i_A + i_B$  Intervallen. Die Reihenfolge wird nach der vollständigen Dekodierung festgelegt.

Zweitens ist die Einhaltung des Maximalwertes bei Verwendung mehrerer langer Intervalle zu garantieren. Diesem kann durch die verwendete Kodierung zwar nicht Rechnung getragen

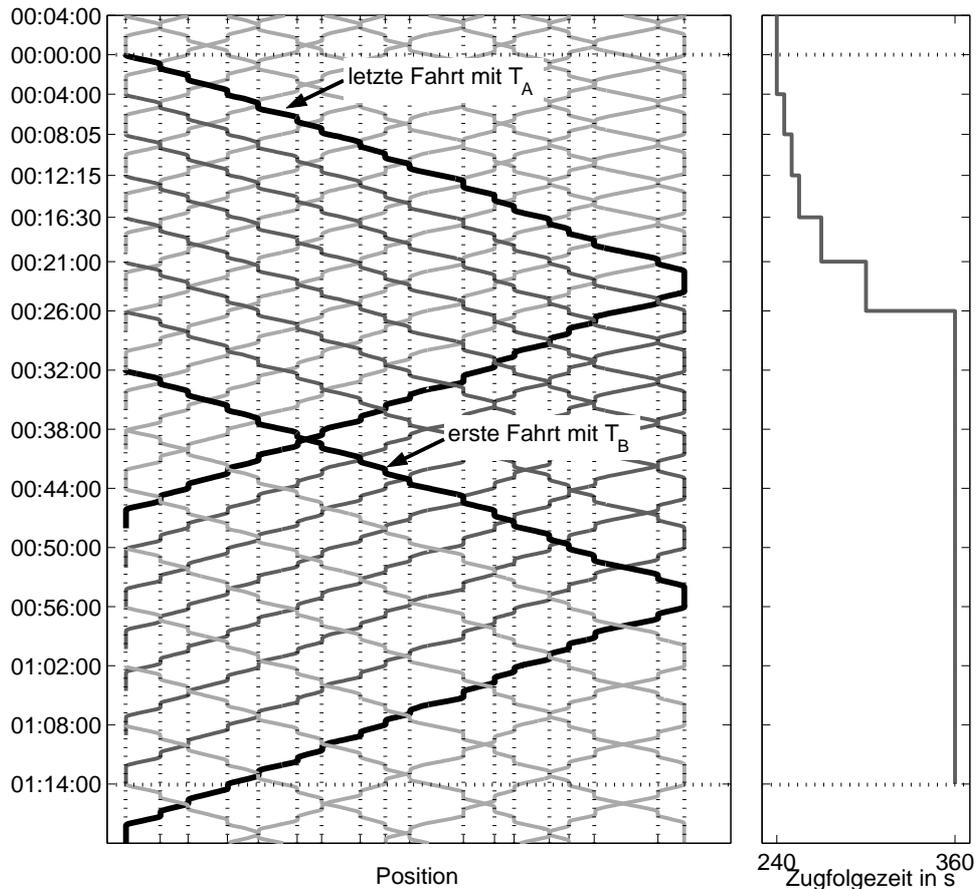


Abbildung 8.11: Sanfter Übergang zwischen zwei Zugfolgezeiten mit  $T_A = 4 \text{ min}$ ,  $T_B = 6 \text{ min}$ ,  $i_A = 5$ ,  $i_B = 1$ ,  $\delta t_{ABi} = 0, 5, 10, 15, 30$  und  $60$  Sekunden, die Anfangszeit zur Ermittlung der Gütefunktion ist hier  $0$ , die Endzeit  $01:14$ , die Reisezeit beträgt  $48 \text{ min}$ .

werden, dennoch sollten solche extreme Fälle in der Praxis kaum auftreten, da die Verteilung von sehr viel Reserve auf ein einziges Intervall im Suchraum nur sehr selten auftritt (siehe auch die Betrachtungen zur Binomialverteilung der Initiallösung im Abschnitt 8.1.2). Bei dekodierter Überschreitung des Maximalwerts sollte deshalb eine Straffunktion eingeführt werden, mit der dem unzulässigen Chromosom ein sehr hoher Funktionswert zugewiesen wird.



## 9 Fallstudien: Die vollautomatische Metro VAL in Lille und die S-Bahn Berlin

Die Größe des durch die vorgeschlagenen Verfahren erschließbaren Einsparpotenzials soll anhand zweier Fallstudien aus der Praxis ermittelt werden. Dabei sind, wie in Abb. 1.9 dargestellt, Phasen mit konstanter Zugfolgezeit sowie Übergänge zwischen solchen Phasen zu betrachten.

Für die Phasen mit konstanter Zugfolgezeit sollen anhand der automatisch betriebenen Linie 1 der Metro vom Typ VAL in Lille, einer Linie der konventionell betriebenen S-Bahn in der Berlin sowie einer theoretischen Strecke eine Analyse der Parameter dieser Phase durchgeführt werden (Zugfolgezeit, Synchronisationszeit, vgl. Abb. 8.1). Die Optimierung von Fahrzeiten und Haltezeiten in Phasen konstanter Zugfolgezeit wird ebenfalls für diese Linien demonstriert, sie soll dabei unter verschiedenen Gesichtspunkten erfolgen:

1. Senkung des Systemenergieverbrauchs
2. Senkung von Effektivleistungen
3. Erhöhung der Störungssicherheit durch Vermeiden geringer Spannungen (vgl. [54])

Die Analyse von Taktübergängen soll ausschließlich für die flexibel betriebenen Linie 1 der Metro VAL in Lille erfolgen, für die diese Thematik von praktischer Bedeutung ist [53].

### 9.1 Optimierung von Fahr- und Haltezeiten in Phasen konstanter Zugfolgezeit

#### 9.1.1 Analyse der Parameter

Phasen konstanter Zugfolgezeit treten sowohl bei flexibel als auch bei konventionell im starren Taktfahrplan betriebenen Linien auf. Wie in Abschnitt 8.1 gezeigt wurde, muss in solchen Phasen zunächst der Einfluss der Parameter

- Zugfolgezeit  $T$  und
- Synchronisationszeit

auf die die Energiekosten bestimmenden Größen untersucht werden. Für die konventionell betriebene Linie 1 der S-Bahn Berlin (vgl. 9.1) wurde dabei der Fahrplan mit minimalem Traktionsenergieverbrauch für den Einzelzug unterstellt, wie er mit Hilfe der Dynamischen Programmierung ermittelt werden kann (vgl. Abschnitt 8.1.2.2) sowie eine Haltezeit von 30 s pro Halt

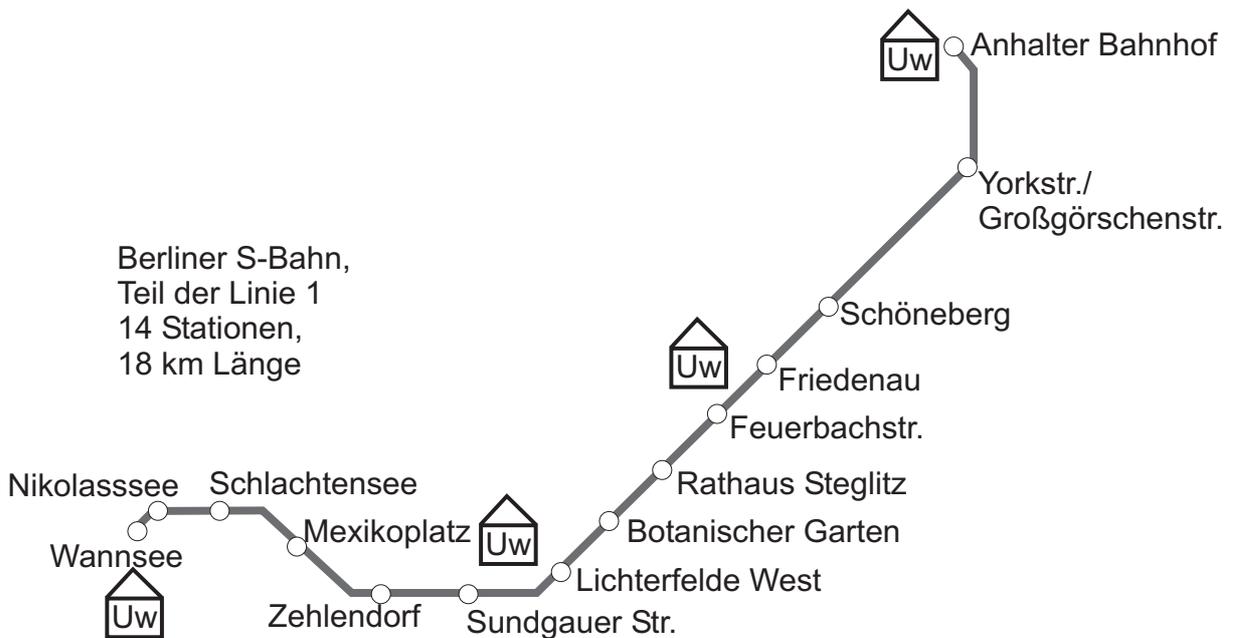


Abbildung 9.1: Fallstudie S-Bahn Berlin: Schematische Darstellung der untersuchten Strecke und deren elektrischer Ausrüstung

angenommen<sup>1</sup>. Für die Linie 1 der Metro VAL in Lille (vgl. Abb. 9.2)<sup>2</sup>, die vollautomatisch und flexibel betrieben wird, werden die dort systembedingt realisierten Fahrzeiten und Leistungsverläufe sowie die im heutigen Betrieb genutzten Haltezeiten verwendet.

### 9.1.1.1 Einfluss der Zugfolgezeit

Für die Analyse des Parameters Zugfolgezeit wurden auf der untersuchten Linie der Berliner S-Bahn ausschließlich Züge in einer Fahrtrichtung betrachtet. Während eines Untersuchungsintervalls der Länge der Zugfolgezeit wurde ermittelt, wieviel Energie in den Unterwerken angefordert wird, wenn die Züge mit der energieoptimalen Verteilung der Fahrzeitreserve für den einzelnen Zug (ermittelt unter Nutzung der Dynamischen Programmierung, vgl. Abschnitt 8.1.2.2) im zeitlichen Abstand der Zugfolgezeit unterwegs sind. Dabei wurde eine Fahrzeitreserve von 5% der Gesamtreisezeit gewählt. Die Summe des Energieverbrauchs aller Unterwerke für die untersuchten Zugfolgezeiten von 240 s bis 1700 s (Schrittweite 10 s) sowie die dazugehörigen Rückspeisegrade sind in Abb. 9.3 dargestellt. Die längste untersuchte Zugfolgezeit ergab sich dabei aus der Gesamtfahrzeit des Zuges in der untersuchten Fahrtrichtung.

Folgende wesentliche Erkenntnisse lassen sich aus der Analyse von Energieverbrauch und netzbezogenem Rückspeisegrad ableiten:

1. Der Energieverbrauch pro Zugfolgezeit nimmt mit zunehmendem Zugfolgezeit zu. Dies

<sup>1</sup>Alle weiteren Streckendaten und die Angaben zu den Anlagen der Bahnenergieversorgung wurden aus [20] übernommen. Die Fahrzeugdaten stammen aus [55].

<sup>2</sup>Die Verwendung der Daten der Linie 1 der Metro in Lille entstammen einer Kooperation mit Jean-Michel ERBIN, Direktion Metro, KEOLIS sowie Christian BECHE, Technischer Direktor, Transpole. Die Fahrzeugdaten wurden teilweise aus [132] übernommen [53].

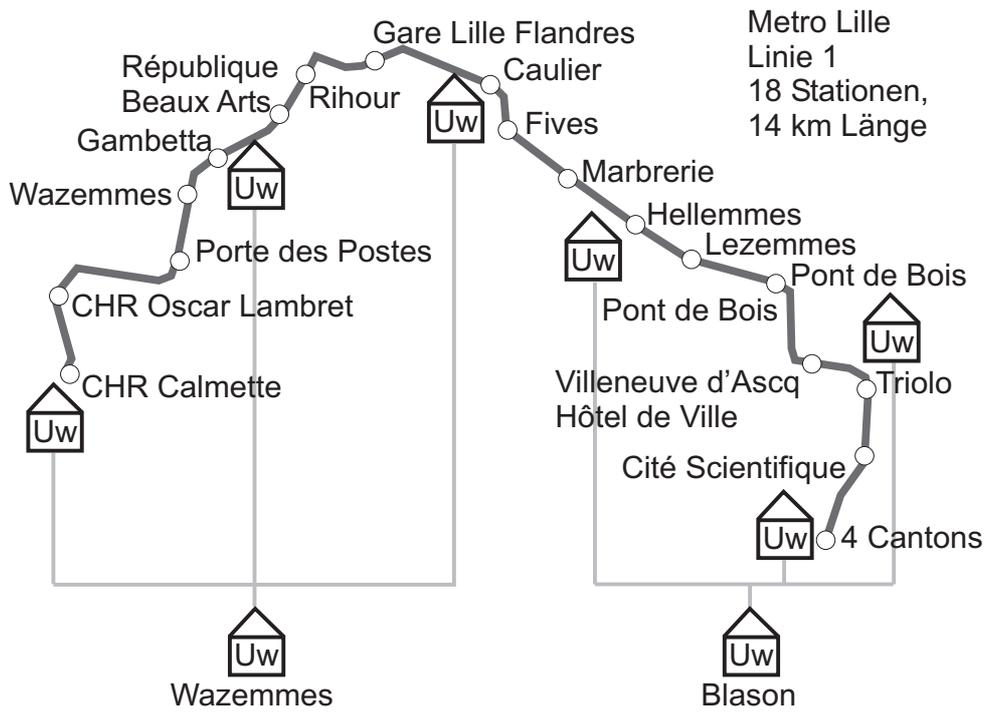


Abbildung 9.2: Fallstudie Metro Lille: Schematische Darstellung der untersuchten Strecke und deren elektrischer Ausrüstung

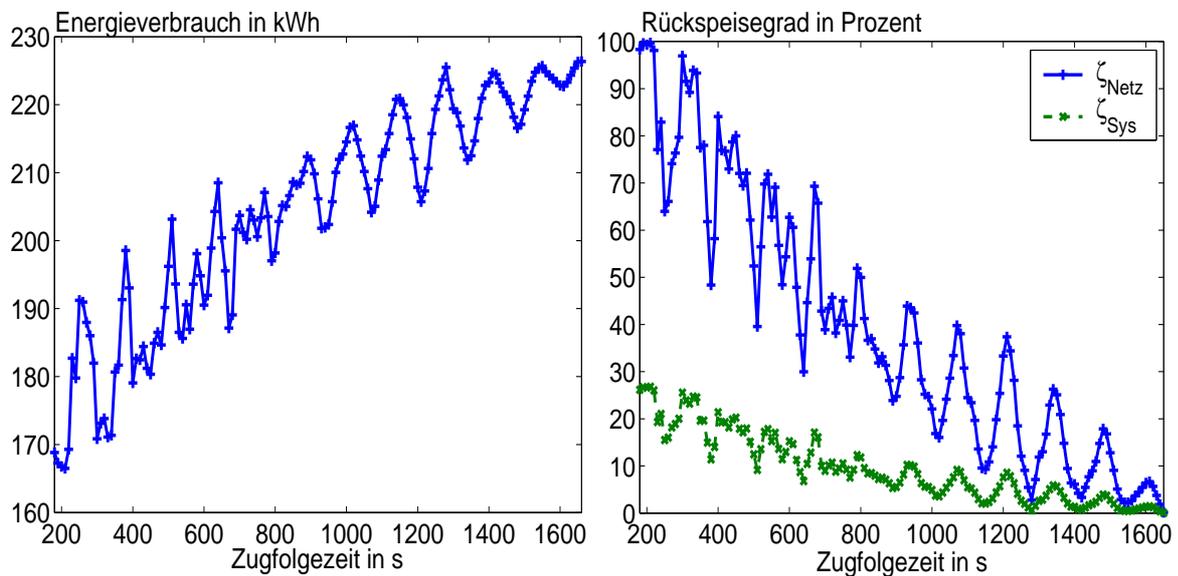


Abbildung 9.3: S-Bahn Berlin: Energieverbrauch während der Dauer einer Zugfolgezeit und netzbezogener Rückspeisegrad für verschiedene Zugfolgezeiten

kann mit dem Sinken des netzbezogenen Rückspeisegrades erklärt werden. Bei großen Zugfolgezeiten sind weniger Züge gleichzeitig auf der Strecke unterwegs, somit sinkt die Verfügbarkeit von Abnehmern für rückgespeiste Bremsenergie. So sind bei einer Zugfolgezeit von 4 min immer mindestens sechs Züge unterwegs, also fünf mögliche Verbraucher für einen rückspeisefähigen Zug. Bei einer Zugfolgezeit von der Dauer der Fahrt eines Zuges ist nur genau dieser eine Zug auf der Strecke unterwegs, es gibt also überhaupt keine Verbraucher für die rückgespeiste Bremsenergie, der Rückspeisegrad ist 0.

2. Der Energieverbrauch pro Zugfolgezeit steigt nicht kontinuierlich mit der Zugfolgezeit sondern schwankt zusätzlich mit einer festen Periodendauer. Diese beträgt im vorliegenden Fall 120 s, was der mittleren Dauer der Fahrt zwischen zwei Halten plus der folgenden Haltezeit entspricht.

Ähnlich sieht das Bild bei der Linie 1 der Metro vom Typ VAL in Lille aus. Hier wurden Zugfolgezeiten zwischen 60 und 360 s simuliert, wobei die im heutigen Betrieb gefahrenen Zugfolgezeiten in Abb. 9.4 zusätzlich markiert sind. Für die Parameteranalyse wurden hier beide Fahrtrichtungen betrachtet und als Synchronisationszeit der im heutigen Betrieb verwendete Wert genutzt. Die an der Strecke der Berliner S-Bahn beschriebenen Phänomene treten auch bei dieser Linie deutlich zu Tage: Besonders gut ist hier die Periodendauer von 80 s zu erkennen. Das Auftreten dieser enormen Spitzen insbesondere bei einer Zugfolgezeit von 240 s deckt sich auch mit den Erfahrungen der Betreiber, nach deren Aussage im Abendverkehr aus energetischen Gründen statt im Abstand von 4 min die Züge in einem Intervall von 4 min 20 s verkehren [53]. Auffällig sind ebenfalls die sehr schmalen Bereiche hohen Energieverbrauchs. Diese hängen mit den sehr kurzen Leistungsspitzen der Fahrzeuge im Regelbetrieb zusammen: Die Höchstgeschwindigkeit auf der Strecke beträgt durchschnittlich 60 km/h, die Züge verfügen über ein sehr hohes Beschleunigungspotenzial (max.  $1,3 \frac{m}{s^2}$ ), womit die Maximalgeschwindigkeit in weniger als 15 Sekunden erreicht und die Leistungsspitze nach dieser kurzen Zeit bereits beendet ist.

Um das Phänomen der Periodizität des Energieverbrauchs und Rückspeisegrads näher zu untersuchen und dabei zufällige Einflüsse durch die Trassierung einer Linie auszuschließen, wurde eine theoretische U-Bahn-Strecke erstellt, die gleiche Stationsabstände von 950 m aufweist, vollständig eben verläuft (vgl. Abb. 9.6) und von dem auf der S-Bahn-Berlin eingesetzten Triebzug BR 481 befahren werden soll. Mit der gewählten Fahrzeitreserve von 9,5% der Gesamtfahrzeit ergibt sich eine Fahrzeit auf jedem Abschnitt von genau 80 s, die Haltezeit wird für jeden Halt konstant mit 20 s angenommen.

Die Ergebnisse der Analyse der Zugfolgezeit sind in Abb. 9.7 veranschaulicht. Auch hier wurden Zugfolgezeiten im Abstand von 10 s verwendet.

In diesen Abbildungen wird der Zusammenhang zwischen mittlerer Fahr- und Haltezeit sehr deutlich sichtbar: Die Maxima des Energieverbrauchs befinden sich exakt bei den Zugfolgezeiten, die ein ganzzahliges Vielfaches von 100 s darstellen, was der Fahr- und Haltezeit auf einem Abschnitt entspricht.

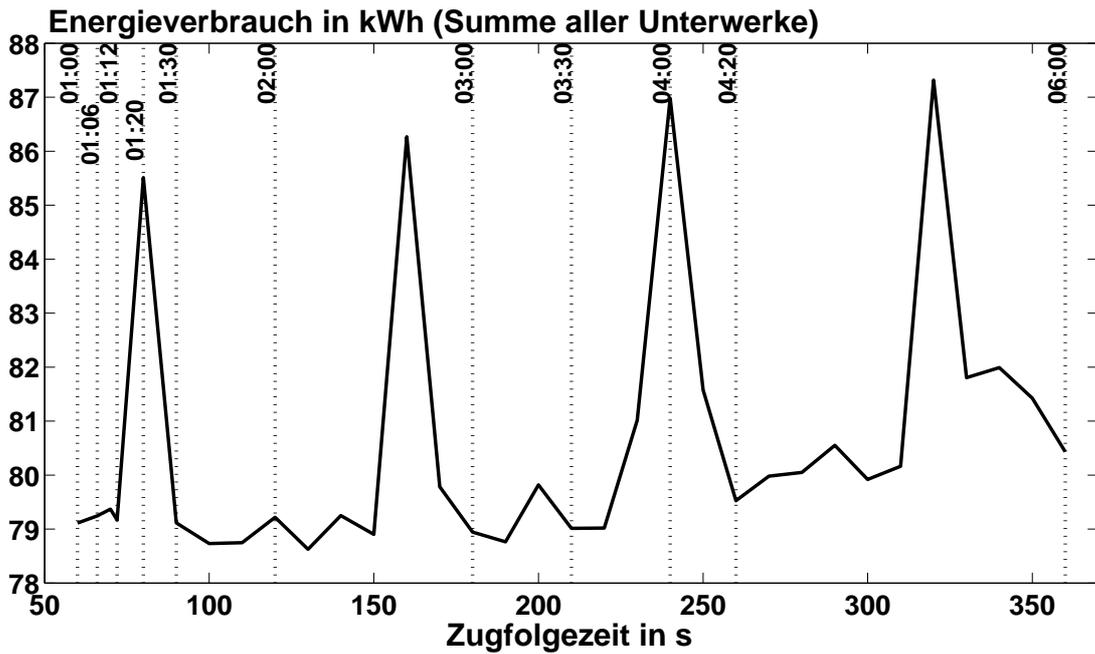


Abbildung 9.4: Energieverbrauch während der Dauer einer Zugfolgezeit für die Linie 1 VAL Lille: Die Periodendauer von 80 s ist deutlich zu erkennen.

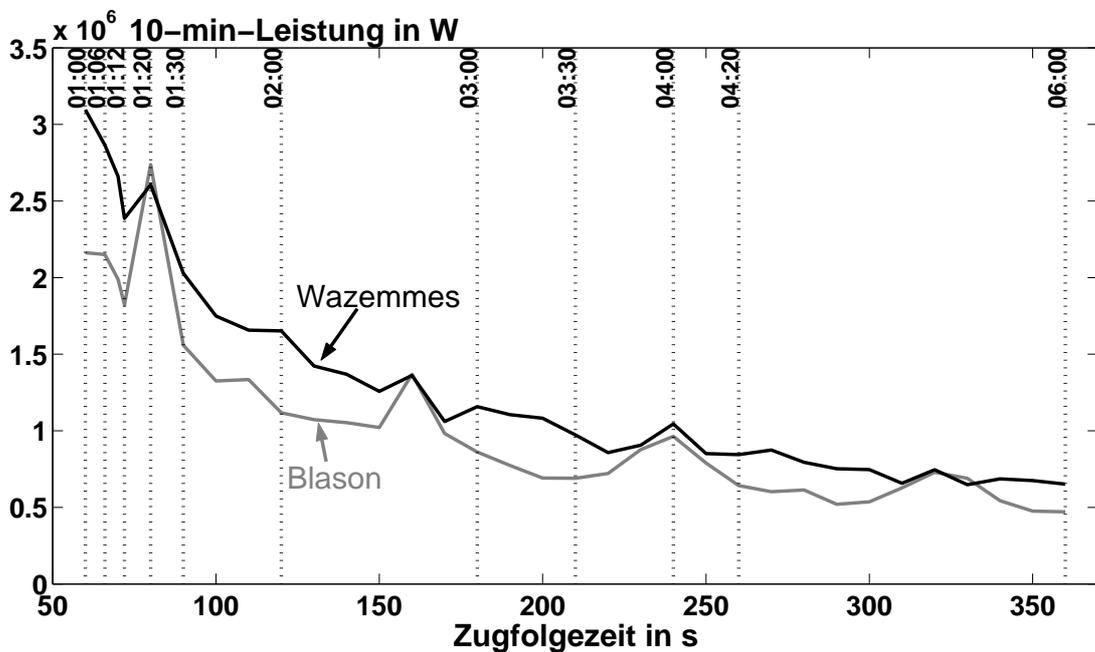


Abbildung 9.5: 10-min-Effektivleistung für verschiedene Zugfolgezeiten der Linie 1 VAL Lille: Die Periodendauer von 80 s ist auch hier deutlich zu erkennen.

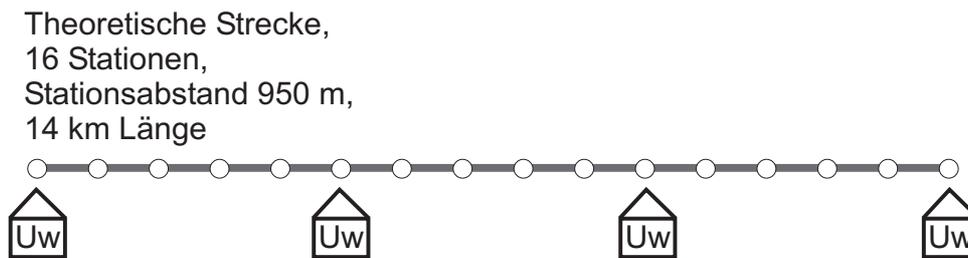


Abbildung 9.6: Die untersuchte theoretische Strecke

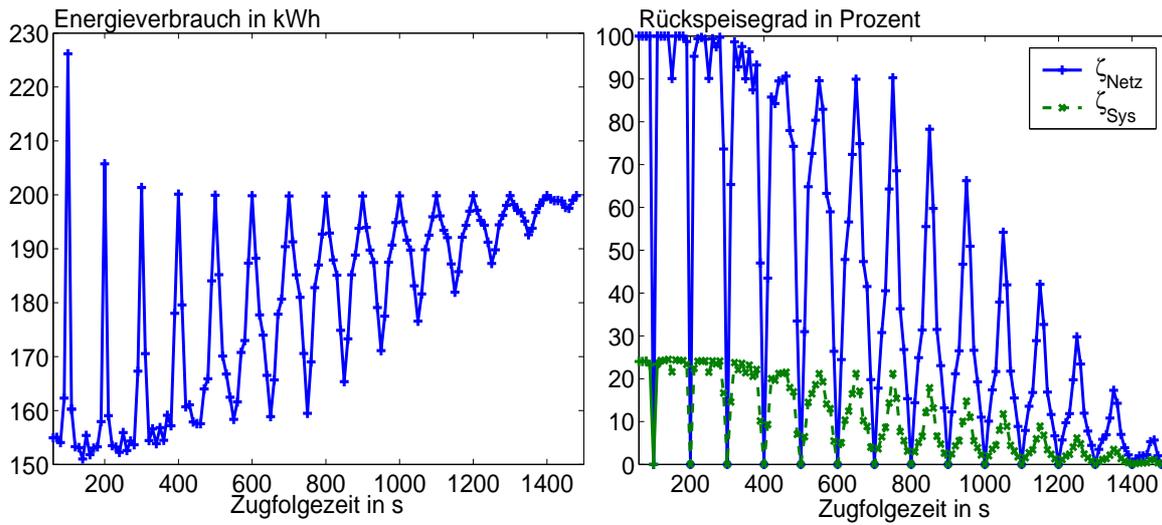


Abbildung 9.7: Theoretische Strecke: Energieverbrauch und netzbezogener Rückspeisegrad für verschiedene Zugfolgezeiten

Eine genauere Analyse der vorhandenen Maxima im Systemenergieverbrauch wurde für Zugfolgezeiten zwischen 110 und 300 s im Abstand von 1 s durchgeführt. Deren Ergebnisse sind in Abb. 9.8 dargestellt. Hier wird deutlich, dass auch die zweite und dritte Oberschwingung noch ausgeprägte lokale Maxima verursachen (bei 133, 150 und 166 s sowie jeweils 100 s später).

Der Energieverbrauch erreicht sein globales Minimum bei einer Zugfolgezeit von 145 s, die in Abb. 9.9 in Form eines Bildfahrplans dargestellt ist. Die Existenz eines solchen globalen Minimums hängt mit zwei Faktoren zusammen:

1. Der Rückspeisegrad nimmt mit zunehmender Zugfolgezeit tendenziell ab, d.h. mit zunehmender Zugfolgezeit steigt tendenziell der Energieverbrauch an.
2. Je höher die Zugfolgezeit, desto geringer werden die Verluste im Netz der Bahnenergieversorgung, da diese stark von der bezogenen Momentanleistung abhängen.

Die Verluste im Leitungsnetz bestimmen dabei nur zu einem geringen Anteil den Gesamtenergieverbrauch. Das ist auch am nur geringen Unterschied der Systemenergieverbräuche für die Zugfolgezeiten zu erkennen, bei denen der netzbezogene Rückspeisegrad 100% beträgt (zwischen 110 und 129 s in Abb.9.8).

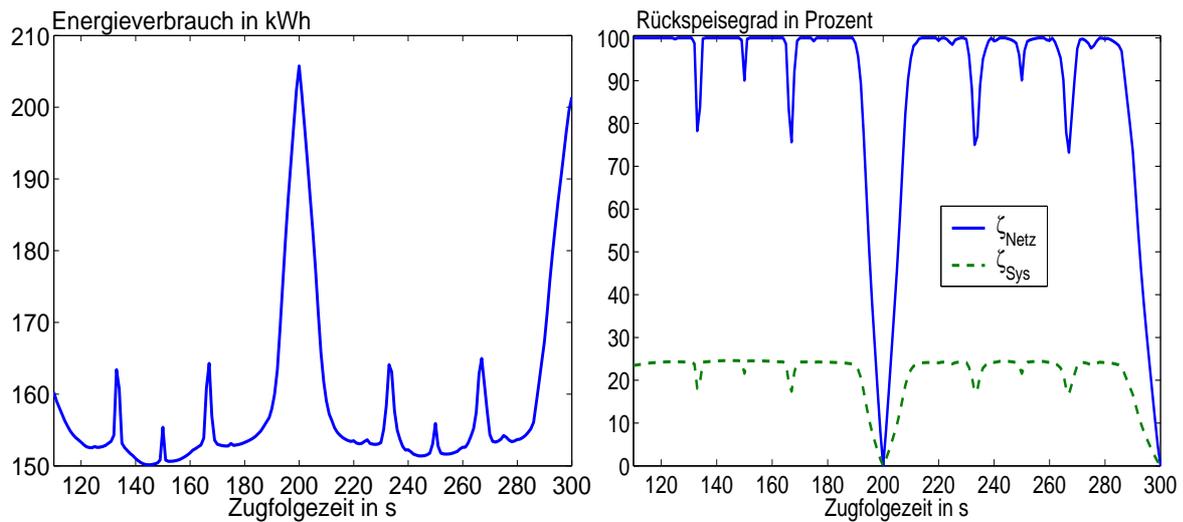


Abbildung 9.8: Theoretische Strecke: Energieverbrauch und netzbezogener Rückspeisegrad für verschiedene Zugfolgezeiten (Detail)

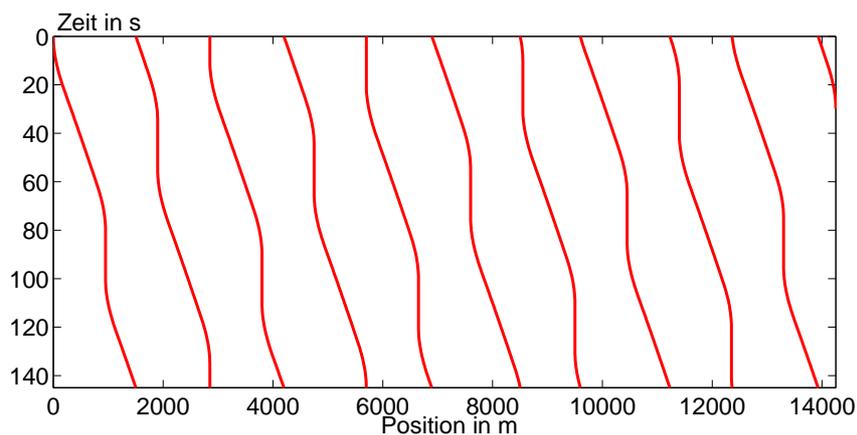


Abbildung 9.9: Bildfahrplandarstellung für die optimale Zugfolgezeit von 145 s

### 9.1.1.2 Einfluss der Synchronisationszeit

Bei gegebener Zugfolgezeit lässt sich durch Variation der Synchronisationszeit der Systemenergieverbrauch beeinflussen. Abhängig von der Synchronisationszeit kann durch die Züge der Gegenrichtung ein Teil der Energie genutzt werden, die die Züge der Hinrichtung nicht aufnehmen können.

Um diese Effekte quantitativ zu fassen wurden mehrere Fallstudien durchgeführt. Für die Strecke der Berliner S-Bahn wurde eine Analyse des Versatzes für den in der Praxis relevanten 10-min-Takt durchgeführt, der ein lokales Minimum des Energieverbrauchs darstellt, außerdem wurde der Takt 585 s untersucht, der ein lokales Maximum darstellt. Auf die Betrachtung eventueller Wendefahrten an den Streckenenden und damit verbundener Leistungsspitzen wurde bei dieser Analyse verzichtet.

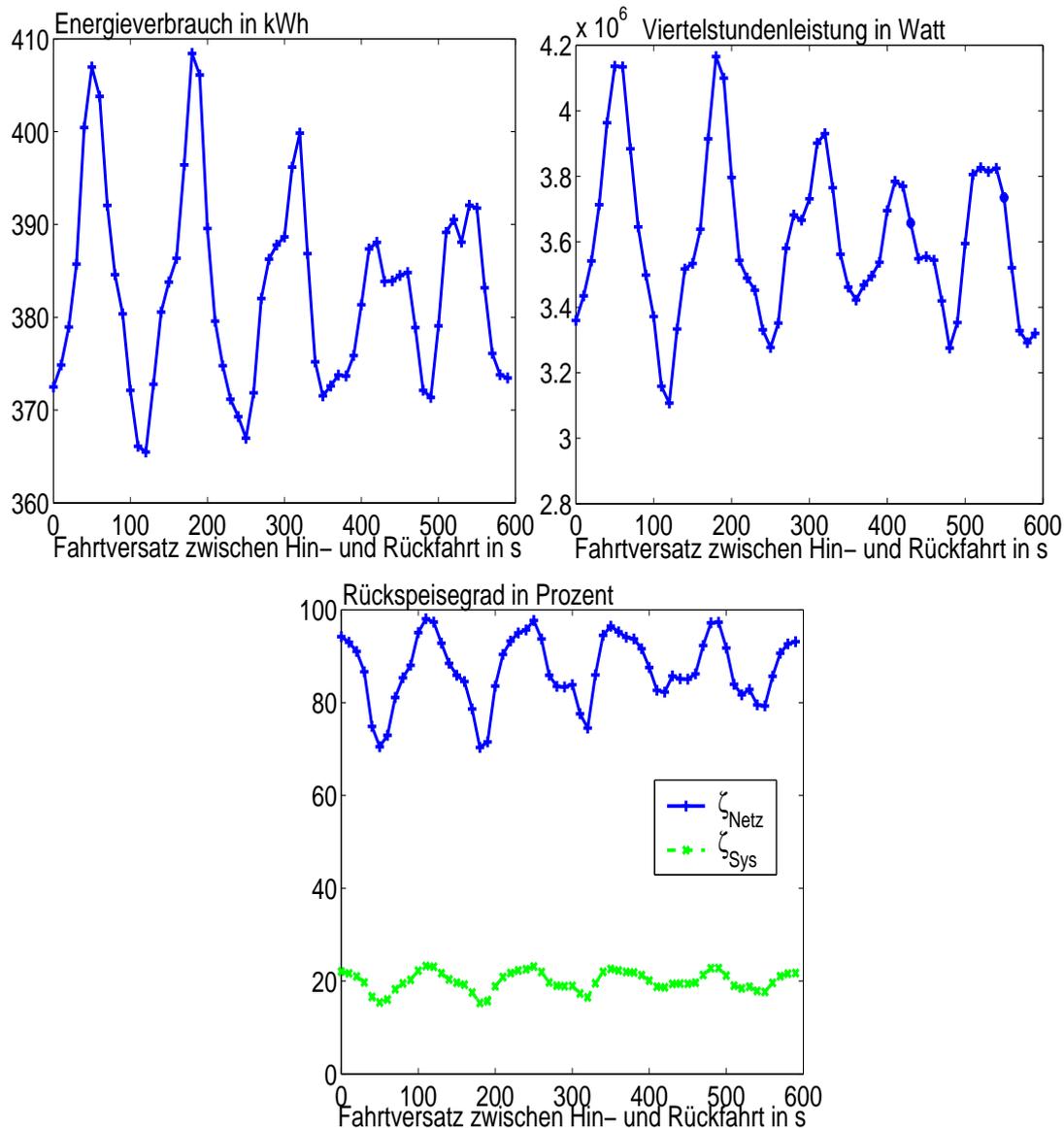


Abbildung 9.10: Energieverbrauch, 15-min-Leistung und netzbezogener Rückspeisegrad als Funktion der Synchronisationszeit für einen Takt von 600 s (10 min) auf der S1 der S-Bahn Berlin

In den Abb.en 9.10 und 9.11 sind wesentliche Ergebnisse der Variation dieses Parameters dargestellt. Folgende zwei Schlussfolgerungen lassen sich dabei ableiten:

1. Der Einfluss des Synchronisationszeit hängt in erster Linie von der untersuchten Zugfolgezeit ab: Ist diese selbst schon durch einen hohen Rückspeisegrad gekennzeichnet, ist der Einfluss der Synchronisationszeit gering. Bei Zugfolgezeiten mit geringem Rückspeisegrad hat hingegen die Synchronisationszeit entscheidenden Einfluss auf den Energieverbrauch, der in diesem praktischen Beispiel zu Unterschieden im Systemenergieverbrauch von bis zu 10% führt.

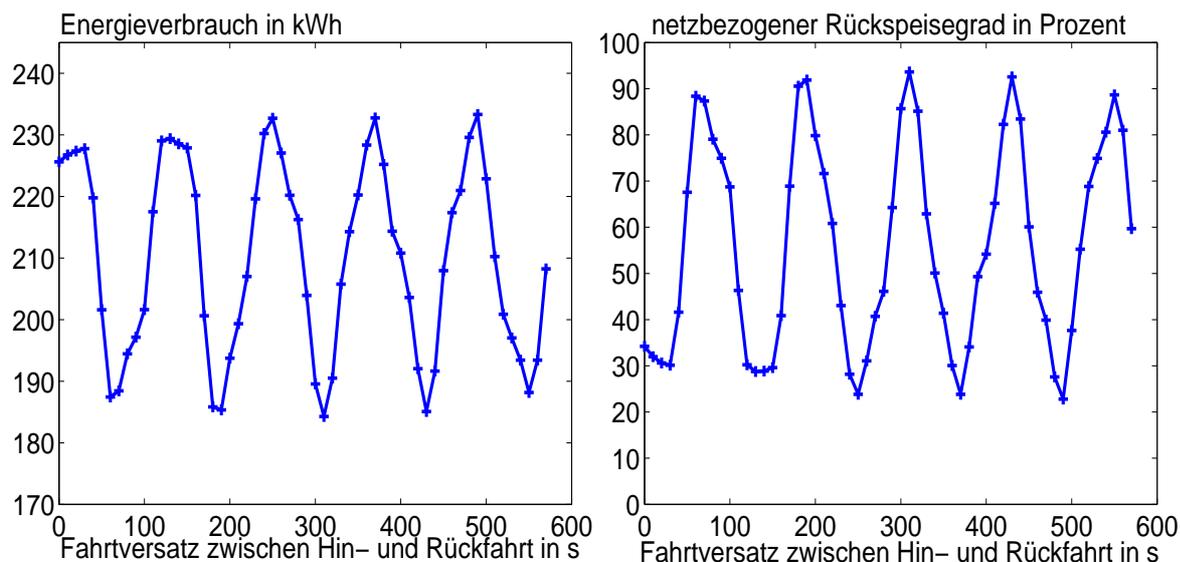


Abbildung 9.11: Systemenergieverbrauch und netzbezogener Rückspeisegrad für verschiedene Synchronisationszeiten auf der S1 der S-Bahn Berlin bei einer Zugfolgezeit von 585 s

2. Bei der Untersuchung des Einflusses der Synchronisationszeit treten die selben Frequenzen auf, wie diese bei der Analyse der Zugfolgezeit zu finden waren. Diese entsprechen der Dauer eines mittleren Fahrzyklus von Anfahrt bis Anfahrt.

An der theoretischen Strecke wurden zwei Zugfolgezeiten genauer untersucht: dabei wurde ein lokales Maximum des Energieverbrauchs mit 400 s sowie das globale Minimum, nämlich die Zugfolgezeit 145 s, ausgewählt. Die am praktischen Beispiel auftretenden Effekte treten hier noch klarer in Erscheinung (siehe Abb. 9.12). Der Einfluss der Synchronisationszeit auf den Energieverbrauch beträgt bei der Zugfolgezeit von 400 s (Rückspeisegrad 0 in einer Fahrtrichtung) etwa 25%, dabei kann maximal 90% der verfügbaren Bremsenergie durch andere Züge aufgenommen werden, 10% der verfügbaren Bremsenergie müssen trotz der bestmöglichen Wahl der Synchronisationszeit in Bremswiderständen verbraucht werden.

Bei der für diese Strecke energetisch optimalen Zugfolgezeit spielt die Synchronisationszeit eine praktisch vernachlässigbare Rolle.

Bei der Linie 1 der Metro in Lille lässt sich der Versatz laut Aussagen der Betreiber [53] nur in der Größenordnung von 15 s verändern, was weniger als 20% der systemimmanenten Periodendauer bedeutet. Deshalb wurde die Analyse unterschiedlicher Versätze als Sonderfall der Haltezeitenoptimierung betrachtet, der in Abschnitt 9.1.3 vorgestellt wird.

## 9.1.2 Ermittlung optimaler Fahrzeiten mit Genetischen Algorithmen

Die Ermittlung optimaler Fahrzeiten mit Hilfe Genetischer Algorithmen wurde für verschiedene Zugfolge- und Synchronisationszeiten anhand der Strecke der Berliner S-Bahn untersucht,

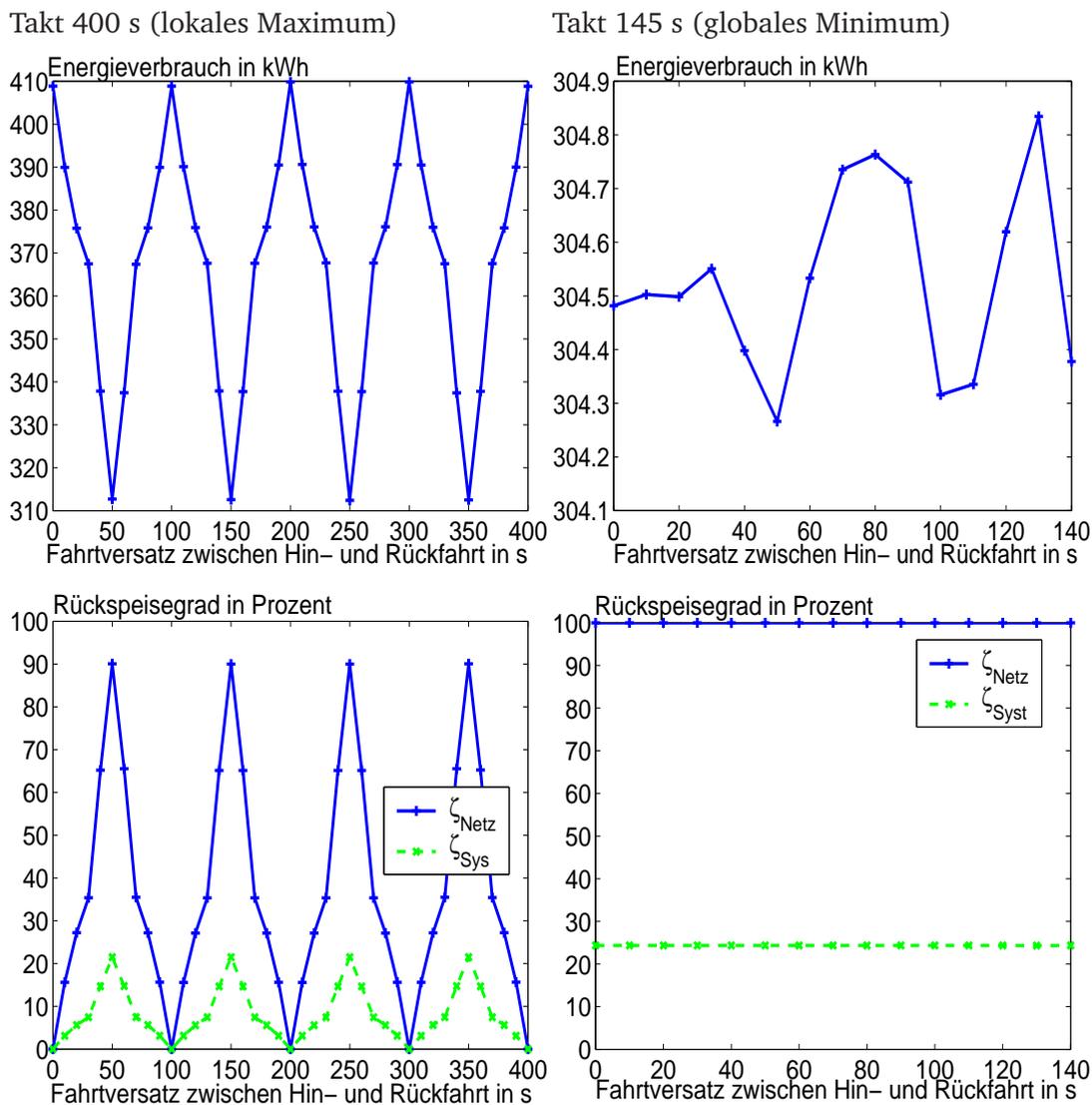


Abbildung 9.12: Analyse des Einflusses der Synchronisationszeit bei verschiedenen Zugfolgezeiten auf der theoretischen Strecke

auch wenn bei der derzeitigen manuellen Fahrzeugführung die Erschließung der aufgezeigten Potenziale nicht möglich ist. Die Automatisierung der Fahrzeugführung oder der Einsatz von Fahrerassistenzsystemen (vgl. Abb. 1.2) könnten selbst bei Beibehaltung des konventionellen Taktfahrplans diese Optimierungspotenziale erschließen helfen.

Da bei der Metro vom Typ VAL eine Fahrzeitenregelung dieser Art nicht möglich ist [52], wurde hier auf eine Untersuchung verzichtet.

### 9.1.2.1 Gütekriterien Systemenergieverbrauch und Viertelstundenleistung

Bei der Optimierung wurden verschiedene Gütefunktionen untersucht, um die Robustheit des vorgeschlagenen Optimierungsverfahrens zu demonstrieren. Für jede Synchronisationszeit wurde dabei jeweils eine Optimierung mit dem Ziel der Senkung des Systemenergieverbrauchs (Summe aller Unterwerke) sowie der 15-min-Leistung (nicht-zufällige Summe der Maximal-

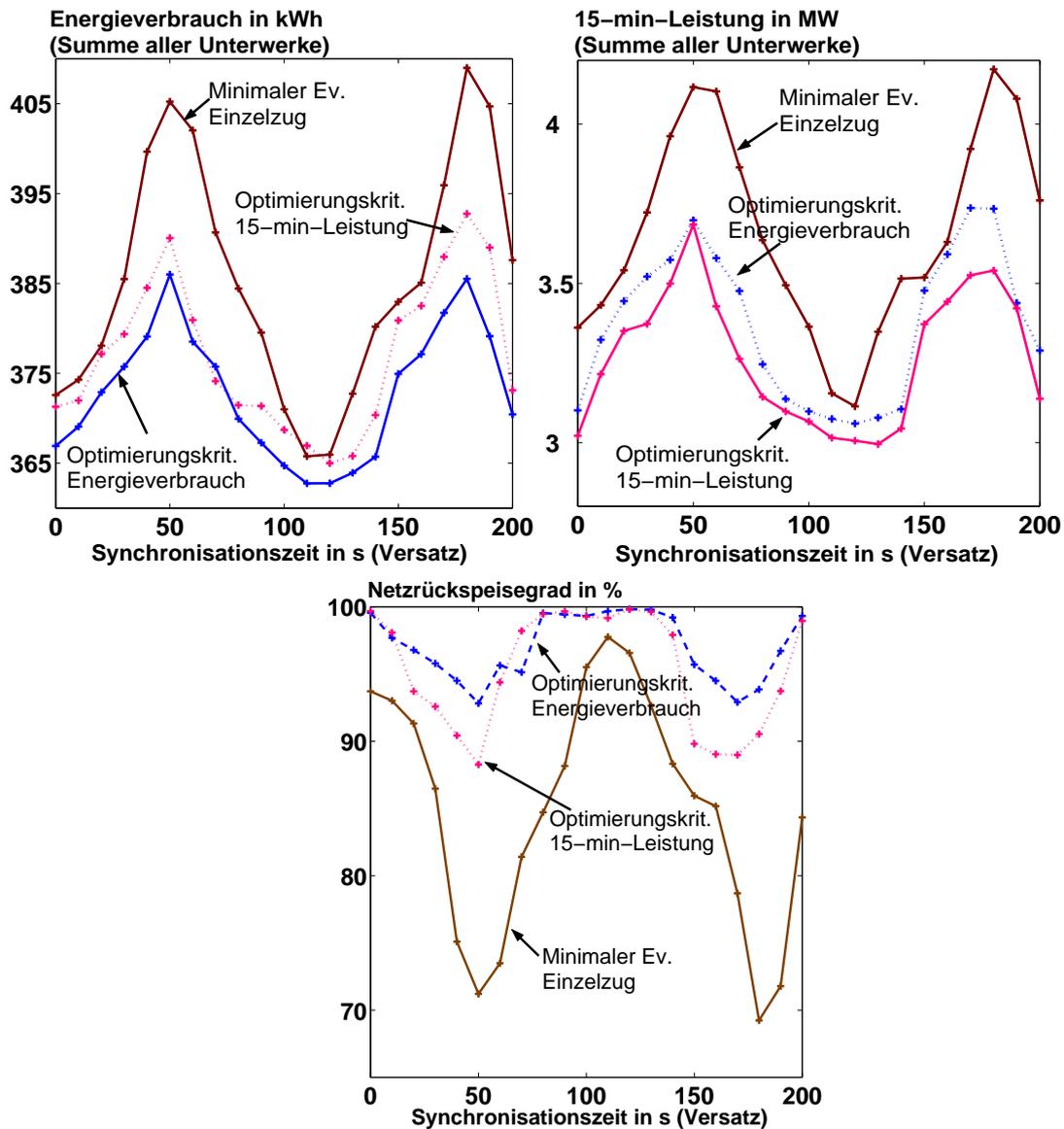


Abbildung 9.13: Optimierungsergebnisse für die S-Bahn Berlin: Energieverbrauch, 15-min-Leistung und netzbezogener Rückspeisegrad für ausgewählte Synchronisationszeiten für einen Takt von 600 s (10 min)

werte aller Unterwerke, vgl. Abschnitt 7.1) durchgeführt. Systemenergieverbrauch, Viertelstundenleistung und netzbezogener Rückspeisegrad sind dabei für die optimierten Lösungen in Abb. 9.13 für den praktisch relevanten 10-min-Takt sowie in Abb. 9.14 für die Zugfolgezeit von 585 s den Werten gegenübergestellt, die mit dem energieoptimalen Fahrplan für den Einzelzug erhalten wurden.

Für die Optimierung wurde eine Populationsgröße von 25 Individuen genutzt, von denen 24 zufällig erzeugt wurden. In einem Individuum wurde der Fahrplan mit minimalem Traktionsenergieverbrauch für den einzelnen Zug kodiert, der wie im vorigen Abschnitt beschrieben, für einige Synchronisationszeiten bereits sehr gute Lösungen lieferte. Ein Optimierungslauf wur-

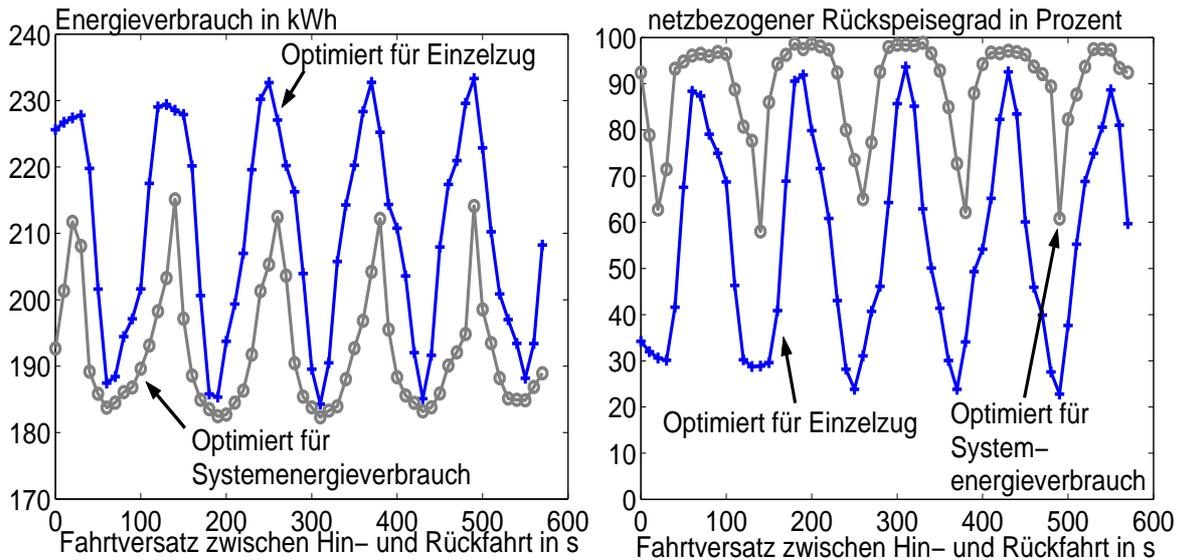


Abbildung 9.14: Optimierungsergebnisse für die S-Bahn Berlin und einen Takt von 585 s für verschiedene Synchronisationszeiten

de über 50 Generationen angesetzt. Die ganzzahligen Werte der einzelnen Gene wurden mit Hilfe der GRAY-Kodierung als binäre Zahlen durch den GA verarbeitet. Zur Selektion wurde das „Truncation“-Verfahren verwendet, die Generationslücke wurde mit 0,9 gewählt. Eine solche Optimierung dauert in der durchgeführten MATLAB<sup>®</sup>-Implementierung zwischen 60 und 90 Minuten auf einem Pentium IV Rechner mit 2,4 GHz Taktfrequenz. Optimierungszyklen über eine größere Zahl Generationen konnten zu keiner wesentlichen Verbesserung des Ergebnisses beitragen.

Allgemein lässt sich zunächst feststellen, dass alle Lösungen, die mit einer der beiden Gütefunktionen ermittelt wurden, jeweils besser waren als die für den einzelnen Zug ermittelte optimale Verteilung der Fahrzeitreserve. Dabei ist der erzielbare Gewinn durch die Fahrzeitenregelung stark abhängig von der Synchronisationszeit, er ist maximal an den Stellen, bei denen die Synchronisationszeit besonders ungünstig für das jeweilige Gütekriterium ist. Bei Synchronisationszeiten, die schon mit dem Initialfahrplan einen sehr hohen Rückspeisegrad aufweisen, ist das Einsparpotenzial durch die Fahrzeitenmodifikation als gering einzustufen.

Bei Analyse des Energieverbrauchs der entstandenen Lösungen für einen Takt von 600 s und eine Synchronisationszeit von 70 s wird deutlich, dass es sich bei den Genetischen Algorithmen um ein stochastisches Suchverfahren handelt, mit dem das globale Optimum nicht notwendigerweise gefunden wird. Die Fahrzeitreservenverteilung, die für das Gütekriterium 15-min-Leistung ermittelt wurde, weist hier einen geringeren Systemenergieverbrauch auf, als die Lösung, die für dieses Gütekriterium eigentlich ermittelt wurde. Bei längerer Optimierungsdauer ist zu erwarten, dass dieser Unterschied verschwindet, da er aber im Bereich von unter 0,5% liegt, soll er vernachlässigt werden.

### 9.1.2.2 Detailanalyse: Unterschiede zwischen den Verteilungen der Fahrzeitreserve

Als Beispiel für eine Situation mit großem Einsparpotenzial soll die Synchronisationszeit 180 s genauer betrachtet werden. Mit dem Fahrplan, der für minimale Viertelstundenleistung erstellt wurde, ist es möglich, gegenüber dem Fahrplan mit minimalem Traktionsenergieverbrauch für den einzelnen Zug die Viertelstundenleistung um 17% sowie den Systemenergieverbrauch um 5% zu senken. Einige Unterschiede zwischen den beiden Fahrplänen sind in Abb. 9.15 und 9.16 dargestellt.

Im Teil a von Abb. 9.15 ist die Verteilung der Fahrzeitreserve entlang der Strecke dargestellt. Bei der Minimierung des Traktionsenergieverbrauchs wird versucht, die Reserve annähernd gleichmäßig auf die einzelnen Abschnitte zu verteilen. Ausnahme ist dabei der erste Streckenabschnitt, der eine hohe Streckenneigung aufweist (Einfahrt in den Tunnel). Demgegenüber wird die Fahrzeitreserve bei der Systemoptimierung hauptsächlich auf die Abschnitte mit höherer Nummer verteilt (am Stadtrand), auf den Abschnitten im Stadtzentrum steht hier nur wenig Fahrzeitreserve zur Verfügung.

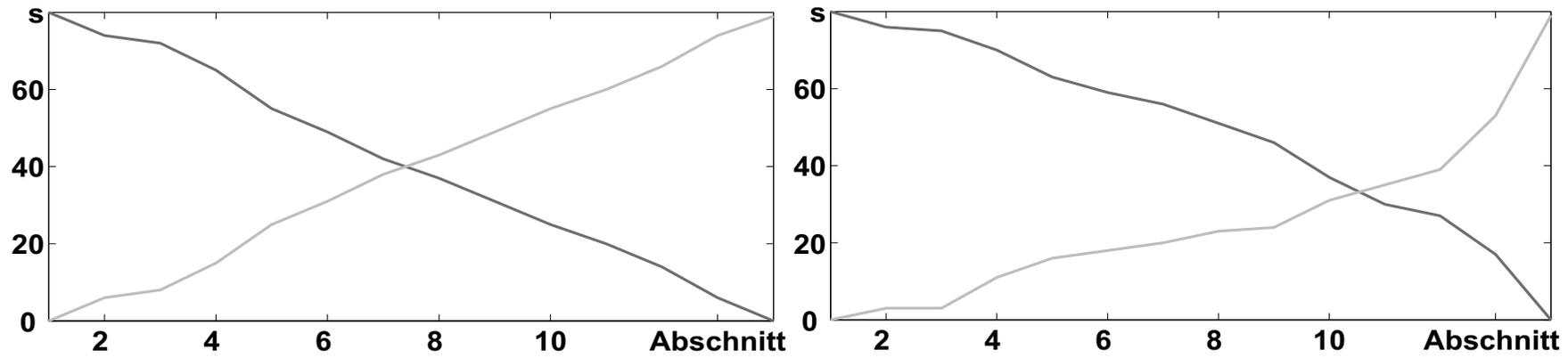
Dies spiegelt sich auch deutlich bei Betrachtung der Fahrschaulinien in Teil b) von Abb. 9.15 wieder. Der Fahrplan mit minimalem Traktionsenergieverbrauch weist Abschaltgeschwindigkeiten zwischen 57 und 72 km/h auf, bei dem system-optimierten Fahrplan schwanken diese zwischen 54 und 78 km/h. Diese Fahrweise hat einen höheren Traktionsenergieverbrauch für den einzelnen Zug zur Folge: 378 kWh im system-optimierten Fahrplan entsprechen dabei einem Mehrverbrauch von 6,8% pro Zug an Traktionsenergie gegenüber dem für den einzelnen Zug optimalen Fall von 355 kWh, wie er mit Hilfe der Dynamischen Programmierung ermittelt werden kann. Allein durch die bessere Nutzung der Bremsenergie kann jedoch der Systemenergieverbrauch um 5% reduziert und die Leistungsspitzen um 17% gesenkt werden.

Ein weiterer bemerkenswerter Punkt bei der Analyse der Fahrschaulinien ist die sichtbare Überlagerung von Anfahrvorgängen bei dem Einsatz des Fahrplans mit minimalem Traktionsenergieverbrauch etwa im Bereich zwischen 600 und 1200 s. Diese Gleichzeitigkeit führt zu hohen Leistungsspitzen im Regime Antrieb, die Gleichzeitigkeit der Bremsvorgänge führt zum Verlust der Bremsenergie. Im system-optimierten Fahrplan sind sowohl die gleichzeitigen Anfahrvorgänge als auch die gleichzeitigen Bremsvorgänge nicht mehr sichtbar und durch Überlagerungen von Anfahr- und Bremsvorgängen ersetzt.

Im Teil a von Abb. 9.16 sind die zeitlichen Verläufe der Größen dargestellt, die zur Ermittlung der Rückspeisegrade genutzt werden. Es ist zu erkennen, dass die angeforderte Leistung im nicht für das System optimierten Fall genauso wie der Anteil ungenutzter Bremsenergie (schwarz dargestellt) deutlich größer sind. Deutlich geringer, und damit ebenfalls höhere Energiekosten verursachend, ist im Fall des Fahrregimes mit minimalem Traktionsenergieverbrauch für den einzelnen Zug auch der Anteil der genutzten Bremsenergie.

Teil b der Abb. 9.16 stellt schließlich die Verläufe der zeitgewichteten Belastungsdauerkurven der Unterwerke für beide Fälle gegenüber. Bei dem für das System von Zügen optimierten Fahrplan treten deutlich geringere Leistungsspitzen sowohl im Kurzzeit-Bereich als auch in dem für die Preisbildung maßgebenden Bereich der Viertelstundenleistung auf.

a) Verteilung der Fahrzeitreserve auf die einzelnen Abschnitte der Strecke



b) Zeit-Geschwindigkeit-Kennlinie für beide Fahrtrichtungen

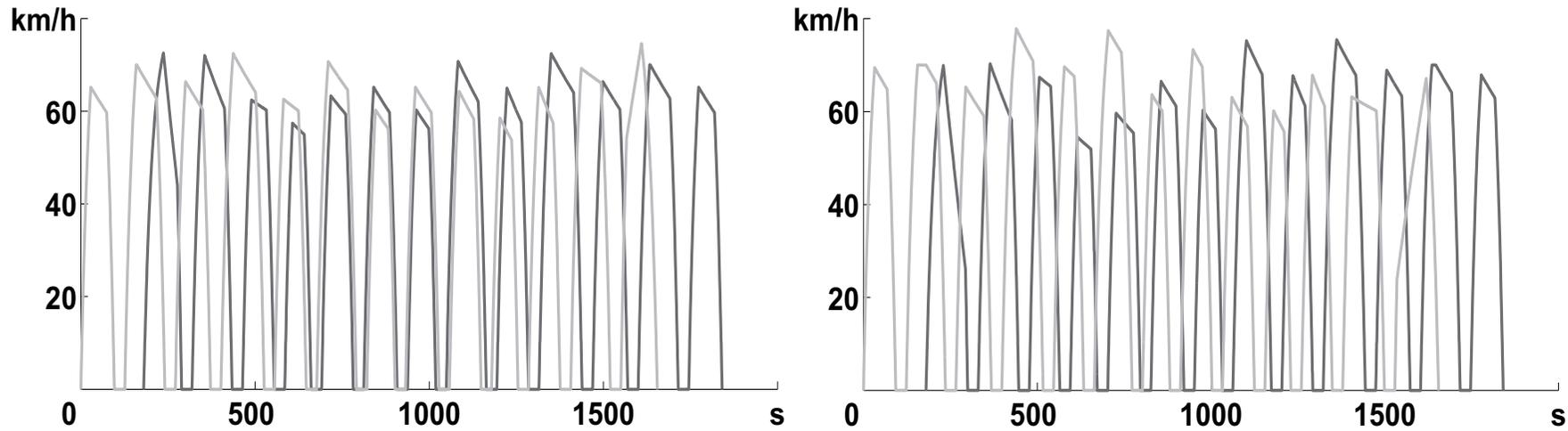
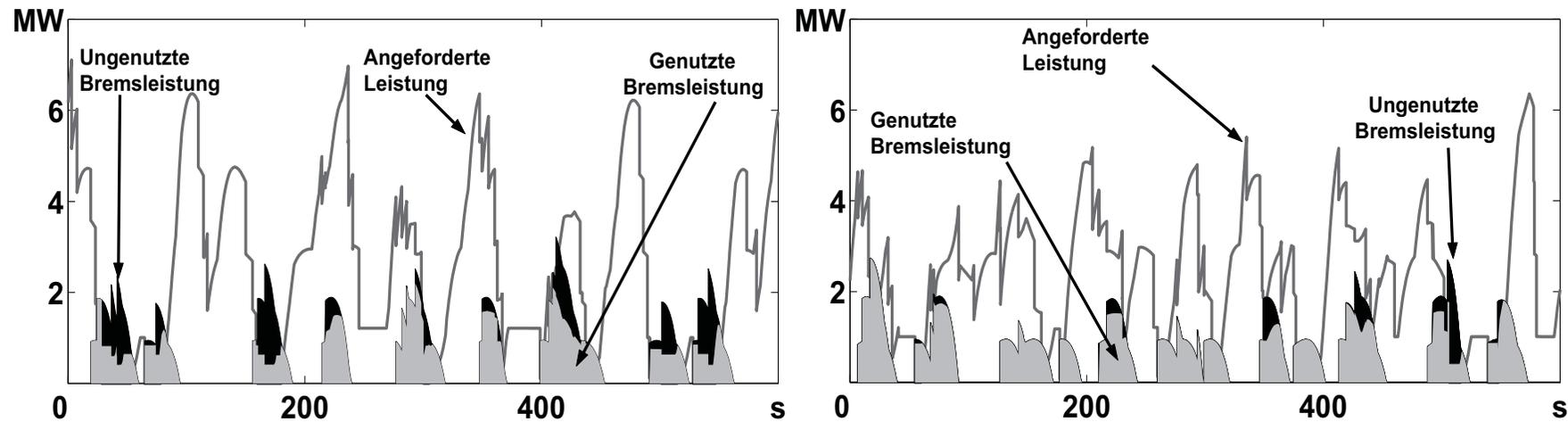


Abbildung 9.15: Vergleich zwischen energieoptimalem Fahrplan für den Einzelzug (links) und dem für minimale 15-min-Leistung des Systems optimierten Fahrplan (rechts) für die S1 Berlin bei einem Takt von 600 s und einem Versatz von 180 s. (I)

a) Aufgenommene Leistung, verfügbare und genutzte Bremsleistung



b) Zeitgewichtete Belastungsdauerkurven der vier Unterwerke

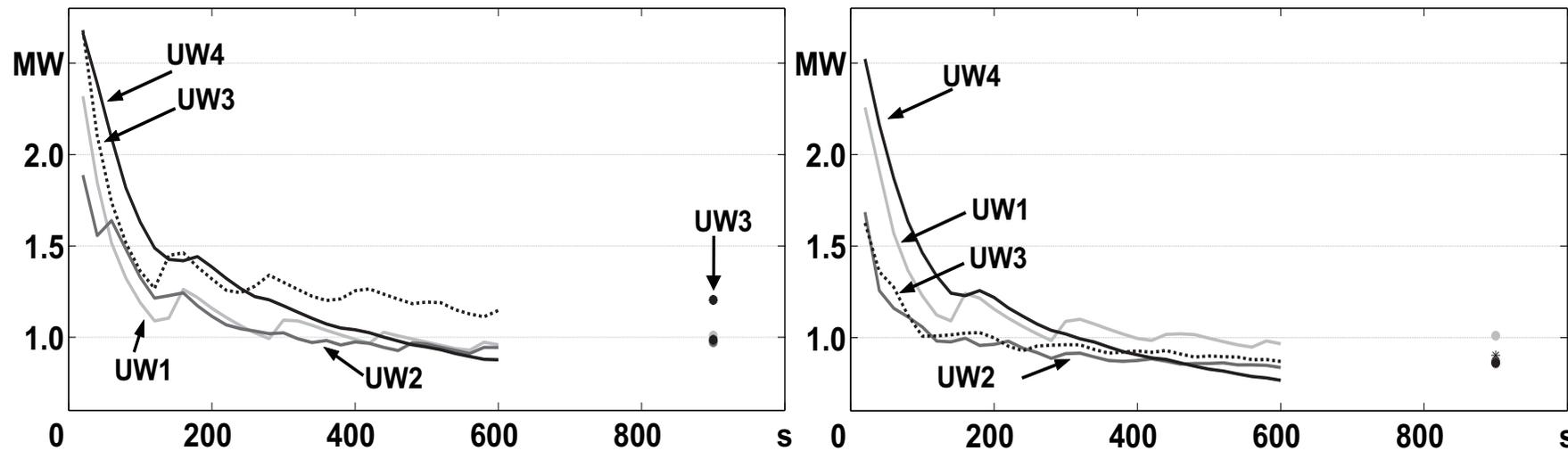


Abbildung 9.16: Vergleich zwischen energieoptimalem Fahrplan für den Einzelzug (links) und dem für minimale 15-min-Leistung des Systems optimierten Fahrplan (rechts) für die S1 Berlin bei einem Takt von 600 s und einem Versatz von 180 s. (II)

### 9.1.2.3 Gütefunktion „Spannung am Stromabnehmer“

Betrachtet man die Spannung am Stromabnehmer des Fahrzeugs (Fahrzeitreservenverteilung für minimale Viertelstundenleistung) in Abb. 9.17, so ist festzustellen, dass insbesondere zu den Zeitpunkten 350, 450 und 1500 s die Spannung mit 600 V etwa 20% unterhalb der Nennspannung von 750 V liegt. In Anbetracht einer zulässigen Spannung von 500 V ist dies noch nicht als kritisch anzusehen. Dennoch wurde für diesen konkreten Fall auch untersucht, ob eine Optimierung der Fahrzeiten mit dem Ziel der Maximierung der minimalen Spannung dazu beitragen könnte, diese hohen Spannungsabfälle zu reduzieren. Alle anderen Parameter des Genetischen Algorithmus wurden beibehalten, das Optimierungsergebnis ist als Spannungsverlauf ebenfalls in Abb. 9.17 dargestellt.

In der Darstellung wird deutlich, dass auch diese Gütefunktion für den Einsatz mit Genetischen Algorithmen geeignet ist: Die minimale Spannung konnte von 598 auf 678 V gesteigert werden. Dies geschieht allerdings nur auf Kosten geringerer Einsparungen bei Energieverbrauch (1,5 % statt 4%) und Senkung der Leistungsspitzen (4% statt 17%).

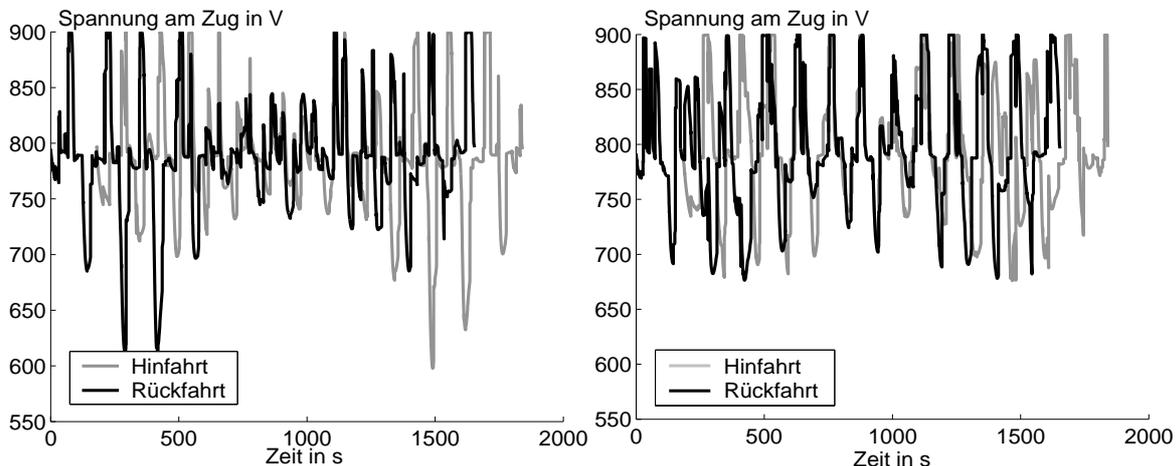


Abbildung 9.17: Spannung am Stromabnehmer: Links für den Fahrplan mit minimaler Viertelstundenleistung, rechts für den Fahrplan mit maximalem Spannungsminimum

### 9.1.2.4 Analyse der Chromosomen der gefundenen Lösungen

In Abb. 9.18 sind die optimierten Lösungen für die Viertelstundenleistung dargestellt in ihrer Ähnlichkeit zur Initiallösung. Dabei sind Gene schwarz eingefärbt, wenn deren Inhalt genau dem der Initiallösung entspricht. Je größer der Unterschied zur Initiallösung, desto heller ist das entsprechende Gen eingefärbt. In dieser Darstellung ist zu erkennen, dass in vielen Fällen Teile der Initiallösung bis in die optimale Lösung vererbt werden. Erklären lässt sich dies mit der Bausteinhypothese, die von GOLDBERG [61] eingeführt und später von anderen theoretisch untermauert wurde [11, 187]. Diese besagt, dass kurze, für das Problem wichtige Bausteine eine hohe Überlebenswahrscheinlichkeit im Optimierungszyklus der Genetischen Algorithmen aufweisen.

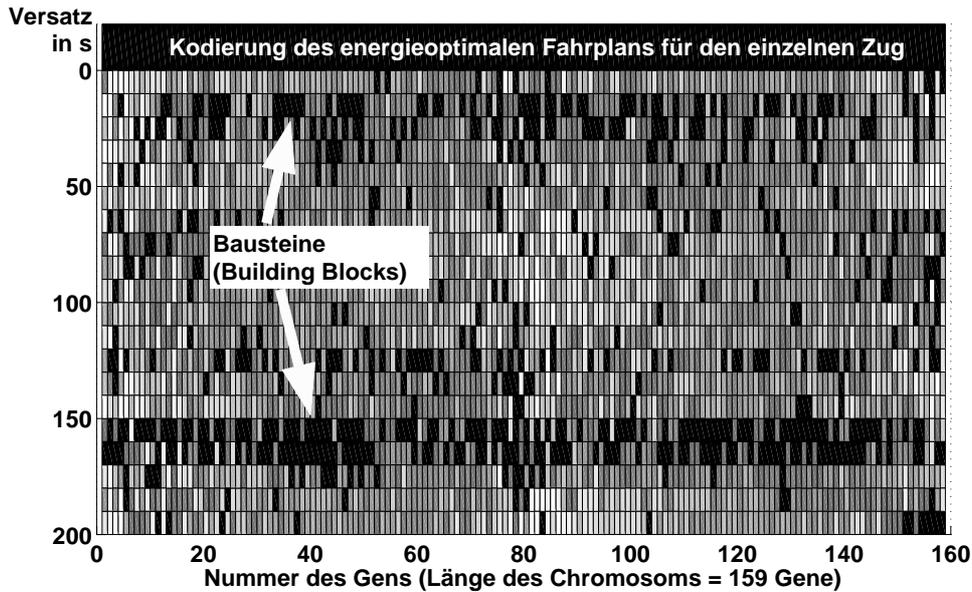


Abbildung 9.18: Überprüfung der Baustein-Hypothese am praktischen Beispiel: Ähnlichkeiten der Chromosome der Initiallösung und der optimierten Lösung (aus [6])

### 9.1.2.5 Vergleich unterschiedlicher Regelungsstrategien bei stochastisch schwankenden Haltezeiten

Die bisher in diesem Kapitel dargestellten Ergebnisse wurden alle unter der Annahme konstanter Haltezeiten an den Stationen ermittelt. Für die Umsetzung der Ergebnisse in den praktischen Betrieb, z.B. unter Nutzung eines Fahrerassistenzsystems nach Abb. 1.2, muss ebenfalls untersucht werden, wie die Werte der Gütefunktion sich ändern, wenn die Haltezeiten zufälligen Schwankungen unterworfen sind.

Dazu wird ein Regler benötigt, mit dem bei Abweichung der Ist-Abfahrtszeit vom Sollwert eine optimale Fahrzeit ermittelt wird (siehe Abb. 9.19). Ein solcher Regler muss Bestandteil eines Systems zur vollautomatischen Zugsteuerung oder eines Fahrerassistenzsystems sein.

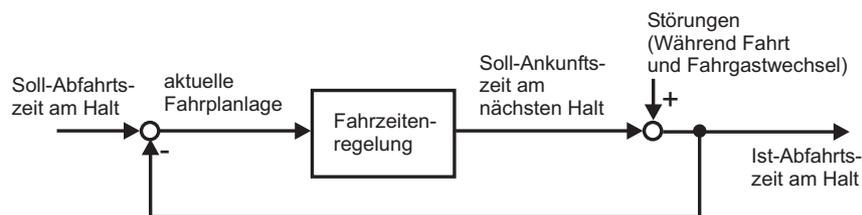


Abbildung 9.19: Regelkreis zur Fahrzeitenregelung

Eine einfache Lösung besteht in der Nutzung eines Proportionalreglers mit Verstärkungsfaktor 1. Die Soll-Fahrzeit ergibt sich dabei aus der geplanten Ankunftszeit abzüglich der tatsächlichen Abfahrtszeit. Naturgemäß stellt dabei die zeitoptimale Fahrweise eine untere Schranke für die Sollfahrzeit dar.

Bezüglich der untersuchten Gütefunktionen ist dieser Regler durch zwei wesentliche Punkte charakterisiert:

1. Die Synchronisation von Anfahr- und Bremsvorgängen spielt sich im Sekunden-Bereich ab. Da der Regler versucht, am nächsten Halt auf die Sekunde pünktlich anzukommen, können synchronisierte Vorgänge auch im praktischen Betrieb wie geplant realisiert werden.
2. Die exakt pünktliche Ankunft am nächsten Halt fordert bei großen Verspätungen sehr kurze Fahrzeiten, die einen hohen Traktionsenergieverbrauch des einzelnen Zuges zur Folge haben (vgl. Abb. 8.3 auf Seite 144). Dies muss sich selbstverständlich sowohl im Systemenergieverbrauch als auch bei der Betrachtung der Leistungsspitzen auswirken.

Zur Ermittlung optimaler Fahrzeiten mit dem Gütekriterium „Minimierung des Traktionsenergieverbrauchs des einzelnen Zuges“ wurde die Dynamische Programmierung (DP) verwendet (vgl. Abschnitt 8.1.2.2). Diese ist auch zur Online-Fahrzeitenregelung hervorragend geeignet: Dabei wird versucht, an jedem Halt anhand der aktuellen Fahrplanlage die Fahrzeitreservenverteilung bis zum Ziel der Fahrt zu finden, mit der der Zug ein Minimum an Traktionsenergie verbraucht. Steht mehr Fahrzeitreserve zur Verfügung, als ursprünglich geplant (z.B. bei kurzen Haltezeiten), so wird diese Reserve auf alle Abschnitte bis ins Ziel verteilt und nicht vollständig auf dem unmittelbar folgenden Abschnitt verbraucht (wie beim P-Regler, vgl. Abb. 9.20). Ist weniger Reserve vorhanden als geplant, dann wird versucht, am Zielpunkt wieder im Plan zu sein, d.h. auf den folgenden Abschnitten jeweils etwas schneller zu fahren, und nicht so schnell wie möglich wieder im Plan zu sein (wie beim P-Regler, vgl. Abb. 9.20).

Im Vergleich zu dem oben vorgeschlagenem einfachen P-Regler sollte der auf der Dynamischen Programmierung basierende Regler eine deutliche Reduktion des Traktionsenergieverbrauchs der einzelnen Züge ermöglichen. Dies hat allerdings auch das mögliche Aufgeben von koordinierten Anfahr- und Bremsvorgängen zur Folge.

Um beide Regelstrategien auch quantitativ vergleichen zu können, wurden jeweils 200 Szenarien mit schwankenden Haltezeiten auf der im 10-min-Takt verkehrenden S1 der Berliner S-Bahn simuliert.

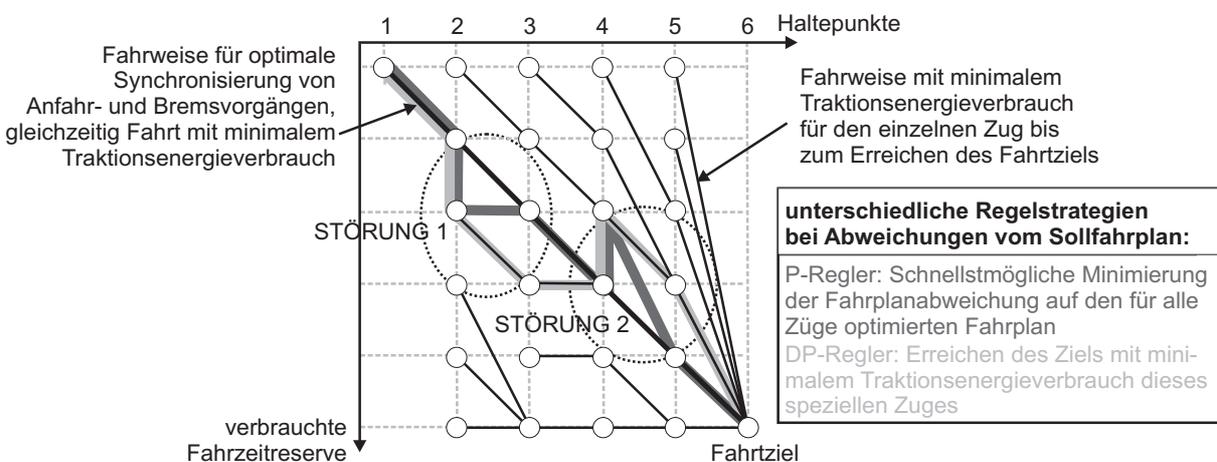


Abbildung 9.20: Vergleich unterschiedlicher Regelstrategien bei Abweichungen vom optimalen Fahrplan

Die Haltezeiten wurden dabei für jeden Zug und für jeden Halt gleichverteilt zufällig in einem Intervall  $[t_H - \Delta t; t_H + \Delta t]$  ermittelt. Die maximale Haltezeitabweichung  $\Delta t$  wurde mit 10, 15, 20 und 25 s angenommen.

In jedem dieser Zufallsversuche wurden die Leistungen in den Unterwerken während einer Zeitdauer von 20 min (zwei ganze Takte) aufgezeichnet und anschließend die Werte für Energieverbrauch, Viertelstundenleistung und netzbezogenen Rückspeisegrad ermittelt. Als Synchronisationszeiten wurden dabei die bereits oben ausführlich erläuterten 180 s, bei denen die mögliche Einsparung durch Steuerung eines Systems von Zügen sehr groß ist, sowie der Wert von 120 s verwendet, bei der der Unterschied zwischen beiden Fahrplänen minimal ist. Als Fahrpläne wurden für beide Synchronisationszeiten jeweils der mit geringstem Traktionsenergieverbrauch für den einzelnen Zug als auch der für den entsprechenden Versatz bezüglich der 15-min-Leistung optimale Fahrplan untersucht.

Die Ergebnisse dieser Zufallsversuche sind in Abb. 9.21 zusammengefasst.

Für die Synchronisationszeit von 180 s wurde für den Fahrplan mit minimalem Traktionsenergieverbrauch bei der geringsten untersuchten Schwankungsbreite von  $\Delta t = 10$  s neben dem hier eigentlich zu verwendendem Regler basierend auf der Dynamischen Programmierung (DP-Regler) auch der einfache P-Regler untersucht. Alle weiteren Untersuchungen mit dem energieoptimalen Fahrplan für den Einzelzug wurden mit dem DP-Regler durchgeführt.

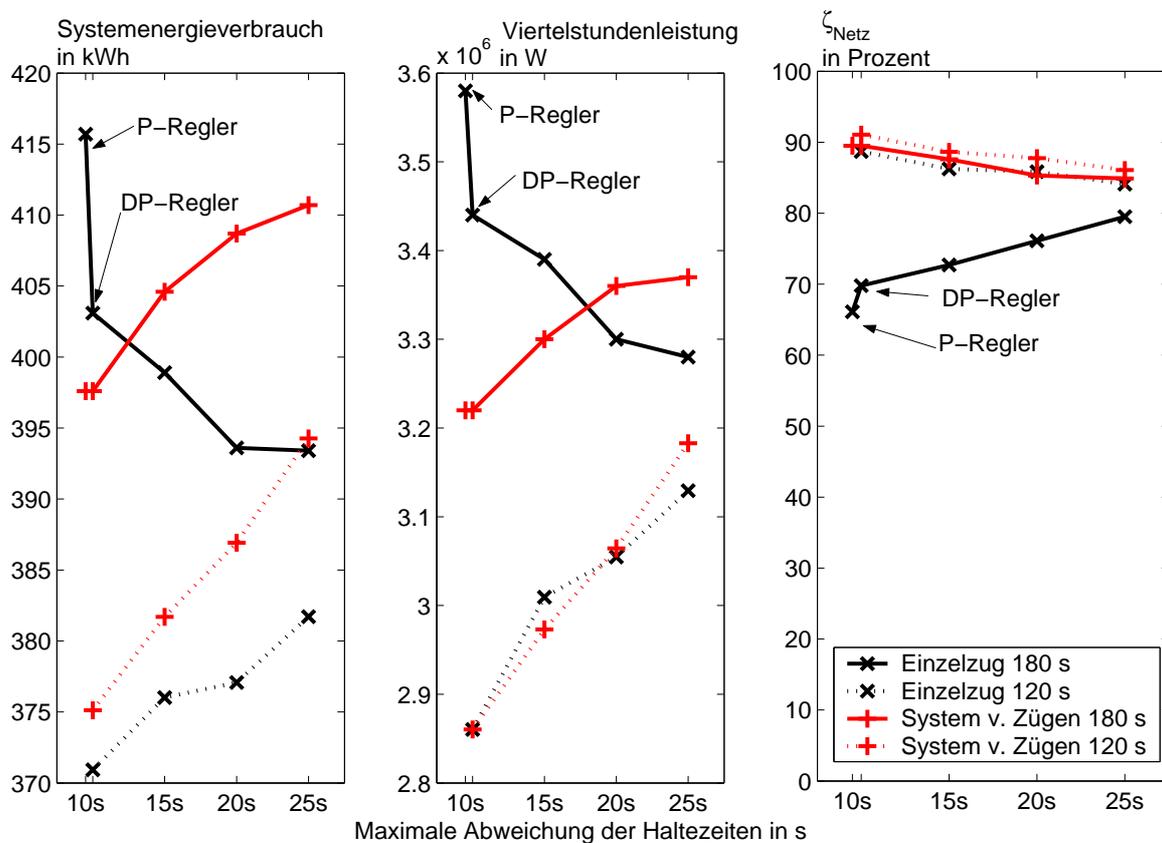


Abbildung 9.21: Ergebnisse der Zufallsversuche für verschiedene Synchronisationszeiten und verschiedene Methoden der Fahrzeitenregelung

Die Ergebnisse der Zufallsversuche lassen sich in folgenden vier Feststellungen zusammenfassen:

1. Wie zu erwarten war, liegen sowohl Energieverbrauch als auch Viertelstundenleistung bei stochastisch schwankenden Haltezeiten über den Werten, die für den optimalen Fahrtverlauf und konstante Haltezeiten ermittelt wurden.
2. Bei steigender Schwankungsbreite der Haltezeit, nimmt mit dem P-Regler sowohl der Energieverbrauch als auch die Viertelstundenleistung deutlich zu, unabhängig von der Synchronisationszeit.
3. Mit dem DP-Regler ist es möglich, gegenüber dem P-Regler deutlich an Traktionsenergie einzusparen. Dies wird insbesondere bei Betrachtung des Systemenergieverbrauchs für große Schwankungsbreiten der Haltezeit deutlich und ist unabhängig von der Synchronisationszeit.
4. Der Rückspeisegrad ist in allen untersuchten Fällen immer höher bei dem für das System von Zügen optimierten Fahrplan.

Für die Synchronisationszeit 180 s lassen sich weitere drei Aussagen treffen:

1. Bei Anwendung des Fahrplans mit minimalem Traktionsenergieverbrauch des einzelnen Zugs führt die Verwendung des P-Reglers zu deutlich schlechteren Ergebnissen als die Verwendung des DP-Reglers. Bei der hier untersuchten Synchronisationszeit 180 s weist allerdings der Fahrplan mit minimalem Traktionsenergieverbrauch extrem schlechte Werte für den Rückspeisegrad und die anderen Energiegrößen auf. Jede Abweichung vom Sollfahrplan führt hier zu einer Verbesserung der Situation und der Gütekriterien. Beim DP-Regler werden selbst kleine Abweichungen gleichmäßig auf die Strecke verteilt (vgl. Abb. 9.20), so dass es hier zu einer weitreichenden Änderung der ursprünglichen Situation kommt. Mit dem P-Regler wird hingegen versucht, so schnell wie möglich zu dem in diesem Falle sehr ungünstigen Sollfahrplan zurückzukehren.
2. Je größer die Abweichungen der Haltezeit werden, desto mehr sinkt der Systemenergieverbrauch bei Minimierung der Traktionsenergie des einzelnen Zuges. Dieses Verhalten ist ebenfalls zu begründen mit den durch den Regler ermöglichten Abweichungen von der extrem schlechten Ausgangssituation (ungünstiger Rückspeisegrad).
3. Je größer die Abweichungen vom Sollfahrplan, desto günstiger steht der für den Einzelzug optimierte Fahrplan gegenüber dem für das System von Zügen optimierten Fahrplan da. Dies hängt vor allem mit dem stark ansteigenden Traktionsenergieverbrauch des einzelnen Zuges bei Verwendung des P-Reglers zusammen.

**Alle diese Erkenntnisse weisen darauf hin, dass durch die Optimierung eines Systems von Zügen auch im praktischen Betrieb Einsparungen bei den Energiekosten erzielt werden können, insbesondere durch Vermeidung von Leistungsspitzen. Dies ist vor allem bei**

**geringen Abweichungen vom Sollfahrplan der Fall, wie sie durch vollautomatische Systeme erreicht werden können.** Dazu ist nur ein einfacher Fahrzeitenregler wie der hier vorgestellte P-Regler notwendig.

Übersteigt die Schwankungsbreite der Haltezeiten die durchschnittliche Dauer der Anfah- und Bremsvorgänge, so ist eine Offline-Optimierung bezüglich der bestmöglichen Synchronisation von Anfah- und Bremsvorgängen nicht sinnvoll. Während eine Fahrzeitenregelung mit dem Ziel der Senkung des Traktionsenergieverbrauches (basierend auf der Dynamischen Programmierung) in einem solchen Falle zur Senkung des Systemenergieverbrauches beitragen kann, müssten zur Senkung von Leistungsspitzen sowie zur Vermeidung von kritischen Spannungen Algorithmen zur Online-Regelung eingesetzt werden (z.B. das zur Vermeidung von Spannungseinbrüchen entwickelte System für die Schnellbahn BART [63, 65]).

### 9.1.3 Ermittlung optimaler Haltezeiten für die Linie 1 der Metro VAL in Lille

Im vollautomatischen Metro-System vom Typ VAL in Lille kann der Betreiber bei einem Betriebsprogramm ausschließlich Zugfolgezeiten und Haltezeiten problemlos anpassen, ohne das System selbst modifizieren zu müssen [52]. Deshalb soll in diesem Abschnitt untersucht werden, ob durch geringfügige Modifikation der Haltezeiten Verbesserungen bei den Energiekosten zu erreichen sind.

Als Optimierungskriterium soll hier die mögliche Senkung der zur Ermittlung der Leistungskosten verwendeten 10-min-Leistungen im systembedingt kürzesten Takt von 60 s betrachtet werden. Hier besteht von Seiten des Betreibers ein echtes Interesse, da bei Überschreitung von Spitzenwerten, die mit dem Energieversorgern verhandelt werden, zusätzliche hohe Kosten entstehen [53]. Der festgelegte Spitzenwert seinerseits hat wiederum Auswirkungen auf den zu bezahlenden Arbeitsanteil der Energiekosten, d.h. den Preis pro kWh verbrauchter Energie. Als Optimierungskriterium wurde deshalb die Summe der Spitzenleistungen beider Mittelspannungsunterwerke (Blason und Wazemmes) verwendet (vgl. Abb. 9.2). Bei der Optimierung ist allerdings zu beachten, dass für den gesamten Tag nur ein einziger Satz an Haltezeiten zur Verfügung steht, d.h. die gefundenen Haltezeiten müssen auch bei allen anderen Zugfolgezeiten eingesetzt werden.

#### 9.1.3.1 Untersuchung verschiedener Flexibilisierungsszenarien für Haltezeiten

Bei der Modifikation von Haltezeiten wurden vier Szenarien untersucht. Zum einen existieren beim Wendevorgang der Züge Reserven in der Größenordnung von 10 bis 15 Sekunden, für die ein optimaler Einsatzort entlang der Strecke gesucht wurde (Variante 1 und 2). Für die Varianten 3 und 4 soll von der Annahme ausgegangen werden, dass eine Reduktion der Haltezeit um 1 s pro Halt den Betrieb noch planmäßig durchführbar lässt. Damit entstehen zusätzlich zu den Wendezeitreserven von 10 und 15 s pro Fahrtrichtung 18 s Haltezeitreserve, die zur Reduktion der Energiekosten neu verteilt werden sollen.

Die Zahl Stationen auf der untersuchten Linie (18) führt zu einem Versagen der binären Ko-

Variante Nr.		1	2	3	4
$P_{eff,10\ min}$ in MW	Heute	Wendezeit verkürzt um 10 s	Wendezeit verkürzt um 15 s	-10 s Wendezeit und 1 s pro Halt	-15 s Wendezeit und 1 s pro Halt
Wazemmes	3,10 (100%)	2,90 (93%)	2,81 (91%)	2,79 (90%)	2,75 (89%)
Blason	2,14 (100%)	2,15 (101%)	2,15 (101%)	2,07 (97%)	2,08 (97%)
Summe beide Uw (Opt.kriterium)	5,24 (100%)	5,05 (96%)	4,96 (95%)	4,87 (93%)	4,84 (92%)

Tabelle 9.1: 10-min-Effektivleistungen bei Modifikation der Haltezeiten mittels GA

dierung der einzelnen Gene, da dieser Wert weit von den nächst größeren Zweierpotenz (32) entfernt ist (vgl. auch [187]). Da bei Verwendung der GEATbx [135] alle Gene oberhalb der Grenze (zwischen 19 und 32) auf den Wert dieser Grenze herunterkorrigiert werden, ergibt sich hier ein sehr ungünstiges Bild bei der Erstellung der Startpopulation (Viele Werte an der oberen Grenze), das natürlich auch Auswirkungen auf den Verlauf der Optimierung hat. Deswegen wurde für die Haltezeitoptimierung eine reellwertige Kodierung der Variablen vorgenommen (Verwendung einer Abwandlung des „Breeder GA“ [134]), bei der die untere Grenze für die einzelnen Gene um 1 verkleinert wurde. Aus dem reellen Wert des Gens wurde durch Aufrunden auf die jeweils nächstgrößere ganze Zahl die Abschnittsnummer dekodiert, auf der die Reserve zum Einsatz kommen sollte.

Die Untersuchungsergebnisse sind für die vier untersuchten Szenarien in Tabelle 9.1 zusammengefasst. Es ist zu erkennen, dass durch die Modifikation von Haltezeiten mit Hilfe Genetischer Algorithmen die Summe der 10-min-Effektivleistungen beider Unterwerke um 4 bis 8% gesenkt werden können. Die einzelnen Werte liegen dabei bis zu 11% unter ihrem heutigen Wert. Die Größe der zu verteilenden Haltezeitreserve hat dabei den entscheidenden Einfluss auf das Optimierungspotenzial: Je mehr Reserve flexibel auf die einzelnen Halte verteilt werden kann, desto mehr können die Leistungsspitzen reduziert werden.

Die Leistungsverläufe in den Mittelspannungsunterwerken Blason und Wazemmes sind in Abb. 9.23 für den heutigen Betrieb und die vorgeschlagene Lösung bei Variante 4 einander gegenübergestellt. Dabei wird der Effekt der Optimierung anhand der deutlich ausgeglicheneren Leistungskurve besonders im Unterwerk Wazemmes sichtbar.

Wie bereits erwähnt, muss die ermittelte Haltezeitenverteilung für alle Zugfolgezeiten angewendet werden. Deshalb wurden in einem nächsten Schritt Simulationen für jede der Varianten in allen gefahrenen Zugfolgezeiten durchgeführt, bei denen die Gefahr der Überschreitung des Maximalwertes der 10-min-Leistung besteht. Anhand der Analyse der Zugfolgezeiten für den heutigen Betrieb (vgl. Abb. 9.5) wurde festgestellt, dass bei Betrachtung dieses Gütekriteriums einzig die Intervalle 66, 72 und 80 s interessant sind, da nur hier die Gefahr besteht, die ermittelten Maximalwerte zu überschreiten. Das Ergebnis dieser Simulationen ist in Abb. 9.24 dargestellt. Es zeigt sich, dass mit den für eine Zugfolgezeit von 60 s gefundenen optimalen Hal-

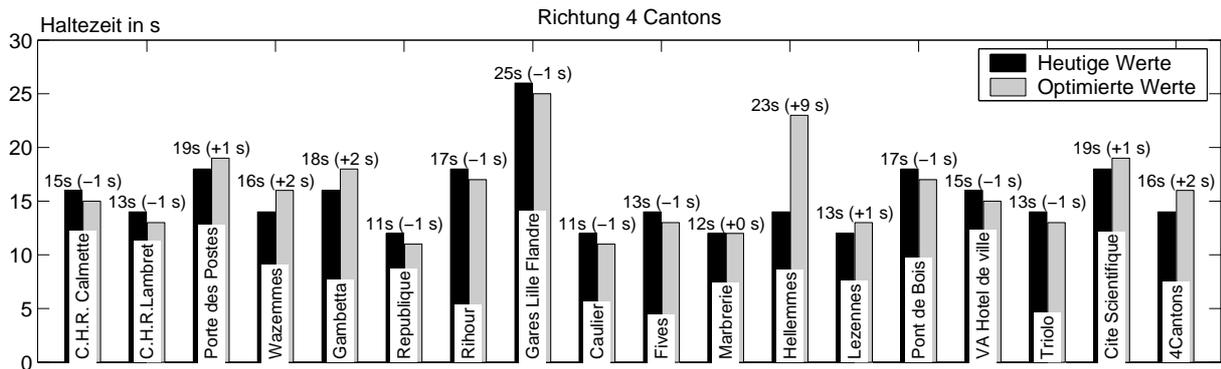
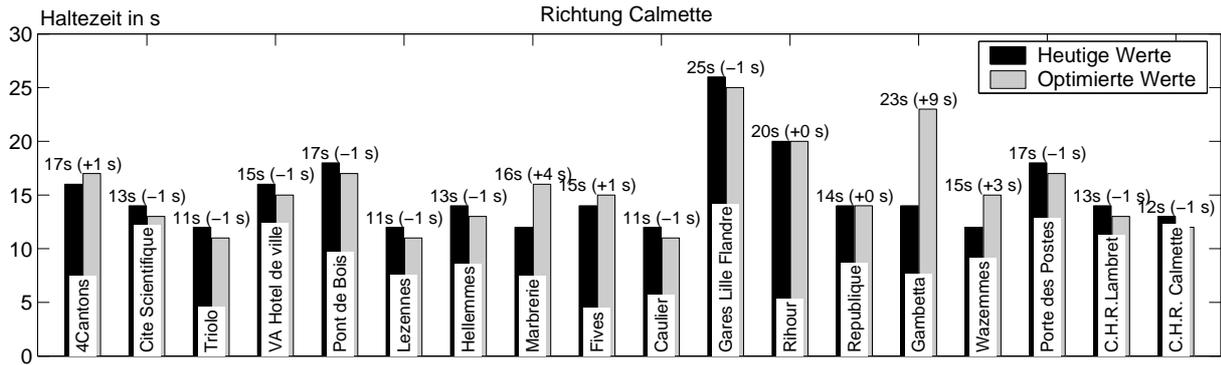


Abbildung 9.22: Heutige und optimale Haltezeiten bei Optimierung nach Variante 4

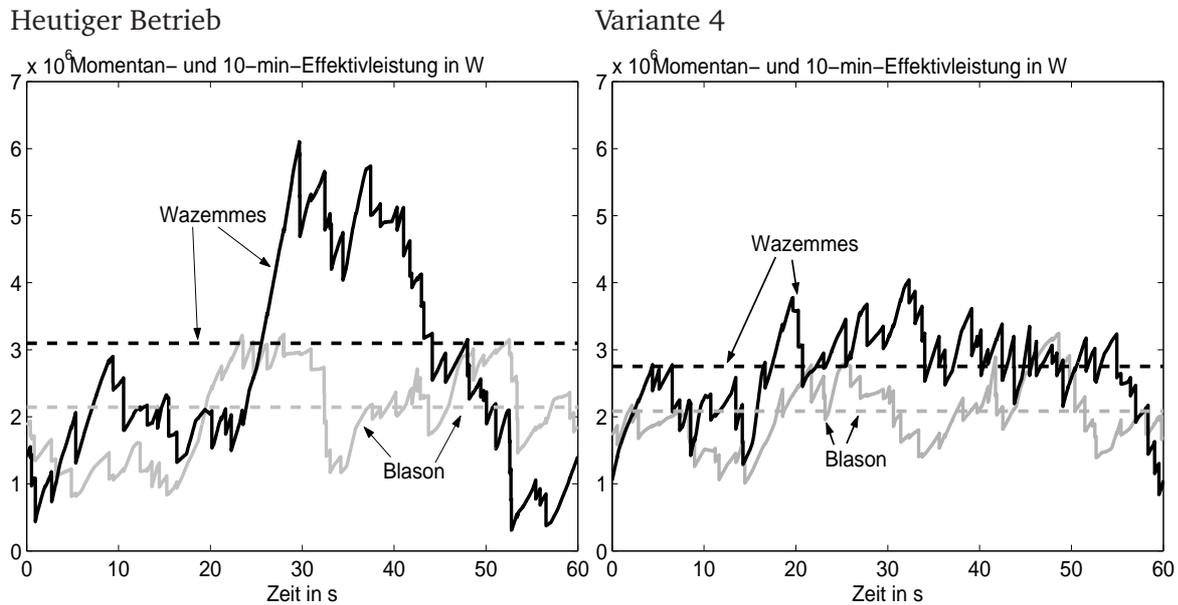


Abbildung 9.23: Leistungsverläufe in den Mittelspannungsunterwerken Blason und Wazemmes, die gestrichelten Linien stellen den Effektivwert der Leistung dar

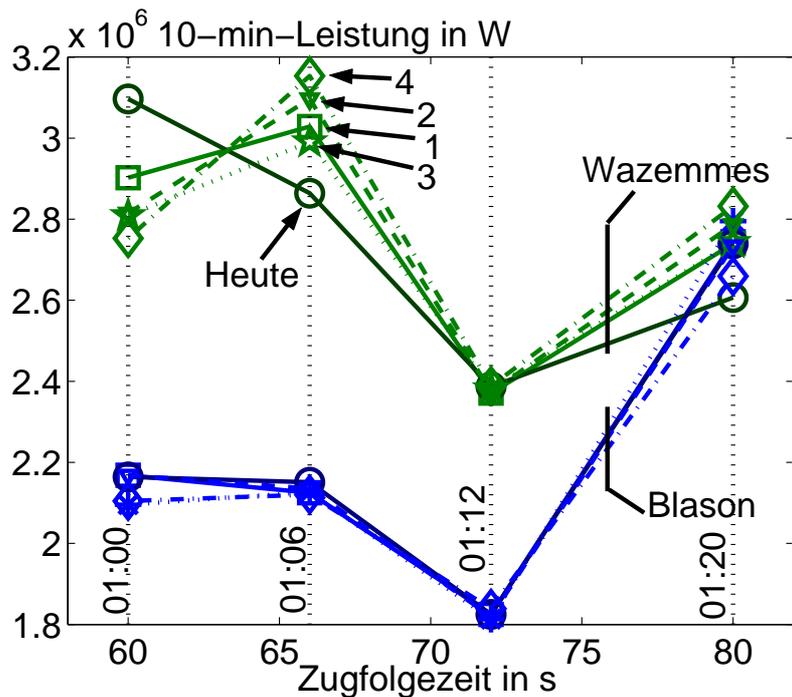


Abbildung 9.24: Analyse der Spitzenwerte der 10-min-Leistung für verschiedene Zugfolgezeiten mit der für die Zugfolgezeit von 60 s gefundenen optimalen Lösung (Variante 4)

zeiten der Spitzenwert der Leistung nunmehr bei einer Zugfolgezeit von 66 s auftritt. Dieser Wert übertrifft in allen Fällen sogar den heute vorhandenen Spitzenwert.

Die praktische Nutzung des ermittelten Einsparpotenzials ist also nur bei Verzicht auf die Anwendung einer Zugfolgezeit von 66 s möglich. Ob dieser durch die kürzere oder längere Zugfolgezeit (60 s oder 72 s) ersetzt werden muss, ist eine Frage, die der Betreiber anhand verschiedener weiterer Kriterien beurteilen muss (Frage der Zahl benötigter Züge, des Verkehrsaufkommens etc.). Auf die ebenfalls kritische Zugfolgezeit von 80 s sollte schon aus Gründen des hohen Energieverbrauchs verzichtet werden (vgl. Parameteranalyse Lille in Abb. 9.4 auf Seite 161).

Offenbar ist es also nicht ausreichend, eine einzige Zugfolgezeit als Grundlage für die Ermittlung des Gütekriteriums zu verwenden. Deshalb wurden noch einmal Optimierungen mit Hilfe der Genetischen Algorithmen durchgeführt mit einem Gütekriterium, indem der Maximalwert der Effektivleistungen bei 60 und 66 s Zugfolgezeit berücksichtigt wird. Dabei wurden naturgemäß geringere Einsparungen erzielt. Mit der flexiblen Variante 4 lagen diese mit einer maximalen Leistung von 4,92 MW nur noch bei 6% (zum Vergleich: Einsparung für 60 s Zugfolgezeit allein: 8% für diese Variante).

### 9.1.3.2 Analyse des Optimierungsverlaufs und der verwendeten Kodierung

Die gleichzeitige Optimierung mehrerer Zugfolgezeiten (60 und 66 s) wurde mit verschiedenen Einstellungen für das Optimierungsverfahren wiederholt durchgeführt. Wichtigster zu untersuchender Parameter war in diesem Fall die Populationsgröße. Diese wurde in einem Bereich von

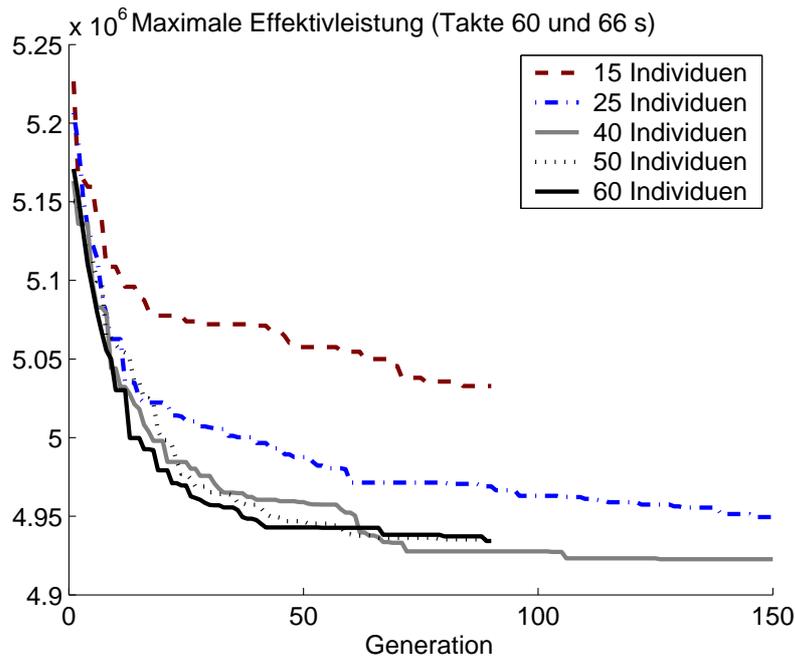


Abbildung 9.25: Verlauf der Gütefunktion während der Optimierung

15 bis 60 variiert, die Zahl Generationen wurde in zwei Fällen mit 150 festgelegt, da die prinzipielle Größenordnung des erreichten lokalen Optimums allerdings schon deutlich früher zu erkennen war, wurden die folgenden Optimierungsdurchläufe nur noch mit 90 Generationen durchgeführt.

Es ist zu bemerken, dass bei geringer Populationsgröße von weniger als 40 Individuen das beste in allen Durchläufen erreichte Ergebnis immer deutlich verfehlt wurde (nur zwischen 65 und 90% der maximalen Einsparung erreicht). Bei Populationen mit mindestens 40 Individuen wurden i.A. 95% der maximal möglichen Einsparung bereits nach 90 Generationen erreicht.

Interessant in diesem Zusammenhang ist die Betrachtung der in der Population vorhandenen Vielfalt an möglichen Lösungen im Laufe der Generationen. Wie in Abschnitt 8.1.2 beschrieben, hat jede mögliche Verteilung von Haltezeitreserve verschiedene mögliche Repräsentationen als Chromosom. In Abb. 9.26 ist dargestellt, wie viele durch Rekombination und Mutation erzeugten Individuen Lösungen entsprechen, die bereits in früheren Generationen auftraten. Es ist zu erkennen, dass dieser Wert naturgemäß während der ersten Generationen sehr gering ist, dann aber sehr schnell auf Werte zwischen 80 und 100 Prozent ansteigt.

Im Sinne des Optimierungsverfahrens kann dies gedeutet werden als eine eher explorative Suche während der ersten Generationen und eine anschließende Tiefensuche um ein lokales Optimum während der folgenden Generationen. Je größer die Zahl Individuen in einer Population, desto länger bleibt die Diversität in einer Population erhalten, dies ist auch in Abb. 9.26 deutlich zu erkennen.

Die Vielzahl qualitativ ähnlicher Lösungen, die bei diesen Optimierungsdurchläufen erhalten wurden, bestätigen die These, dass der Suchraum für dieses Problem sehr viele lokale Optima aufweist.

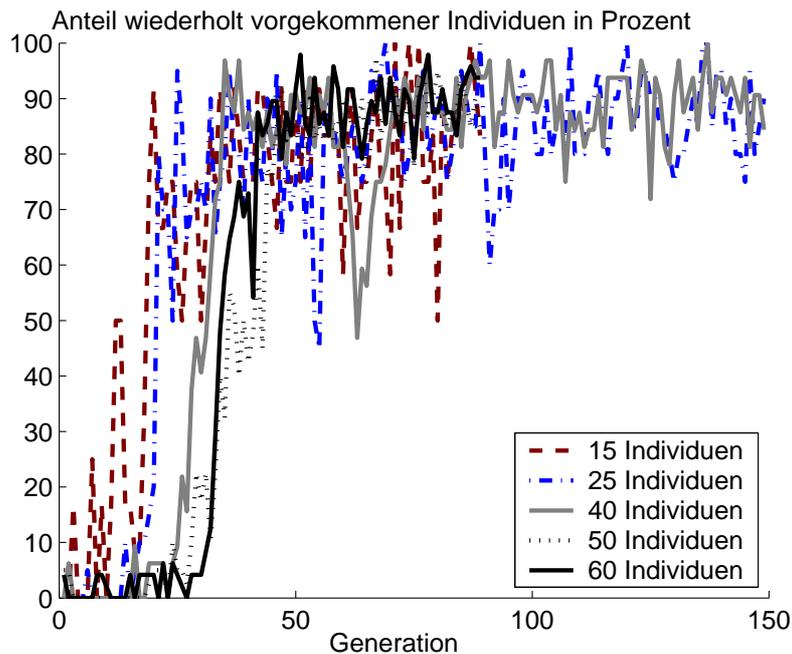


Abbildung 9.26: Anteil der wiederholt auftretenden Individuen während der Optimierung

## 9.2 Analyse von Übergängen zwischen verschiedenen Zugfolgezeiten für die Linie 1 der Metro vom Typ VAL in Lille

Die Metro VAL in Lille ist gekennzeichnet durch eine besonders gute Anpassung des Verkehrsangebots an die Verkehrsnachfrage. Diese Anpassung wird allein durch Steuerung der Zugfolgezeit realisiert (vgl. Abb.en 1.4 und 1.9). Solche Übergänge werden in Lille ausschließlich nach dem zu befördernden Verkehrsaufkommen festgelegt und nach Abb. 8.8 meist sprunghaft durchgeführt. Dabei treten laut Aussage der Betreiber oftmals Probleme bei der Energieversorgung auf (hohe Leistungsspitzen) [53].

Im Gegensatz zu der im Teil II dieser Arbeit untersuchten Flexibilisierung von Zugfolgezeiten bei Überlagerung mehrerer Linien besteht bei der auf separatem Gleiskörper verkehrenden Linie 1 der Metro in Lille die Möglichkeit, durch geringfügige Modifikation der Zugfolgezeiten Situationen außergewöhnlicher Belastung der Anlagen der Bahnenergieversorgung zu vermeiden.

Da eine solche Modifikation von Zugfolgezeiten zur Flexibilisierung von Anfahr- und Bremsvorgängen bislang theoretisch nicht untersucht wurde, wurde für diese Fallstudie ein konkreter Fall in der Morgenspitze von Lille betrachtet. Hier werden im heutigen Betrieb nach einer langen Phase mit 120 s-Zugfolge drei Fahrten im Abstand von 72 s auf die Strecke geschickt, danach folgt ein längeres Intervall mit Fahrten im Abstand von 60 s. Bei Betrachtung dieses Übergangs in der Diktion von Abschnitt 8.2 ergibt sich hier eine Zugfolgezeitreserve von 36 s die auf 3 Zugfahrten des Übergangs verteilt werden muss. Der Suchraum ist mit 127 Varian-

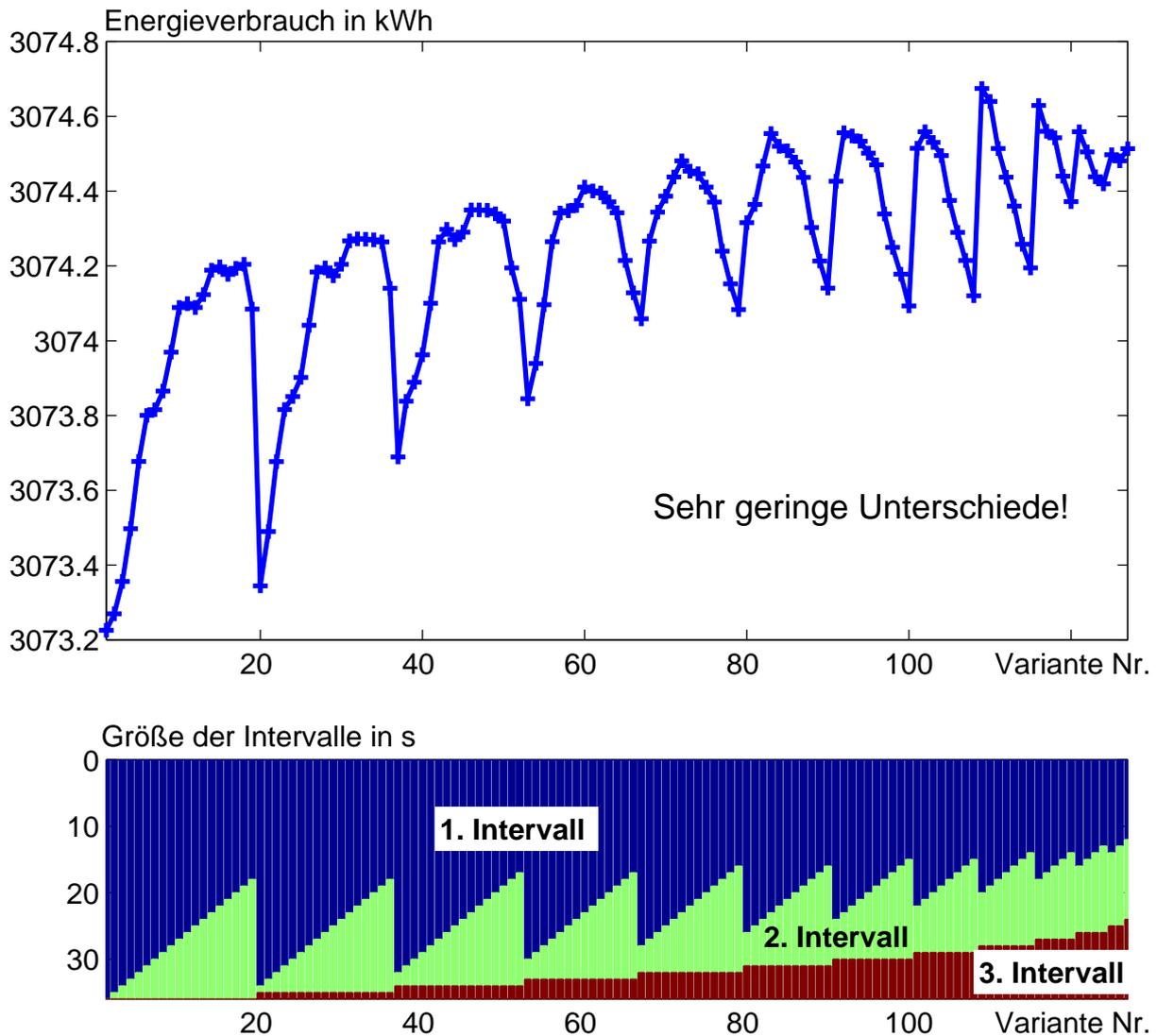


Abbildung 9.27: Darstellung aller möglichen Varianten bei einem Übergang der Dauer 216 s von einer Zugfolgezeit von 120 s auf 60 s sowie des dazugehörigen Energieverbrauchs

ten bei sekundengenauer Zugsteuerung sehr klein, so dass eine Optimierung mit vollständiger Enumeration durchgeführt werden kann. Der Zeitraum, für den Simulationen der Anlagen der Bahnenergieversorgung durchgeführt werden müssen, beträgt 50 Minuten. Diese Simulationen, die zur Berechnung des Wertes der Gütefunktion für jede Lösung notwendig sind, dauern auf einem PC mit Pentium-IV-2,4 GHz etwa 20 Minuten, so dass alle Lösungen des Suchraums in etwa zwei Tagen berechnet werden können. Der Systemenergieverbrauch in diesem Zeitraum ist für alle möglichen Übergangsvarianten in Abb. 9.27 dargestellt.

Dabei sind zwei Punkte auffällig:

1. Die Größenordnung, in der hier Verbesserungen bezüglich des Systemenergieverbrauchs zu erreichen sind, sind marginal. Im dargestellten Beispiel beträgt der Unterschied zwi-

schen Maximum und Minimum aller Varianten gerade einmal 1,5 kWh, deren Einkaufspreis bei etwa 15 Cent liegen dürfte<sup>3</sup>.

2. Immer bei großen ersten Intervallen weist der Energieverbrauch ein lokales Minimum auf. Es scheint deshalb bei diesem Übergang zweckmäßig zu sein, auf die drei Fahrten im 72-s-Takt zu verzichten und nach einem Intervall von 96 s direkt in den 60-s-Takt überzugehen, wenn bei dieser Variante trotzdem das Verkehrsaufkommen bewältigt werden kann (Der erste Zug muss in dieser Variante mehr Fahrgäste befördern).

Betrachtet man das heutige Regime (Variante 127) und das bezüglich des Systemenergieverbrauchs optimale Regime (Variante 1) genauer (siehe Abb. 9.28), so fällt z.B. bei der Darstellung der zeitgewichteten Belastungsdauerkurven auf, dass insbesondere im Kurzfristbereich Unterschiede auftreten. Die für die Preisbildung massgebenden Werte der 10-min-Leistung sind hingegen nicht verändert. Die kurzfristigen Spitzen lassen sich auch bei Betrachtung der Leistungskurven im Mittelspannungsunterwerk Wazemmes feststellen, wo bei der heute praktizierten Variante kurzfristig höhere Leistungsspitzen auftreten als bei der Variante 1 mit dem geringsten Energieverbrauch. **Diese Leistungsspitzen sind sogar höher als in der darauffolgenden Phase mit 60 s konstanter Zugfolgezeit.**

Die Analyse der dazugehörigen Bildfahrpläne in Abb. 9.30 zeigt anschaulich die Ursache dieser hohen Leistungsspitze: Im heutigen Betrieb beschleunigen zehn dem dargestellten Mittelspannungsunterwerk Wazemmes zuzuordnende Züge gleichzeitig zu diesem Zeitpunkt, davon mehrere in sehr geringem räumlichen Abstand. Im optimalen Übergang ist die Zahl der zu diesem Zeitpunkt beschleunigenden Züge auf neun reduziert, die außerdem räumlich weiter auseinander liegen. Zusätzlich finden Bremsvorgänge zu anderen und günstigeren Zeitpunkten statt und tragen zur Reduktion von Leistungsspitzen bei.

Trotz dieser hohen Leistungsspitzen sinkt die Spannung im ungestörten Betrieb niemals unter die vorgeschriebenen Grenzwerte. Allerdings wurden bei dieser Analyse mögliche Betriebsstörungen, z.B. durch zu lange Aufenthaltszeiten an den Bahnsteigen, vernachlässigt. Die dadurch auftretenden Verspätungen würden systembedingt durch schnellere Fahrweise der Züge und damit höhere Leistungsspitzen kompensiert. Treten diese gleichzeitig mit der ohnehin schon hohen Leistungsspitze im analysierten Fall auf, könnten unzulässige Spannungsabfälle die Folge sein. Dann ist eine solche Optimierung von Übergängen aufeinanderfolgender Zugfolgezeiten auch auf dieser untersuchten Strecke sinnvoll und wichtig (vgl. [54]). Zur Reduktion des Systemenergieverbrauchs scheint die Steuergröße Zugfolgezeit in Phasen des Übergangs zwischen verschiedenen Zugfolgezeiten (vgl. Abb. 1.9) nicht geeignet zu sein.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die theoretischen Grundlagen zur Optimierung von solchen Übergängen, sei es durch vollständige Enumeration oder den Einsatz Genetischer Algorithmen, mit dieser Arbeit geschaffen wurden, eine umfangreiche Erprobung der neuartigen Verfahren allerdings erst bei Verfügbarkeit noch leistungsfähigerer Rechentechnik praktikabel wird.

---

<sup>3</sup>Schätzung nach dem veröffentlichten Bahnstrompreissystem der DB AG [14], da keine präzisen Kostenangaben für Lille vorliegen.

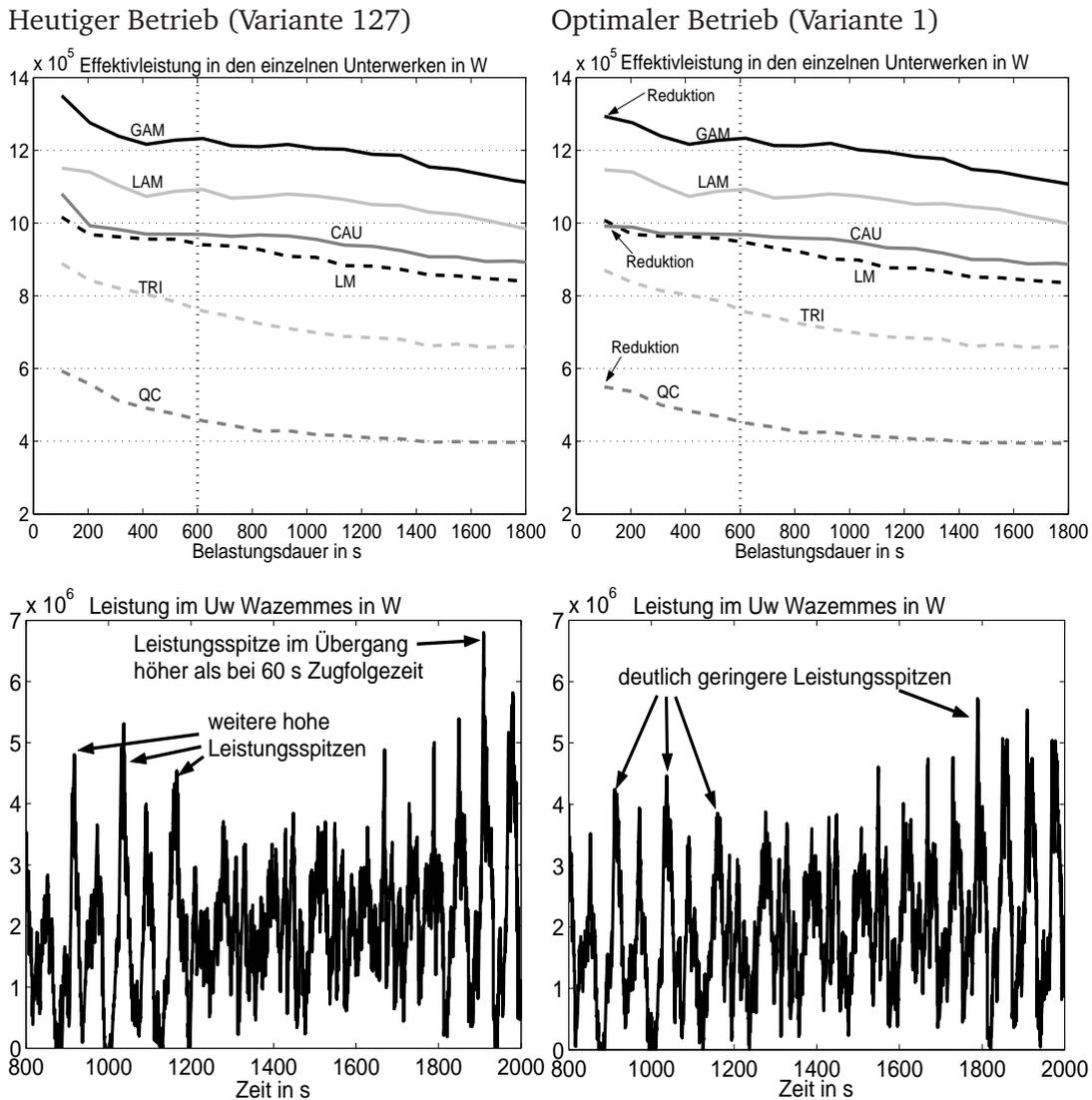


Abbildung 9.28: Gegenüberstellung von Variante 127 (heutiger Betrieb) und Variante 1 (optimaler Betrieb) anhand der zeitgewichteten Belastungsdauerkurven in den einzelnen Unterwerken (oben) und dem Leistungsverlauf im Mittelspannungsunterwerk Wazemmes (unten)

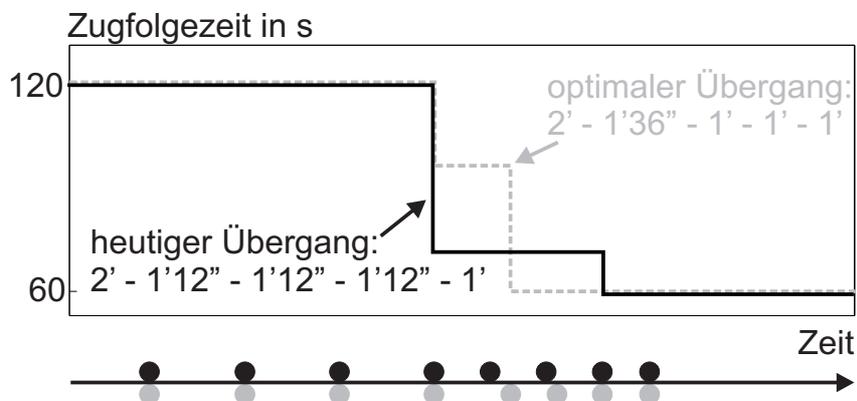
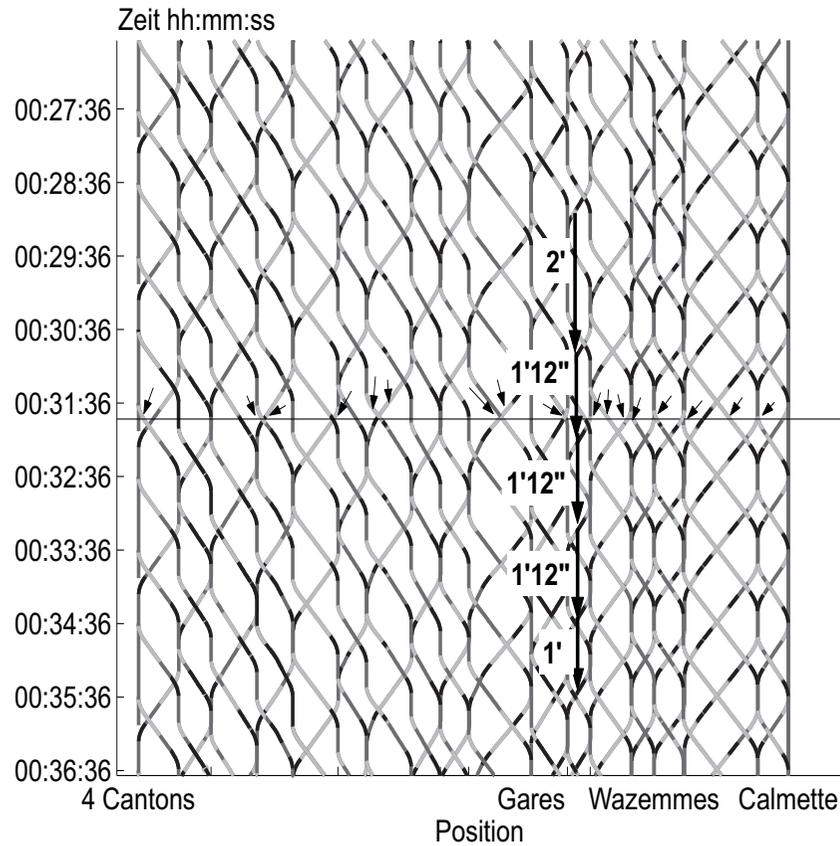


Abbildung 9.29: Vergleich des heutigen (Variante 127) und des optimalen Übergangs (Variante 1) zwischen den Zugfolgezeiten 2 min und 1 min

Heutiger Übergang 2' - 1'12"- 1'12"- 1'12"- 1'



Optimaler Übergang 2' - 1'36"- 1' - 1' - 1'

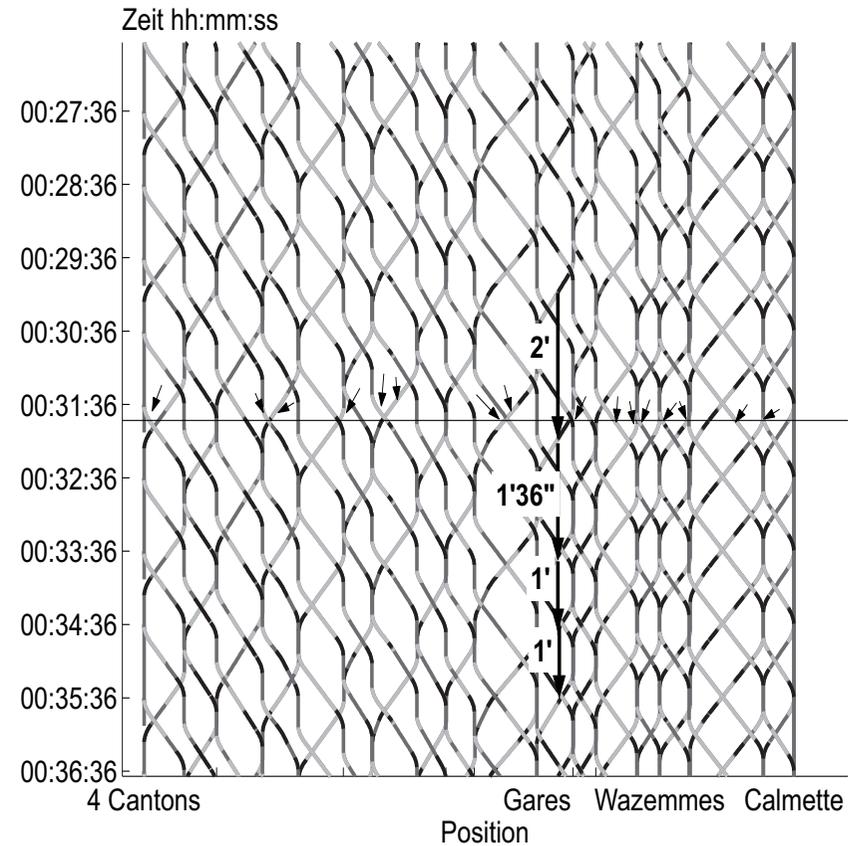


Abbildung 9.30: Bildfahrplandarstellung der Varianten 127 (heutiger Betrieb, links) und 1 (optimal) des Übergangs für den Zeitpunkt der größten Leistungsspitze im heutigen Betrieb (31'49'"): Beschleunigende Züge sind hellgrau, bremsende Züge schwarz dargestellt. Im Bereich des Uw Wazemmes beschleunigen heute zehn Züge gleichzeitig, bei optimaler Gestaltung des Übergangs nur neun Züge, während ein weiterer Zug zusätzlich bremst.

## **Teil IV**

# **Zusammenfassung und Anlagen**



# 10 Zusammenfassung und weiterer Untersuchungsbedarf

Die Ergebnisse dieser Arbeit, die nach Kenntnis des Autors den bisher verfügbaren Wissensstand erweitern, lassen sich in sechs Punkten zusammenfassen:

1. Die auf der Basis Genetischer Algorithmen geschaffenen Methoden ermöglichen die systematische Lösung bisher nicht behandelter Optimierungsprobleme des flexiblen Stadtschnellbahnbetriebes.
2. So kann mit dem im Teil II beschriebenen Verfahren GENflex-S vollständig automatisiert ein strikt nachfrageorientierter Fahrplanentwurf auch bei Überlagerung mehrerer Linien durchgeführt werden. Hierbei lassen sich sowohl Betreiberkriterien als auch Fahrgastziele berücksichtigen.
3. Die Erprobung der vorgeschlagenen Verfahren erfolgte anhand umfangreicher Fallstudien für unterschiedliche Fahrzeug- und Linienkonzepte der S-Bahn Dresden: von der Flexibilisierung des Ausflugsverkehrs im heutigen, konventionellen Taktbetrieb bis zur automatischen Erstellung von Fahrplänen für räumlich und zeitlich strikt flexibilisierte Betriebsregime.  
Die im Rahmen dieser Arbeit entstandene Software GENflex-S wurde in einen Disponentenarbeitsplatz „Flexible Angebotsplanung S-Bahn Dresden“ integriert, der vom Verkehrsbetrieb Sachsen der DB Regio AG Region Südost praktisch eingesetzt wird.
4. Für die im Teil III der Arbeit behandelte Flexibilisierung und Synchronisierung von Anfahr- und Bremsvorgängen mit dem Ziel der Senkung von Energie- und Leistungskosten sowie der Reduktion von Störungen wurde in dieser Arbeit erstmals ein systembezogener, ganzheitlicher Ansatz der Optimierung vorgeschlagen. Als Steuergrößen werden dabei geringfügige, d.h. betrieblich zulässige Modifikationen der Fahr-, Halte- und Zugfolgezeiten genutzt.
5. In Phasen konstanter Zugfolgezeiten ist es möglich, durch optimale Verteilung von Fahr- und/ oder Haltezeitreserven mit Hilfe Genetischer Algorithmen, die zur Ermittlung der Energiekosten herangezogenen Komponenten Systemenergieverbrauch und Effektivleistungen in den Unterwerken sowohl im Regelbetrieb als auch bei geringen Fahrplanabweichungen deutlich zu senken. Kritische Spannungen, die zu Systemstörungen führen können, lassen sich durch diese Art der Flexibilisierung vermeiden.

6. Eine praxisnahe Simulationserprobung der entwickelten neuartigen Verfahren erfolgte anhand zweier real existierender Stadtschnellbahnlinien: der Linie 1 der vollautomatisch und flexibel betriebenen Metro vom Typ VAL in Lille (Nordfrankreich) sowie der Linie S1 der konventionell betriebenen S-Bahn in Berlin. Während für beide Strecken Phasen mit konstanten Zugfolgezeiten betrachtet wurden, erfolgte zusätzlich für die Metro in Lille erstmals die systematische, energieorientierte Analyse von Übergangsvorgängen zwischen Phasen mit konstanten Zugfolgezeiten, wie sie im flexiblen Betrieb häufig vorkommen.

Die Anwendung Genetischer Algorithmen hat sich als geeignet für die vorliegenden komplexen Probleme der Steuerung und Planung eines flexiblen Stadtschnellbahnbetriebs erwiesen. Das aufgezeigte Optimierungspotenzial lässt sich vollständig nur im fahrzeugführerlosen Betrieb erschließen. Allerdings kann auch die bei manueller Zugführung immerhin eingeschränkt realisierbare nachfrageorientierte Flexibilisierung dazu beitragen, existierende Stadtschnellbahnsysteme effizienter zu betreiben. Wenn diese Arbeit dazu neue Zugänge erschließen konnte, dann hat sie die ihr zgedachte Aufgabe erfüllt.

Naturgemäß kann dabei nicht der Anspruch erhoben werden, dass alle mit der Anwendung Genetischer Algorithmen für die Planung und Steuerung eines flexiblen Stadtschnellbahnbetriebes verbundenen Aspekte umfassend untersucht worden sind. Weiterführende Untersuchungen sind deshalb notwendig und wünschenswert. Dies betrifft insbesondere

- den Einsatz mehrkriterieller [44, 192] oder/ und co-evolutionärer [101, 102, 119] Verfahren in der flexiblen Fahrplanung
- sowie, im Bereich der Flexibilisierung und Synchronisierung von Anfahr- und Bremsvorgängen, die Berücksichtigung von stochastisch beschreibbaren Störungen (z.B. variierenden Haltezeiten) schon bei der Ermittlung des Gütekriteriums.

# Literaturverzeichnis

- [1] ABRAMSON, D., G. MILLS und S. PERKINS: *Parallelisation of a Genetic Algorithm for the Computation of Efficient Train Schedules*. In: *Parallel Computing and Transputers*, 1994.
- [2] ACKERMANN, J. und ESCHER, G. ET AL.: *Einführung in die Methode Branch and Bound*, Band 4 der Reihe *Lecture Notes in Operations Research and Mathematical Economics*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 1968.
- [3] ALBERT, H., C. LEVIN, E. VIELROSE und G. WITTE (Herausgeber): *Reducing Energy Consumption in Underground Systems - an Important Contribution to Protecting the Environment (Part 1 and 2) - Volume 3, Part 2, 52nd International Congress*, Stuttgart, 1997. UITP (Union Internationale de Transport Public).
- [4] ALBRECHT, T.: *Simulationserprobung eines Verfahrens zur anschlussichernden und ressourcenschonenden Flexibilisierung des S-Bahn-Betriebs*. Diplomarbeit, Lehrstuhl für Verkehrsleitsysteme und -prozessautomatisierung, Fakultät Verkehrswesen „Friedrich List“, Technische Universität Dresden, Juni 2001.
- [5] ALBRECHT, T.: *Reducing Power Peaks and Energy Consumption in Rail Transit Systems by Simultaneous Train Running Time Control*. In: ALLAN, J., R.J. HILL, C.A. BREBBIA, G. SCIUTTO und S. SONE (Herausgeber): *Computers in Railways IX*, Seiten 885–894, Southampton, Mai 2004. WIT Press. Konferenzband der 9. Internationalen Konferenz „Computer Aided Design, Manufacture and Operation in the Railway and Other Advanced Mass Transit Systems (COMPRAIL)“, Dresden, 17.-19. Mai 2004.
- [6] ALBRECHT, T.: *Train Running Time Control Using Genetic Algorithms for the Minimization of Energy Costs in DC Rapid Transit Systems*. In: *Decision Engineering Report Series*, Seiten 1–6. Cranfield University, 2004. Berichtsband zum Workshop „Challenges in Real World Optimisation Using Evolutionary Computing“ der 8. Internationalen Konferenz „Parallel Problem Solving from Nature (PPSN VIII)“, Birmingham, Großbritannien, 18.-22. September 2004.
- [7] ALBRECHT, T. und S. OETTICH: *A New Integrated Approach to Dynamic Schedule Synchronization and Energy Saving Train Control*. In: ALLAN, J., R.J. HILL, C.A. BREBBIA, G. SCIUTTO und S. SONE (Herausgeber): *Computers in Railways VIII*, Seiten 847–856, Southampton, 2002. WIT Press. Konferenzband der 8. Internationalen Konferenz „Computer Aided

Design, Manufacture and Operation in the Railway and Other Advanced Mass Transit Systems (COMPRAIL)“, Limnos (Griechenland), 12.-14. Juni 2002.

- [8] ALBRECHT, T., S. OETTICH, S. SCHOLZ und K. DANOWSKI: *SIMflex-S: Ein neuartiges Simulationsprogramm zur Untersuchung der verkehrlichen Wirksamkeit und betrieblichen Machbarkeit des flexiblen Stadtschnellbahnbetriebs*. In: *19. Verkehrswissenschaftliche Tage, Dresden, 2003*. Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der TU Dresden.
- [9] ALBRECHT, T., S. OETTICH, S. SCHOLZ und H. STROBEL: *Entwicklung eines Verfahrens zur rechnergestützten Fahrtendisposition für die nachfrageorientierte, tageszeitabhängige Flexibilisierung des S-Bahn-Betriebes (Abschlussbericht)*, Juni 2004. Technische Universität Dresden, Lehrstuhl Verkehrsleitsysteme und -prozessautomatisierung.
- [10] ALBRECHT, T., S. SCHOLZ und S. OETTICH: *Zur Nutzbarmachung Genetischer Algorithmen für die automatische Berechnung flexibler S-Bahn-Betriebsregime (GENflex-S)*. In: *Wissenschaftliches Kolloquium „Mobilität und Verkehrsmanagement in mittleren Ballungsräumen“ des BMBF-Leitprojektes intermobil Region Dresden und des Alcatel Stiftungskollegs für interdisziplinäre Verkehrsforschung an der TU Dresden*, Dezember 2004.
- [11] ALTENBERG, L.: *The Schema Theorem and Price's Theorem*. In: WHITLEY, L. D. und M.D. VOSE (Herausgeber): *Foundations of Genetic Algorithms 3*, Seiten 23–49. Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, USA, 1995.
- [12] ASSIS, W.O. und B.E.A. MILANI: *Generation of optimal schedules for metro lines using model predictive control*. In: *15th Triennial World Congress of the International Federation of Automatic Control*, Band 1, Oxford, 2002. IFAC, Elsevier.
- [13] ASSIS, W. O. und B. E. A. MILANI: *Generation of optimal schedules for metro lines using model predictive control*. *Automatica*, 40:1397–1404, 2004.
- [14] BAHNSTROMPREIS-SYSTEM: *DB Energie*, 2002.
- [15] BAIER, T. und I. MILROY: *Metromiser: A system for conserving tranction energy and regulating punctuality in urban rail services*. In: SCHNIEDER, E. und U. BECKER (Herausgeber): *9th IFAC Symposium on Control in Transportation Systems*, Seiten 274–378, Amsterdam, 2000. Elsevier Science.
- [16] BARTEL, B.: *S-Bahn RheinNeckar und ihre Stationen*. *Eisenbahntechnische Rundschau*, 53(5):261–269, Mai 2004.
- [17] BEHMANN, U.: *Energiebedarf und Belastungsspitzen bei kurzen Halteabständen*. *Elektrische Bahnen*, 102(3):116–122, 2004.
- [18] BELLMAN, R.: *Dynamische Programmierung und selbstanpassende Regelprozesse*. R. Oldenbourg Verlag, München-Wien, 1967.

- [19] BENDEL, H.: *Die elektrische Lokomotive - Aufbau, Funktion, neue Technik*. transpress Verlag, Berlin, 1994.
- [20] BIELLA, W.: *Die rechnergesteuerte adaptive Fahrkennlinienvorgabe zur Energieoptimierung bei Gleichstrom-Nahverkehrsbahnen*. Doktorarbeit, TU Berlin, 1988.
- [21] BIESENACK, H. und R. HELLINGER: *Elektrische Bahnen: Optimale Auslegung des Gesamtsystems*. *Elektrie*, 48(11/12):444–447, 1994.
- [22] BLUM, J. und A. ESKANDRIAN: *Domain-Specific Genetic Agents for Flow Optimization of Freight Railroad Traffic*. In: ALLAN, J., R.J. HILL, C.A. BREBBIA, G. SCIUTTO und S. SONE (Herausgeber): *Computers in Railways VIII*, Seiten 787–796, Southampton, 2002. WIT Press. (vgl. [7]).
- [23] BOCCALATTE, A., A. DI FEBRARRO, R. MINCIARDI, M. PAOLUCCI und R. PESENTI: *Modelling and Simulating for Optimal Management of Underground Railway Systems*. In: *International Conference on System, Man and Cybernetics „System Engineering in the Service of Humans“*, Seiten 131–135, Oktober 1993.
- [24] BRÜNGER, O.: *Verfahren zur Simulation des Eisenbahnbetriebes und ihre Anwendungsbereiche*. In: *Simulation und Simulatoren im Schienenverkehr: Tagung München, 21./22.9.1995*, Seiten 393–412, Düsseldorf, September 1997. VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik, VDI-Verlag.
- [25] BUCHWALD, P., R. NAERAA und L. KRISTENSEN: *Erfahrungen mit modernem mechanischem Antrieb in DMU*. In: *2. UIC-Konferenz über Energieeffizienz im Schienenverkehr*, Seiten 41–46, Paris, 2004. UIC.
- [26] CAI, Y., M.R. IRVING und S.H. CASE: *Iterative Techniques for the Solution of Complex DC-Rail-Traction Systems Including Regenerative Braking*. *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, 142(5):445–452, September 1995.
- [27] CAI, Y., M.R. IRVING und S.H. CASE: *Modelling and Numerical Solution of Multibranch DC Rail Traction Power Systems*. *IEE Proc. Electr. Power Appl.*, 142(5):323–328, September 1995.
- [28] CARPANETO, G. und P. TOTH: *Solution of the Assignment Problem*. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 6(1):104–111, März 1980.
- [29] CASTELAIN, E. und K. MESGHOUNI: *Regulation of a public transport network with consideration of the passenger flow: modeling of the system with high-level Petri nets*. In: IEEE (Herausgeber): *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Seite 5, 2002.
- [30] CEDER, A.: *Designing Transit Short-Turn Trips with the Elimination of Imbalanced Loads*. In: DADUNA, J.R. und A. WREN (Herausgeber): *Computer-Aided Transit Scheduling*, Band

- 308 der Reihe *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, Seiten 288–303, Berlin-Heidelberg-New York, 1988. Springer-Verlag.
- [31] CEDER, A.: *Efficient Timetabling and Vehicle Scheduling for Public Transport*. In: VOSS, S. und J.R. DADUNA (Herausgeber): *Computer-Aided Scheduling of Public Transport*, Band 505 der Reihe *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, Seiten 37–52, Berlin-Heidelberg-New York, 2001. Springer-Verlag.
- [32] CHAKROBORTY, P.: *Genetic Algorithms for Optimal Urban Transit Network Design*. *Journal of Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 18:184–200, 2003.
- [33] CHAKROBORTY, P., K. DEB und B. SRINIVAS: *Network-Wide Optimal Scheduling of Transit Systems Using Genetic Algorithms*. *Journal of Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 13:363–376, 1998.
- [34] CHANG, C.S., Y.H. PHOA, W. WANG und B.S. THIA: *Economy/ Regularity Fuzzy-Logic Control of DC Railway Systems Using Event-Driven Approach*. *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, 143(1):9–17, Januar 1996.
- [35] CHANG, C.S. und S.S. SIM: *Optimising Train Movements Through Coast Control Using Genetic Algorithms*. *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, 144(1):65–73, Januar 1997.
- [36] CHANG, C.S., W. WANG, A.C. LIEW und F.S. WEN: *Bicriterion Optimisation for Traction Substations in Mass Rapid Transit Systems Using Genetic Algorithms*. *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, 145(1):49–56, Januar 1998.
- [37] CHANG, C.S., W. WANG, Y.H. PHOA, B.S. THIA und A.C. LIEW: *Fuzzy control for regenerative traction station in DC railway systems*. *WIT Transactions on the Built Environment*, 7:403–410, 1994. COMPRAIL 1994.
- [38] CHLASTACZ, M. und M. FRESSOZ: *Matériels: Les MI 2N, des deux niveaux d'est en ouest*. *La vie du rail*, (2604):20–22, Juli 1997.
- [39] CLEMENT, R. und A. WREN: *Greedy Genetic Algorithms, Optimizing Mutations and Bus Driver Scheduling*. In: DADUNA, J.R., I. BRANCO und J. M. PINTO PAIXAO (Herausgeber): *Computer-Aided Transit Scheduling*, Band 430 der Reihe *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, Seiten 213–235, Berlin-Heidelberg-New York, 1993. Springer Verlag.
- [40] COMPOST, G.: *Réceptivité de la Ligne 14*. E-mail an den Autor, 31.3. 2004.
- [41] CUADRA, F. DE, A. FERNÁNDEZ, J. DE JUAN und M.A. HERRERO: *Energy-saving automatic optimisation of train speed commands using direct search techniques*. In: ALLAN, J., C. A. BREBBIA, R. J. HILL, G. SCIUTTO und S. SONE (Herausgeber): *Computers in Railways V - Vol. 1 - Railway Systems and Management*, Seiten 337–346, Southampton, 1996. Computational Mechanics Publications.

- [42] CURY, J.E., F.A.C. GOMIDE und M.J. MENDES: *A methodology for generation of optimal schedules for an underground railway system*. IEEE Transactions on Automatic Control, 25(2):217–222, 1980.
- [43] DADUNA, J. und J. M. PINTO PAIXAO: *Vehicle Scheduling for Public Mass Transit - An Overview*. In: DADUNA, J.R., I. BRANCO und J. M. PINTO PAIXAO (Herausgeber): *Computer-Aided Transit Scheduling*, Band 430 der Reihe *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, Seiten 76–90, Berlin-Heidelberg-New York, 1993. Springer Verlag.
- [44] DEB, K., A. PRATAP, S. AGRAWAL und T. MEYARIVAN: *A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II*. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 6:182–197, April 2002.
- [45] DECKNATEL, G. und E. SCHNIEDER: *Modellbildung und Simulationssysteme im Schienenverkehr*. Eisenbahntechnische Rundschau ETR, 47(8/9):535–539, 1998.
- [46] DIN: 41756, Blatt 1 / 05.71: *Stromrichter; Belastung von Stromrichtern; Betriebsarten und Belastungsklassen*, Mai 1971.
- [47] DIN: 57115 Teil 1 / VDE 0115 Teil 1 / 06.82: *Bahnen, Allgemeine Bau- und Schutzbestimmungen*, Juni 1982.
- [48] DOOLEY, T. und A.S. PRIVER: *Computer Models for AGT System Operations Studies*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 28(1):2–10, 1979.
- [49] DSB, VR, SJ und NSB: *Umwelthandbuch der nordischen Eisenbahnen*. UIC (Internet), [www.railway-procurement.org](http://www.railway-procurement.org), Stand 7.10.2004, 1999.
- [50] EIBEN, A.E., E. MARCHIORI und V.A. VALKÓ: *Evolutionary Algorithms with On-the-Fly Population Size Adjustment*. In: YAO, X. ET AL. (Herausgeber): *Parallel Problem Solving from Nature*, Band 3242 der Reihe *Lecture Notes in Computer Science*, Seiten 41–50, Berlin-Heidelberg-New York, 2004. Springer-Verlag.
- [51] ELBAS - ELEKTRISCHE BAHNSYSTEME GMBH: *Energieoptimiertes Fahren: Eine Anwendung aus elbas-SINANET Plus*. elbas info, Seite 4, April 1999.
- [52] ERBIN, J.-M.: *Une innovation technologique majeure au service du Transport urbain - Document de synthèse sur l'historique du VAL*. KEOLIS, Mai 2002. Internes Dokument.
- [53] ERBIN, J.-M.: *Compte rendu de la réunion Université de Dresde, Transpole, Keolis*, Februar 2004. Arbeitstreffen bei Transpole in Lille zur Klärung von Randbedingungen der für die Linie 1 der Metro durchzuführenden Fallstudie.
- [54] ERBIN, J.M. und C. SOULAS: *Twenty Years of Experiences with Driver-Less Metros in France*. In: *19. Verkehrswissenschaftliche Tage*, Dresden, 2003. Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der TU Dresden.

- [55] ERNST, G. und W. SCHULZ: *Elektrische Ausrüstung der Triebzüge Baureihe 481/482 für die S-Bahn Berlin*. Elektrische Bahnen, 95(5):111–122, Mai 1997.
- [56] ETABLISSEMENT PUBLIC D'AMENAGEMENT DE LA VILLE NOUVELLE DE LILLE EST: *Etude de Système pour un moyen de transport en commun discontinu en site propre*. Technischer Bericht, Januar 1971.
- [57] FIRPO, P. und S. SAVIO: *Optimal control strategies for energy management in metrorail transit systems*. WIT Transactions on the Built Environment, 7:91–99, 1994. COMPRAIL 1994.
- [58] FIRPO, P. und S. SAVIO: *Optimized Train Running Curve for Electrical Energy Saving in Autotransformer Supplied AC Railways*. In: *Electric Railways in a United Europe*, Seiten 23–27. IEE, 1995.
- [59] FREIBERGER, K.-U. und M. BUNDSCHUH: *Einsatzmöglichkeiten von Optimierungsverfahren in der Fahrzeugumlaufplanung der Deutschen Bahn AG*. Eisenbahntechnische Rundschau, 53(6):371–375, Juni 2004.
- [60] GLÜCK, H.: *Die Optimierung von Triebfahrzeuglaufplänen bei großen Zugzahlen mit Hilfe elektronischer Datenverarbeitungsanlagen*. Eisenbahntechnische Rundschau, (9):354–363, September 1973.
- [61] GOLDBERG, D. E.: *Genetic Algorithms in Search, Optimisation and Machine Learning*. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1989.
- [62] GOODMAN, C.J., L.K. SIU und T.K. HO: *A Review of Simulation Models for Railway Systems*. In: *International Conference on Developments in Mass Transit Systems*, Seiten 80–85. IEE, 1998.
- [63] GORDON, S.P. und D.G. LEHRER: *Coordinated Train Control and Energy Management Control Strategies*. In: *1998 ASME/ IEEE Joint Railroad Conference*, Seiten 165–176. IEEE, 1998.
- [64] GORDON, S.P. und W.S. RORKE: *Energy Storage and Alternatives to Improve Train Voltage on a Mass Transit System*. Technischer Bericht SAND 95-82222, SANDIA, April 1995.
- [65] GORDON, S.P., T.J. SA und D.A. SHEAFFER: *Optimization of Automatic Train Control for Energy Management and Service Reliability*. Technischer Bericht SAND 2000-8206, SANDIA, November 2000.
- [66] GORDON, S.P. und P.J. WILLIAMS: *Train Control Optimization*. SIAG/ OPT Views-and-News, 10(1):1–6, 1999.
- [67] GRAY, F.: *Pulse Code Communication*. U.S. Patent No. 2,632,058, März 1953.

- [68] GREGA, W.: *Decomposition approach to the public transport scheduling problem*. *Automatica*, 29(3):745–50, 1993.
- [69] GROSSE, C.: *Verkehrsabhängige Betriebsführung bei Stadtschnellbahnen*. Doktorarbeit, Technische Universität Berlin, 2003.
- [70] GROSSRAUM-VERKEHR HANNOVER: *Fahrplanauskunft*  
<http://www.efa.de/gvh/linieninfo.html>, Stand: 4.8.2004.
- [71] GUIEYSSE, L.: *Studien zur Erhöhung der Transport-Kapazität der Metro-Linien mit Hilfe von Simulationsmodellen*. *Schienen der Welt*, 1(1):631–636, 1970.
- [72] GUO, H.-J., H. OHASHI und O. ISHINOKURA: *DC Electric Train Traffic Scheduling Method Considering Energy Saving - Combination of Train Traffic Parameters for Larger Regenerative Power*. *Transactions IEE Japan*, 199-D(11), 1999. In Japanisch.
- [73] HAMELS, D.: *Vorausberechnung des Betriebsablaufes und des Energieverbrauchs einer Stadtbahnlinie, mit und ohne Netzbremung im Gleichspannungssystem*. *Elektrische Bahnen*, 82(8, 9):244–246, 277–284, 1984.
- [74] HAN, S.-H., Y.-S. BYEN, J.-H. BAEK, T.-K. AN, S.-G. LEE und H.-J. PARK: *An Optimal Automatic Train Operation (ATO) Control Using Genetic Algorithms (GA)*. In: *TENCON 99 (IEEE Region 10 Conference)*, Band 1, Seiten 360–362. IEEE, September 1999.
- [75] HÉRISSE, P.: *Météor. De Saint-Lazare à Gare de Lyon en 10 minutes - Matériel*. *La vie du rail*, (2925):12, Dezember 2003.
- [76] HERTEL, G., H. BIESENACK, W. VIRT und M. HEINZ: *Modellierung der Technik von Bahngesamtsystemen*. In: *ETG-Fachbericht, 2nd International Conference - Electric Railway Systems*, Seiten 39–43, Berlin, Offenbach, März 1999. VDE, VDE Verlag.
- [77] HILL, R.J.: *Electric Railway Traction - Part 1 Electric Traction And DC Traction Motor Drives*. *Power Engineering Journal*, Seiten 47–56, Februar 1994.
- [78] HILL, R.J.: *Electric Railway Traction - Part 2 Traction Drives with Three-Phase Induction Motors*. *Power Engineering Journal*, Seiten 143–152, Juni 1994.
- [79] HILL, R.J.: *Electric Railway Traction - Part 3 Traction Power Supplies*. *Power Engineering Journal*, Seiten 275–286, Dezember 1994.
- [80] HILL, R.J.: *Correspondence: Iterative Techniques for the Solution of Complex DC-Rail-Traction Systems Including Regenerative Braking*. *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, 143(6), 1996.
- [81] HOFMANN, G., E.J. MICHELIS, J.D. MIJNLIEFF, H. PIETZSCH und S. RÖHLIG: *Simulationssysteme in der Bahnenergieversorgung - Stand, Aufgaben und Grenzen*. In: *ETG-Fachbericht*,

- 2nd International Conference - Electric Railway Systems*, Seiten 157–161, Berlin, Offenbach, März 1999. VDE, VDE Verlag.
- [82] HOFMANN, G. und S. RÖHLIG: *Objektorientierte Modellierung von Bahnnetzen*. *Elektrische Bahnen*, 93(3):73–78, 1995.
- [83] HOFMANN, G. und S. RÖHLIG: *Zeitgewichtete Belastungsdauerkurve bei elektrischen Bahnen*. *Elektrische Bahnen*, 95(10):272–279, 1997.
- [84] HOLLAND, J.: *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. The University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975.
- [85] HORN, P.: *Beitrag zur Lösung des Syntheseproblems der energieoptimalen Steuerung einer Zugfahrt*. Doktorarbeit, Fakultät für Naturwissenschaft und Technik der Hochschule für Verkehrswesen „Friedrich List“ Dresden, 1974.
- [86] HORN, P.: *Theoretische Grundlagen der energieoptimalen Zugsteuerung und Zuglaufmodifikation unter Berücksichtigung der Spezifik der Dieseltraktion*. ZFIV-report, 27(11):160–181, 1984.
- [87] HORN, P. und R. ZINKE: *Energy-optimal train control of long distance traffic*. In: MARIA-LIGETI, J. (Herausgeber): *2nd Mini Conference on Vehicle System Dynamics*. Techn. Univ. Budapest, Faculty of Transport Engineering, 1990.
- [88] HOWLETT, P. G. und P.J. PUDNEY: *Energy-Efficient Train Control*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 1995.
- [89] HU, J. und Z. YANG: *Research on the Optimisation of Urban Transit Operations Using Genetic Algorithms*. In: WANG, K. C. P., G. XIAO und J. JI (Herausgeber): *2nd International Conference on Traffic and Transportation Studies (ICTTS)*, Seiten 418–421, 2000.
- [90] IRMISCH, C.: *Elektrische Ausrüstung der S-Bahntriebzüge Baureihe 474*. *Elektrische Bahnen*, 95(6):162–172, 1997.
- [91] IZUMI, H. und N. TOMII: *Train Schedule Diagram Drawing Algorithm Considering Interrelationship Between Labels*. In: ALLAN, J., R.J. HILL, C.A. BREBBIA, G. SCIUTTO und S. SONE (Herausgeber): *Computers in Railways VIII*, Seiten 489–498, Southampton, 2002. WIT Press. (vgl. [7]).
- [92] JANECKE, J. und S. WEBER: *Akzeptanz der dynamischen Fahrgastinformation*. *Verkehr und Technik*, (9):363–370, September 1998.
- [93] JHA, M.K. und C. OLUOKUN: *Optimizing station locations along rail transit lines with geographic information systems and artificial intelligence*. In: ALLAN, J., C.A. BREBBIA, R.J. HILL, G. SCIUTTO und S. SONE (Herausgeber): *Computers in Railways IX*, Seiten 11–20, Southampton, 2004. WIT Press. (vgl. [5]).

- [94] KATORI, T., Y. TAKAHASHI und T. IZUMI: *Determination of stations where rapid trains stop, or pass to local ones, using a genetic algorithm to shorten total trip time*. In: ALLAN, J., C.A. BREBBIA, R.J. HILL, G. SCIUTTO und S. SONE (Herausgeber): *Computers in Railways IX*, Seiten 113–121, Southampton, 2004. WIT Press. (vgl. [5]).
- [95] KLINGE, R. und S. RÖHLIG: *Bewertungskriterien zur Rückspeisefähigkeit von Triebfahrzeugen*. *Elektrische Bahnen*, 94(7):200–204, 1996.
- [96] KO, H., T. KOSEKI und M. MIYATAKE: *Application of dynamic programming to the optimization of the running profile of a train*. In: ALLAN, J., R. J. HILL, C. A. BREBBIA, G. SCIUTTO und S. SONE (Herausgeber): *Computers in Railways IX*, Southampton, 2004. WIT Press. (vgl. [5]).
- [97] KOLONKO, M. und O. ENGELHARDT-FUNKE: *Cost-Benefit Analysis for Investments into Railway Networks Using Evolutionary Optimization of Timetables*. In: *18. Verkehrswissenschaftliche Tage Dresden*, 2001. Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der TU Dresden.
- [98] KOLONKO, M. und O. ENGELHARDT-FUNKE: *Cost-benefit-analysis of Investments into Railway Networks with Periodically Timed Schedules*. In: VOSS, S. und J.R. DADUNA (Herausgeber): *Computer-Aided Scheduling of Public Transport*, Band 505 der Reihe *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, Seiten 443–459, Berlin-Heidelberg-New York, 2001. Springer-Verlag.
- [99] KRAUS, G. D. und B. R. ROCKENFELDT: *Einsparung von Traktionsenergie durch energiesparende Fahrweise bei S-Bahnen*. *Elektrische Bahnen*, 82(6):172–178, 1984.
- [100] KWAN, A.S.K., R.S.K. KWAN und A. WREN: *Driver Scheduling Using Genetic Algorithms with Embedded Combinatorial Traits*. In: WILSON, N. H. M. (Herausgeber): *Computer-Aided Scheduling of Public Transport*, Band 471 der Reihe *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, Seiten 81–102, Berlin-Heidelberg-New York, 1997. Springer-Verlag.
- [101] KWAN, R.S.K. und P. MISTRY: *A Co-Evolutionary Algorithm for Train Timetabling*. Technischer Bericht 2003.13, University of Leeds, School of Computing, Juli 2003.
- [102] KWAN, R.S.K. und P. MISTRY: *A co-evolutionary algorithm for train timetabling*. In: *2003 Congress on Evolutionary Computation*, Seiten 2142–2148. IEEE, 2003.
- [103] LAMBROPOULOS, T.: *Genetic algorithm application for the solution of the optimal dispatching problem*. In: ALLAN, J., R.J. HILL, C.A. BREBBIA, G. SCIUTTO und S. SONE (Herausgeber): *Computers in Railways VIII*, Seiten 827–836, Southampton, 2002. WIT Press. (vgl. [7]).
- [104] LANG, A. und B. HARTMANN: *Neue elektrische Triebzugfamilie Baureihen 423-426 für die Deutsche Bahn AG*. ZEV+DET Glas. Annalen, 122:394–406, 1998.

- [105] LAURENCIN, C., E. LE MOAL und P. HENRY: *Energieverbrauch und Wirkungsgrad der modernen elektrischen Triebfahrzeuge der SNCF*. In: 2. UIC-Konferenz über Energieeffizienz im Schienenverkehr, Seiten 63–66, Paris, 2004. UIC.
- [106] LEE, C.-K.: *The integrated scheduling and rostering problem of train driver using Genetic algorithms*. In: 9th international conference on Computer-Aided Scheduling of Public Transport, San Diego, 2004.
- [107] LEHNER, F.: *Menge, Arbeit, Leistung und Wirkungsgrad im Verkehr*. Verkehr und Technik, 1(2):42–45, 1950.
- [108] LEHNERT, M.: *Untersuchungen zur Koordination von Anfahr- und Bremsvorgängen mittels Fahrzeitenregelung im flexiblen S-Bahn-Betrieb*, 2002. Studienarbeit am Lehrstuhl Verkehrsleitsysteme und -prozessautomatisierung, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der TU Dresden.
- [109] LEHNERT, M.: *Untersuchungen zur Anwendung der dynamischen Programmierung für die energieoptimale Koordinierung von Anfahr- und Bremsvorgängen im flexiblen S-Bahn-Betrieb*. Diplomarbeit, Lehrstuhl Verkehrsleitsysteme und -prozessautomatisierung, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der TU Dresden, 2003.
- [110] LIEBCHEN, C. und K. NÖKEL: *Überführung eines mathematischen Modells zur Taktversatzoptimierung in die Praxis*. In: HEUREKA'02, Optimierung in Verkehr und Transport, Seiten 49–61, Köln, 2002. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen.
- [111] LINDNER, H., H. BRAUER und C. LEHMANN: *Taschenbuch der Elektrotechnik und Elektronik*. Fachbuchverlag Leipzig, 1999.
- [112] LINDNER, T.: *Train Schedule Optimization in Public Rail Transport*. Doktorarbeit, Technische Universität Braunschweig, 2000.
- [113] LOHSE, D.: *Nachfragemodellierung bei flexiblem Stadtschnellbahn-Betrieb*. In: 18. Verkehrswissenschaftliche Tage Dresden, 2001. Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der TU Dresden.
- [114] MASTROPASQUA, D.: *Automatizzazione e risparmi energetici nei servizi metropolitane*. TE, Seiten 77–93, 1979.
- [115] MELLITT, B., C.J. GOODMAN und R.I.M. ARTHURTON: *Simulation studies of energy saving with chopper control on the Jubilee line*. Proc. IEE, 125(4):304–310, April 1978.
- [116] MESGHOUNI, K., S. HAYAT, S. HAMMADI und P. BORNE: *Traffic regulation modeling for a subway line with double loops*. In: IEEE (Herausgeber): *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Seiten 3261–3265, 2002.
- [117] MEYER, M. und M. AEBERHARD: *Vom Gratisstrom zur Energiesparlokomotive - Energieverbrauch bei elektrischen Bahnen*. Eisenbahn-Revue, (1-2):28–39, 1997.

- [118] MINCIARDI, R., M. PAOLUCCI und R. PESENTI: *Generating Optimal Schedules for an Underground Railway Line*. In: *34th Conference on Decision and Control*, Seiten 4082–4085. IEEE, Dezember 1995.
- [119] MISTRY, P. und R.S.K. KWAN: *Generation and Optimization of Train Timetables Using Coevolution*. In: CANTÚ-PAZ, E. ET AL. (Herausgeber): *GECCO 2003*, Band 2723 der Reihe *Lecture Notes in Computer Sciences*, Seiten 693–694, Berlin-Heidelberg-New York, 2003. Springer-Verlag.
- [120] MIZAN, M. und K. KARWOWSKI: *Optymalizacja Wykorzystania Energii Hamowania - Badania Symulacyjne Na Przykladzie Metra (In Polnisch)*. In: *MET'2003 - 6th International Conference Modern Electric Traction in Integrated XXIst Century Europe*, Warschau, September 2003.
- [121] MÜLLER-EBERSTEIN, F., J. SCHÜTTE und A. KÜSTER: *Neue mobile Echtzeit-Informationssysteme für die Fahrgäste der Dresdner Verkehrsbetriebe*. In: *18. Verkehrswissenschaftliche Tage Dresden*, 2001. Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der TU Dresden.
- [122] NOLTE, R.: *EVENT Evaluation of Energy Efficiency Technologies for Rolling Stock and Train Operation*. In: *World Congress on Railway Research*, Edinburgh, 2003. UIC (Union Internationale de Chemin de fer).
- [123] OETTICH, S.: *Ein Beitrag zur ressourcenschonenden und anschlussoptimierenden Steuerung von Stadtschnellbahnen*. Doktorarbeit, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der Technischen Universität Dresden, 2004.
- [124] OETTICH, S. und T. ALBRECHT: *Ein Beitrag zur ressourcenschonenden und anschlussoptimierenden Flexibilisierung des S-Bahn-Betriebes: Algorithmen und Simulationsergebnisse*. In: *Tagungsband der 18. Verkehrswissenschaftliche Tage Dresden*. Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der TU Dresden, 2000.
- [125] OETTICH, S. und T. ALBRECHT: *Anschlussoptimierende und ressourcenschonende Steuerung des Stadtschnellbahnbetriebs: Ein mehrkriterieller Ansatz zur Echtzeit-Optimierung*. at *Automatisierungstechnik*, 50(12):597–605, 2002.
- [126] OETTICH, S., T. ALBRECHT und H. PREIS: *Das Fahrerassistenzsystem ENAflex-S (Energiesparende und anschlussoptimierende Flexibilisierung der Fahrweisen und Fahrzeiten der S-Bahn) und seine Erprobung auf der Elbtallinie „Meißen - Schöna“ der S-Bahn Dresden*. In: *Wissenschaftliches Kolloquium „Mobilität und Verkehrsmanagement in mittleren Ballungsräumen“ des BMBF-Leitprojektes intermobil Region Dresden und des Alcatel Stiftungskollegs für interdisziplinäre Verkehrsforschung an der TU Dresden*, Dezember 2004.
- [127] OETTICH, S., T. ALBRECHT und S. SCHOLZ: *Improvements of energy efficiency of urban rapid rail systems*. In: BREBBIA, C.A. und L.C. WADHWA (Herausgeber): *Urban Transport*,

- Seiten 573–582, Southampton, 2004. WIT Press. Konferenzband der 10. Internationalen Konferenz „Urban Transport and the Environment“, Dresden, 19.-21. Mai 2004.
- [128] OETTICH, S., T. ALBRECHT und S. SCHOLZ: *Meilensteinbericht Abschluss der Entwicklung des Softwaremoduls DFZR sowie Verfahrens- und Softwareentwicklung EOZ abgeschlossen*. Technischer Bericht M200/4, 11, TU Dresden, 2004.
- [129] OSWALD, B.: *Netzberechnung: Berechnung stationärer und quasistationärer Betriebszustände in Elektroenergieversorgungsnetzen*. VDE-Verlag, Berlin, Offenbach, 1992.
- [130] OSYCZKA, A.: *Evolutionary Algorithms for Single and Multicriteria Design Optimization*, Band 79 der Reihe *Studies in fuzziness and soft computing*. Physica-Verlag, Heidelberg New York, 2002.
- [131] PAOLUCCI, M. und R. PESENTI: *An Object-Oriented Approach to Discrete-Event Simulation Applied to Underground Railway Systems*. *Simulation*, (6):372–383, 2001.
- [132] PASSOT, M.: *le Val - métro de Lille: système de transport urbain automatique*. *techniques CEM*, (113):1–11, Januar 1982.
- [133] PETRELLI, M.: *A transit network design model for urban areas*. In: BREBBIA, C.A. und L.C. WADHWA (Herausgeber): *Urban Transport*, Seiten 163–172, Southampton, 2004. WIT Press. (vgl. [127]).
- [134] POHLHEIM, H.: *Evolutionäre Algorithmen - Verfahren, Operatoren und Hinweise für die Praxis*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2000.
- [135] POHLHEIM, H.: *Genetic and Evolutionary Algorithm Toolbox (GEATbx) for Use with Matlab*. <http://www.geatbx.com>, Februar 2004.
- [136] POTTHOFF, G.: *Verkehrsströmungslehre, Band 5: Bedienungstheorie*. transpress, Berlin, 1975.
- [137] RECHENBERG, I.: *Evolutionstrategie: Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution*. Frommann-Holzboog Verlag, 1973.
- [138] REY, G., F. KUTZNER und W. SCHNEIDER: *Untersuchungen zu Angebot und Nachfrage für die S-Bahn München mit Zweiter Stammstrecke*. *Eisenbahntechnische Rundschau*, 53(3):120–132, März 2004.
- [139] RÖHLIG, S.: *Beschreibung und Berechnung der Bahnbelastung von Gleichstrom-Nahverkehrsbahnen*. Doktorarbeit, Fakultät für Elektrotechnik, Telekommunikation und Prozeßautomatisierung der Hochschule für Verkehrswesen „Friedrich List“, Dresden, 1992.

- [140] RUAN, W., T. C. GIRAS, Z. LIN und Y. OU: *Parameter determination for a rail system simulator by an intelligent genetic algorithm*. Proc. Instn Mech. Engrs Part F: J. Rail and Rapid Transit, 218:149–157, 2004.
- [141] RÜGER, S.: *Transporttechnologie städtischer öffentlicher Personenverkehr*. Transpress, Berlin, 1986.
- [142] SALIM, V. und X. CAI: *Scheduling Cargo Trains using Genetic Algorithms*. In: *IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, Seiten 224–227, Dezember 1995.
- [143] SANSÒ, B. und P. GIRARD: *Instantaneous Power Peak Reduction and Train Scheduling Desynchronization in Subway Systems*. Transportation Science, 31(4):312–323, November 1997.
- [144] SANSÓ, B. und P. GIRARD: *Train Scheduling Desynchronization and Power Peak Optimization in a Subway System*. In: *IEEE/ASME Joint Railroad Conference*, Seiten 75–78. IEEE, 1995.
- [145] S-BAHN RHEIN-NECKAR GMBH: *Kunden- und Unternehmensinformationen* <http://www.s-bahn-rheinneckar.de/>, Stand: 4.8.2004.
- [146] SCHLUNEGGER, H.: *Wechselrichterwerke bei DC-Bahnen*. Elektrische Bahnen, 101(11):500–506, 2003.
- [147] SCHMIDT, P.: *Energieversorgung elektrischer Bahnen*. transpress, Berlin, 1988.
- [148] SCHNIEDER, E. und K. H. KRAFT: *Optimale Trajektorien im spurgebundenen Schnellverkehr*. Regelungstechnik, Seiten 111–119, 152–155, 1981.
- [149] SCHOLZ, S.: *Die Möglichkeiten und Grenzen einer nachfrageabhängigen Steuerung des Beförderungsangebotes von S-Bahnen in mittleren Ballungsräumen - Ein Beitrag zur Szenarioanalyse alternativer Automatisierungs- und Flexibilisierungsstrategien*. Doktorarbeit, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der Technischen Universität Dresden, 2004.
- [150] SCHOLZ, S., S. OETTICH und T. ALBRECHT: *Die Möglichkeiten und Grenzen der Flexibilisierung des Beförderungsangebotes von Stadtschnellbahnen am Beispiel der Dresdner S-Bahn*. In: *19. Verkehrswissenschaftliche Tage*, Dresden, 2003. Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der TU Dresden.
- [151] SCHOLZ, S., H. STROBEL und S. OETTICH: *Demand-Driven Automated Urban Rapid Rail Transit: A New Approach to the Assessment of the Operational Efficiency*. In: *APM '03, Proc. Of the 9th Int. Conf. On Automated People Movers*, Singapur, 2003.

- [152] SCHÜTTE, J.: *Die Vorteile der flexiblen und automatischen Betriebsführung von Stadtschnellbahnen - Theoretische Hintergründe und praktische Erfahrungen in Frankreich*. In: *17. Verkehrswissenschaftliche Tage der TU Dresden*. Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der TU Dresden, 1998.
- [153] SCHÜTTE, J.: *Recent Trends in Automatic Train Controls*. In: *The 4th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (its)*, Seiten 813–819, 2001.
- [154] SHAO, Z.Y., W.S. CHAN, J. ALLAN und B. MELLITT: *A new method of DC power supply modelling for rapid transit railway system simulation*. *WIT Transactions on the Built Environment*, 6:551–558, 1994. COMPRAIL 1994.
- [155] SHRIVASTAVA, P. und S. L. DHINGRA: *Development of Coordinated Schedules using Genetic Algorithms*. *Journal of Transportation Engineering*, 128(1):89–96, Jan./Feb. 2002.
- [156] SIEMENS AG, TRANSPORTATION SYSTEMS: *FALKO: Fahrplan-Konstruktion und -Validierung (Produktbeschreibung)*. [www.siemens.com/ts](http://www.siemens.com/ts), Juli 2003.
- [157] SKOLICKI, Z. und K. DE JONG: *Improving Evolutionary Algorithms with Multi-representation Island Models*. In: YAO, X. ET AL. (Herausgeber): *Parallel Problem Solving from Nature*, Band 3242 der Reihe *Lecture Notes in Computer Science*, Seiten 420–429, Berlin-Heidelberg-New York, 2004. Springer-Verlag.
- [158] SONE, S.: *What Type of Electric Brake is Most Reasonable? - Friction and Heat Free Braking of Moderately Powered, Moderately Distributed Traction System*. In: ALLAN, J., R. J. HILL, C. A. BREBBIA, G. SCIUTTO und S. SONE (Herausgeber): *Computers in Railways VIII*, Seiten 615–622, Southampton, 2002. WIT Press. (vgl. [7]).
- [159] SONE, S., T. SUZUKI und T. KOSEKI: *Train scheduling and energy saving with pure electric braking and semi-automatic train operation*. In: BREBBIA, C.A., J. ALLAN, R. J. HILL, G. SCIUTTO und S. SONE (Herausgeber): *Computers in Railways VII*, Seiten 517–525, Southampton, 2000. WIT Press.
- [160] SÖYLEMEZ, M. und S. AÇIKBAS: *Multi-train simulation of DC rail traction power systems with regenerative braking*. In: ALLAN, J., C.A. BREBBIA, R.J. HILL, G. SCIUTTO und S. SONE (Herausgeber): *Computers in Railways IX*, Seiten 941–950, Southampton, 2004. WIT Press. (vgl. [5]).
- [161] STEPHAN, A. und U. MALCKE: *Einfluß von Leichterungen auf den Traktionsenergieverbrauch im SPNV*. *Eisenbahntechnische Rundschau*, 45(11):702–707, November 1996.
- [162] STROBEL, H.: *Computer Controlled Urban Transportation*. John Wiley & Sons, Chichester - New York - Brisbane - Toronto - Singapore, 1982.
- [163] STROBEL, H.: *Die Potenziale automatischer und flexibler Stadtschnellbahnen*. In: *Jahrbuch des Bahnwesens*, Seiten 106–118. Hestra-Verlag, 2001.

- [164] STROBEL, H., P. HORN und M. KOSEMUND: *Contribution to optimum computer-aided control of train operation*. In: *2nd IFAC/IFIP/IFORS Symposium on Traffic Control and Transportation Systems*, Seiten 377–387, Monte Carlo, 1974.
- [165] STROBEL, H. und S. SCHOLZ: *ITS for medium-sized urban areas: The rail-oriented approach of the Dresden INTERMOBIL project*. In: *Intelligent Transportation Systems*, Seiten 12–28. Zilina University, 2003.
- [166] STROBEL, H. und J. SCHÜTTE: *Optimale Anwendung automatischer Systeme*. In: *2. U-Bahn-Konferenz der UITP zum Thema „Umstellung konventionell betriebener U-Bahnen auf Automatikbetrieb“*, Nürnberg, 29. November 2004. UITP.
- [167] STRÖSSENREUTHER, H.: *Energy efficiency driving - Projekt EnergieSparen - Energiesparendes Fahren sicherstellen*. In: *2. UIC-Konferenz über Energieeffizienz im Schienenverkehr*, Seiten 39–40, Paris, 2004. UIC.
- [168] SYSTRA CONSULTING, INC.: *RAILSIM Simulation Software Suite (Produktbeschreibung)*. [www.railsim.com](http://www.railsim.com), Juli 2003.
- [169] TAKEUCHI, H. und C.J. GOODMAN: *A simulation study of peak demand reduction strategies when starting under moving block signalling*. *WIT Transactions on the Built Environment*, 18:187–196, 1996. COMPRAIL 1996.
- [170] TAKEUCHI, H., C.J. GOODMAN und S. SONE: *Peak demand reduction techniques when starting under moving block signalling*. In: *International Conference on Developments in Mass Transit Systems*. IEE, 1998.
- [171] TCHINDA, A.: *Energieoptimales automatisches Nahverkehrssystem mit Mikroprozessor auf dem Fahrzeug*. Doktorarbeit, Technische Universität Braunschweig, 1980.
- [172] UEBE, G.: *Optimale Fahrpläne*, Band 20 der Reihe *Lecture Notes in Operations Research and Mathematical Systems*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 1970.
- [173] UHER, R.A. und N. SATHI: *Reduction of Peak-Power Demand For Electric Rail Transit Systems*. Technischer Bericht 3, Transportation Research Board, Dezember 1983.
- [174] UNBEHAUEN, R.: *Elektrische Netzwerke: Eine Einführung in die Analyse*. Springer, Berlin-Heidelberg-New York, 1990.
- [175] VAN HEIJST, C.M. und D. HAMELS: *Verfahren zur genauen Berechnung der Energieverluste in einem Gleichstrom-Traktionsnetz*. *Elektrische Bahnen*, 78(7):170–179, 1980.
- [176] VENARD, C.: *Les divers systèmes d'alimentation électrique des métros*. *Revue Generale des Chemins de Fer*, Seiten 31–51, Juli/ August 2001.
- [177] VOGET, S.: *Aspekte Genetischer Optimierungsalgorithmen: Mathematische Modellierung und Einsatz in der Fahrplanerstellung*. Doktorarbeit, Universität Hildesheim, 1995.

- [178] WAGNER, R.: *Nutzbremmung von elektrischen Triebfahrzeugen*. Siemens-Energietechnik, 2(7):284–288, 1980.
- [179] WALLACE, R.: *Train Scheduling - Migration of Manual Methods to Scalable Computer Platforms*. In: DADUNA, J.R., I. BRANCO und J. M. PINTO PAIXAO (Herausgeber): *Computer-Aided Transit Scheduling*, Band 430 der Reihe *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, Seiten 321–333, Berlin-Heidelberg-New York, 1993. Springer Verlag.
- [180] WEGELE, S. und E. SCHNIEDER: *Automated Dispatching of Train Operations Using Genetic Algorithms*. In: ALLAN, J., R.J. HILL, C.A. BREBBIA, G. SCIUTTO und S. SONE (Herausgeber): *Computers in Railways IX*, Seiten 775–784, Southampton, Mai 2004. WIT Press. (vgl. [5]).
- [181] WEGELE, S. und E. SCHNIEDER: *Dispatching of train operations using genetic algorithms*. In: *9th international conference of Computer-Aided Scheduling of Public Transport*, San Diego, 2004.
- [182] WEGELE, S., R. SLOVÁK, J. DREWES, E. SCHNIEDER und K. BASELT: *Optimale Zugtrassenplanung mittels Genetischer Algorithmen*. In: *Internationales Symposium Žel2003*, Seiten 114–123, Žilina, 2003.
- [183] WEGELE, S., R. SLOVÁK und E. SCHNIEDER: *Automated Train Operation Planning Using Genetic Algorithms*. In: *IFAC World Congress*, Seiten 361–367, Tokyo, 2003.
- [184] WEGELE, S., R. SLOVÁK, E. SCHNIEDER, R. POMP, K. BASELT und U. PEISER: *Lösung von Konflikten bei der Fahrplanerarbeitung mit Genetischen Algorithmen*. In: *Internationales Symposium Žel2002*, Seiten 169–179, Žilina, 2002.
- [185] WENDE, D.: *Fahrdynamik*. transpress, Berlin, 1990.
- [186] WESTEN, J.G. und J.P. MCKENNA: *London Underground Train Service Model: A Description of the Model and its Uses*. In: BROWN, J.C., J. ALLAN und B. MELLITT (Herausgeber): *Computers in Railways II*, Seiten 133–147, Southampton, 1990. Computational Mechanics Publications.
- [187] WHITLEY, D.: *A Genetic Algorithm Tutorial*. *Statistics and Computing*, 4:65–85, 1994.
- [188] WHITLEY, D.: *An Overview of Evolutionary Algorithms*. *Journal of Information and Software Technology*, 43:817–831, 2001.
- [189] ZHONGMING, Y.E., L.O. EDWARD, M.H. PONG und K. H. YUEN: *Traction System Scheduling to Minimize Harmonic Current Level at Substation by Genetic Algorithm*. In: *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, Seiten 384–389, Juli 1999.
- [190] ZIMMERMANN, W.: *Operations Research - Quantitative Methoden zur Entscheidungsvorbereitung*. R. Oldenbourg Verlag, München Wien, 1997.

- [191] ZINKE, R.: *Beitrag zur energetischen Optimierung von Zugfahrten mittels Bordrechner*. Doktorarbeit, Fakultät für Elektrotechnik, Telekommunikation und Prozeßautomatisierung der Hochschule für Verkehrswesen Dresden, 1991.
- [192] ZITZLER, E. und L. THIELE: *Multiobjective Evolutionary Algorithms: A Comparative Study and the Strength Pareto Approach*. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 3(4):257–271, November 1999.



# Anhang



# Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Formelzeichen

## Formelzeichen

$A$	Parameter der quadratischen Fahrwiderstandsgleichung
$a$	Parameter der linearisierten Fahrwiderstandsgleichung
$B$	Parameter der quadratischen Fahrwiderstandsgleichung
$b$	Parameter der linearisierten Fahrwiderstandsgleichung
$bl$	Betriebsleistung
$C$	Parameter der quadratischen Fahrwiderstandsgleichung
$C_V$	Fahrzeugkapazität (Summe der Sitz- und Stehplätze)
$\gamma$	geplanter maximaler Besetzungsgrad
$E$	Energieverbrauch
$\eta$	Wirkungsgrad, insb.
$\eta_V$	Verkehrswirkungsgrad
$F$	Kraft
$f_H$	Fahrtenhäufigkeit
$g_{ant}$	Parameter der Linearisierung der Leistungshyperbel im Antriebsbereich
$g_{brems}$	Parameter der Linearisierung der Leistungshyperbel im Bremsbereich
$h$	Stunde des Tages
$I$	Strom
$i_m$	mittlerer Streckenwiderstand
$j$	Ruck
$m$	Masse
$P$	Leistung, insb.
$P_{eff}$	Effektivleistung
$P_{max,eff}(t^*)$	maximale Effektivleistung im Zeitintervall $t^*$
$R$	OHMScher Widerstand
$t$	Zeit
$t_f$	geplante Fahrzeit
$t_{RZ}$	Reisezeit
$t_W$	Wartezeit
$\overline{t_W}$	mittlere Wartezeit
$T$	Takt, Zugfolgezeit
$U$	Spannung
$u_B$	auf die Masse normierte maximale Bremskraft (max. Bremsverzögerung)
$u_T$	auf die Masse normierte maximale Antriebskraft (max. Antriebsbeschleunigung)

## Formelzeichen (Fortsetzung)

$VA(h, i, j)$	Verkehrsaufkommen in Stunde $h$ von Abschnitt/ Station $i$ nach Abschnitt/ Station $j$
$vl$	Verkehrsleistung
$v_m$	zugelassene Streckenhöchstgeschwindigkeit
$v_P$	Nenngeschwindigkeit (Erreichen der Nennleistung)
$x$	Bezeichnung für Zustandsgrößen
$x_1$	Weg
$x_{1f}$	Länge eines Teilabschnitts
$x_2$	Geschwindigkeit
$x_{2A}$	Anfangsgeschwindigkeit eines Teilabschnitts
$x_{2E}$	Zielgeschwindigkeit eines Teilabschnitts
$Y$	Leitwert
$\zeta_{netz}$	Netzbezogener Rückspeisegrad
$\zeta_{sys}$	Systembezogener Rückspeisegrad

## Verwendete Indizes

ant	Antrieb
ausl	Auslauf
beh	Beharrung
brems	Bremsen
eff	effektiv
sys	System-, systembezogen
Uw	Unterwerk

## Abkürzungen

AGT	Automated Guided Transit (bezeichnet fahrerlose Stadtschnellbahnen)
BR	Baureihe
DB	Deutsche Bahn
DP	Dynamische Programmierung
ETCS	European Train Control System - Einheitliches Europäisches Zugsicherungssystem
GA	Genetische Algorithmen
UIC	Union internationale du chemin de fer Internationaler Eisenbahnverband
UITP	Union Internationale du Transport Public (internationaler Verband des öffentlichen Verkehrswesens)
Uw	Unterwerk
VAL	Véhicule automatique léger Leichtes automatisches Fahrzeug - Fahrzeugtyp der Metro Lille

# Struktogramme für die Beseitigung von Konflikten (Anlagen zu Kapitel 5)

## Kodierung von Abfahrtszeiten (Verfahren I)

### **Erzeugen eines sicherungstechnisch machbaren Fahrplans**

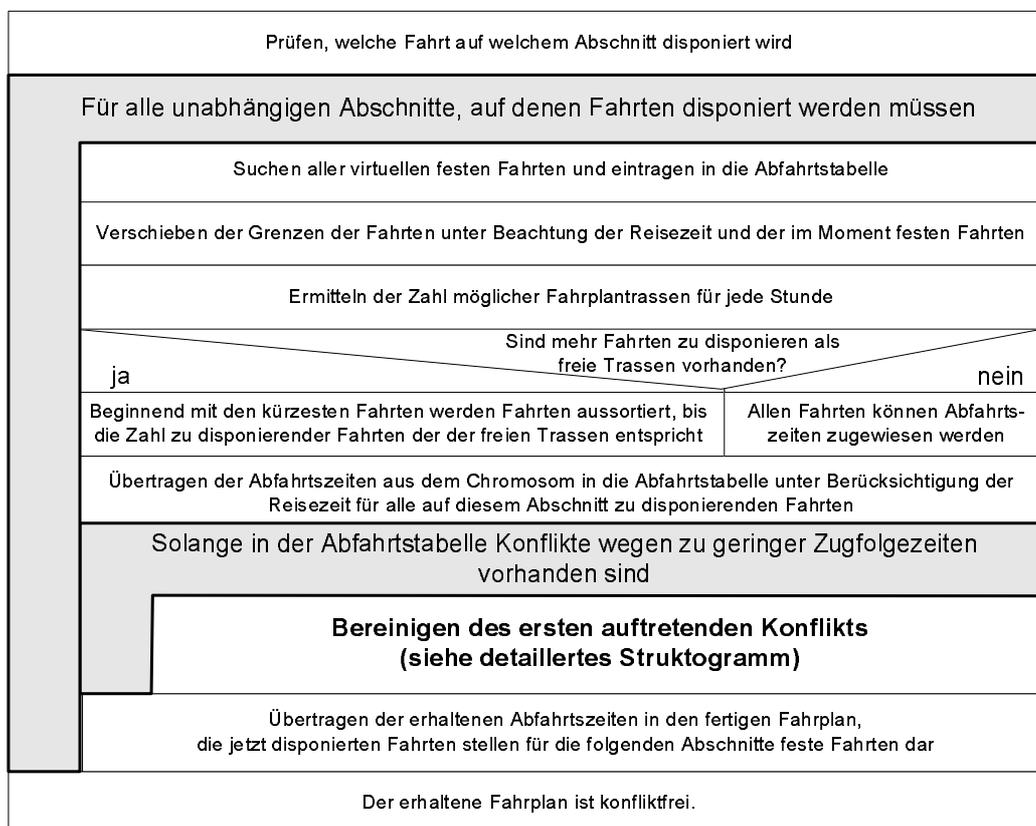


Abbildung 10.1: Struktogramm 1: Ablauf des deterministischen Verfahrens zur Erzeugung eines sicherungstechnisch machbaren Fahrplans

## Bereinigen des ersten auftretenden Konflikts

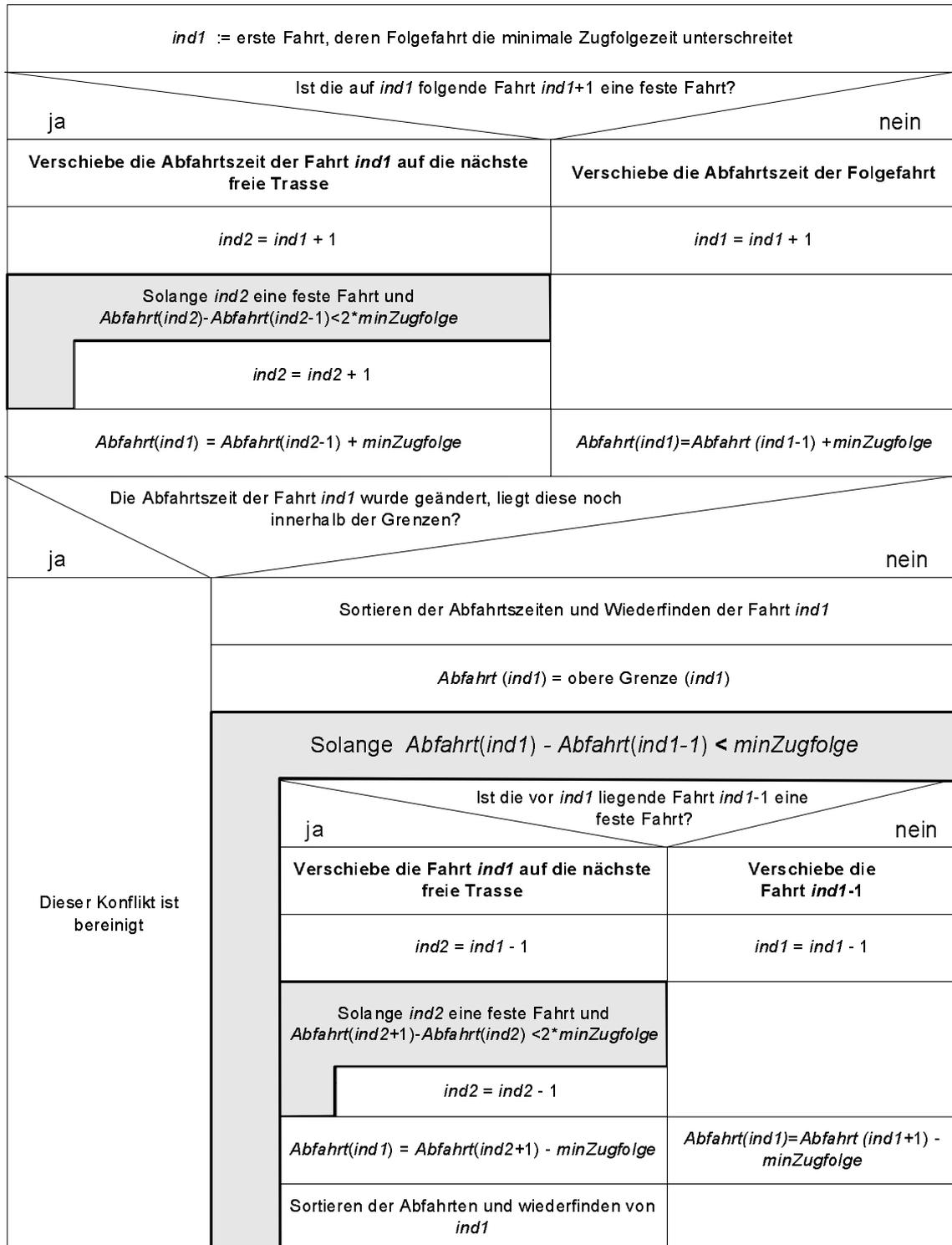


Abbildung 10.2: Struktogramm 2: Bereinigung des ersten auftretenden Konflikts

## Kodierung von Zugfolgepufferzeiten (Verfahren II)

### Erzeugen eines sicherungstechnisch machbaren Fahrplans

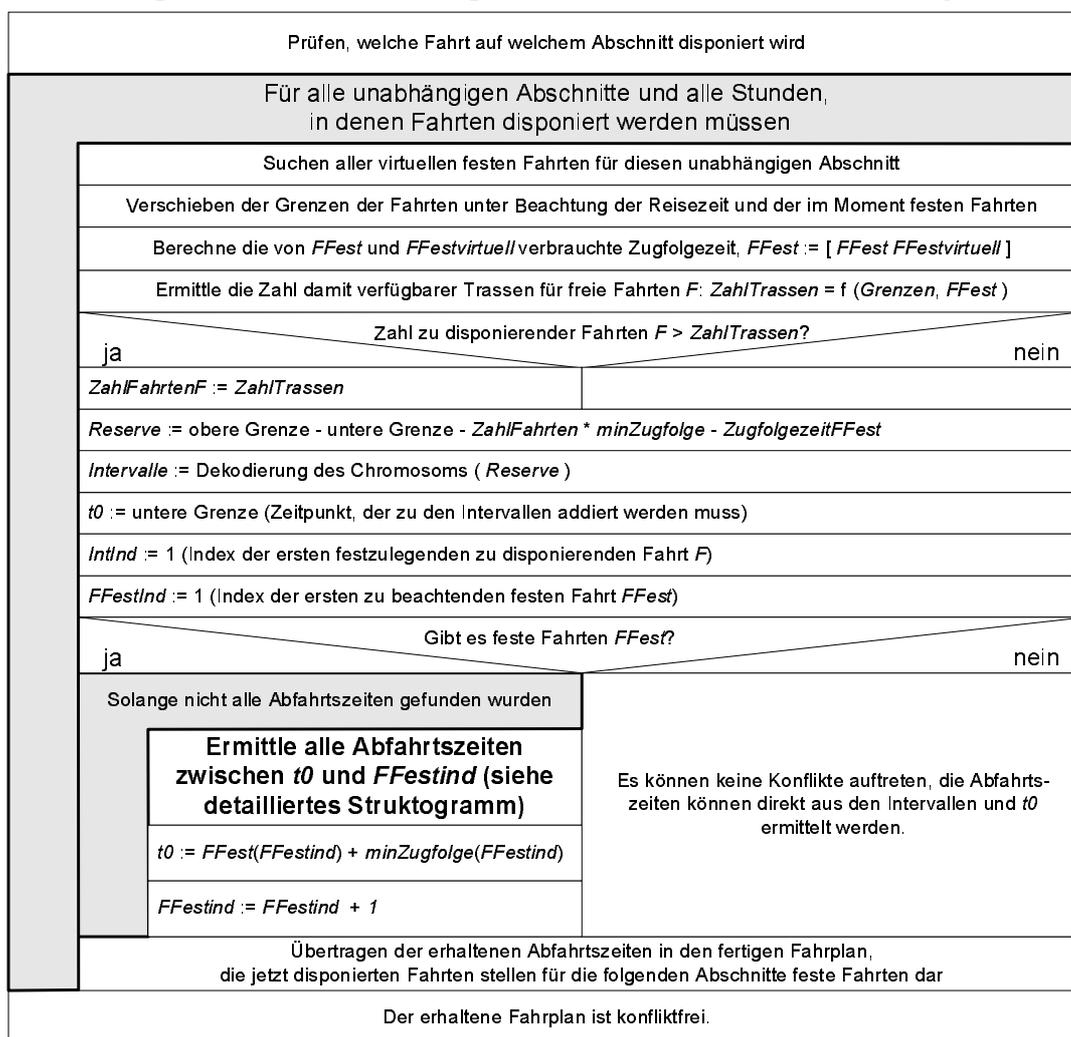


Abbildung 10.3: Verfahren II Struktogramm 1

### Ermittlung der Abfahrtszeiten vor der nächsten festen Fahrt

<i>AnznochfreieFahrten</i> := Anzahl noch zu disponierender Fahrten <i>F</i>		
<i>FbisFFest</i> := Anzahl Fahrten, die bei aktueller Belegung der Intervalle noch vor <i>FFestInd</i> platziert würden		
<i>AnznochfreieFahrten</i> < <i>FbisFFest</i> ?		
ja	nein	
<i>FbisFFest</i> := <i>AnznochfreieFahrten</i>		
Wenn <i>FbisFFest</i> Fahrten bis <i>FFestInd</i> gelegt werden, können dann nach <i>FFestInd</i> noch <i>AnznochfreieFahrten</i> - <i>FbisFFest</i> gelegt werden?		
ja	nein	
<i>Neulnt</i> := Wie groß muss das letzte Intervall vor <i>FFestInd</i> sein?	Die Summe der Intervalle bis <i>FbisFFest</i> ist zu groß!	
<i>dt</i> := <i>Neulnt</i> - Intervall vor <i>FFestInd</i>		
<i>muessenrein</i> := Wie viele Fahrten müssen vor <i>FFestInd</i> platziert werden, damit <i>AnznochfreieFahrten</i> realisiert werden können?		
<i>Reserve</i> := <i>FFest</i> ( <i>FFestInd</i> ) - <i>muessenrein</i> * <i>minZugfolge</i>		
<i>dt</i> < 0 ?		
ja	nein	
Das letzte Intervall vor <i>FFestInd</i> ist zu groß!	Das letzte Intervall vor <i>FFestInd</i> ist zu klein!	<i>dt</i> := $\sum$ Intervalle (von <i>IntInd</i> bis <i>muessenrein</i> ) - <i>Reserve</i>
Intervall ( <i>FFestInd</i> +1) := Intervall ( <i>FFestInd</i> +1) + <i>dt</i>	Solange <i>dt</i> > 0	<i>dt1</i> := <i>dt</i>
	Reduziere die Intervalle nach <i>FFestInd</i> gleichmäßig	Solange <i>dt</i> > 0
<i>Intervall</i> vor <i>FFestInd</i> := <i>Neulnt</i>		Reduziere die Intervalle vor <i>FFestInd</i> gleichmäßig
<i>Intervall</i> ( <i>IntInd</i> + <i>muessenrein</i> + 1) := <i>Intervall</i> ( <i>IntInd</i> + <i>muessenrein</i> + 1) + <i>dt</i>		

Abbildung 10.4: Verfahren II Struktogramm 2

# Über den Autor

Thomas Kurt Albrecht  
geboren am 11. Juli 1975 in Dresden  
Familienstand in eheähnlicher Gemeinschaft lebend, 2 Kinder

## Bildungsgang

1990-1994 Gymnasium Dresden-Blasewitz „M.A. Nexö“-Schule mit vertiefter naturwissenschaftlich-technischer Ausbildung, Abschluss: Abitur  
1995-2001 Studium Verkehrsingenieurwesen, Vertiefungsrichtung Verkehrstelematik an der TU Dresden, Fakultät Verkehrswesen „Friedrich List“, Abschluss: Diplom  
2002 Preisträger des Georg-Helm-Preises der TU Dresden für eine der drei besten Abschlussarbeiten der TU im Jahr 2001 (einzige Diplomarbeit)  
2001-2004 Doktorand am Lehrstuhl Verkehrsleitsysteme und -prozessautomatisierung, TU Dresden, Fakultät Verkehrswesen „Friedrich List“

## Praktika und Berufserfahrung

1994-1995 Wehersatzdienst, Sächsisches Krankenhaus für Psychiatrie und Neurologie Arnsdorf, Abteilung für forensische Psychiatrie  
1995-1997 versch. Praktika, u.a. Regionalverkehr Dresden, Verkehrsverbund Oberelbe, Landesverkehrsgesellschaft Sachsen  
1997-1998 Praktikum bei der Societé Générale des Techniques et d'Etudes (SGTE), Cergy-Pontoise, Frankreich (10 Monate)  
1998-2001 Studentische Hilfskraft an der TU Dresden, Institut für Verkehrsinformationssysteme  
2001-2005 Wissenschaftlicher Mitarbeiter und Doktorand an der TU Dresden, Lehrstuhl für Verkehrsleitsysteme und -prozessautomatisierung  
2004 Einladung zur Mitarbeit im „International Scientific Advisory Committee“ der 10. Internationalen Konferenz COMPRAIL 2006 in Prag  
2005 Postdoktorand an der Technischen Universität Delft, Niederlande (Förderung des Deutschen Akademischen Austauschdienstes DAAD)