

# Linien-, Fahrplan-, Umlauf- und Dienstplanoptimierung: Wie weit können diese bereits integriert werden?

**Dr. rer. nat. Christian Liebchen**

Technische Universität Berlin, Institut für Mathematik, Straße des 17. Juni 136,  
D-10623 Berlin, Tel. +49-30-31425791, Fax. +49-30-31425191,  
E-Mail: [liebchen@math.tu-berlin.de](mailto:liebchen@math.tu-berlin.de)

## Kurzfassung

“Ein Dienstplan kann nur so gut sein, wie es der zu Grunde liegende Fahrplan erlaubt.” So trivial diese Beobachtung auch ist, so weit reichende Konsequenzen besitzt sie für die Verkehrsplanung insgesamt. In diesem Beitrag wird vorgeführt, wie mit dem für die Taktfahrplanoptimierung etablierten mathematischen Optimierungsmodell gezielt solche Fahrpläne berechnet werden können, die besonders gute Umlauf- und Dienstpläne ermöglichen. Obendrein können in diesem Modell nachträglich bestimmte Entscheidungen der Linienplanung korrigiert werden, wenn dies über alle Planungsschritte betrachtet auf bessere Lösungen führt.

Entsprechende Optimierungsläufe wurden für das 2006er Netz des Verkehrsbetriebs in Potsdam vorgenommen. Der Vergleich der Effizienz von Dienstplänen basiert dabei auf Berechnungen mit dem entsprechenden Optimierungsmodul in Microbus.

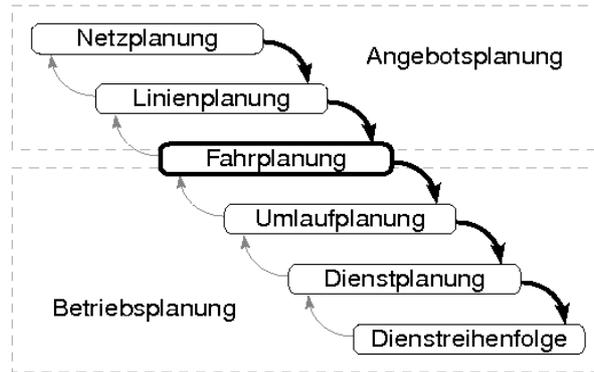
## 1 Traditionelle Verkehrsplanung

*“Aus der abstrakten Sicht eines Mathematikers kann der Betrieb eines öffentlichen Nahverkehrssystems als ein gigantisches Optimierungsproblem mit komplexen Nebenbedingungen aufgefasst werden.”*

Grötschel, Löbel und Völker [1]

Aus diesem Grund vollzieht sich die Planung öffentlichen Verkehrs typischerweise hierarchisch – unter Inkaufnahme eines entsprechenden Verlustes an Optimierungspotenzial. Im Einzelnen bilden die in Bild 1 dargestellten Planungsschritte die Hauptaufgaben.

Einige dieser Aufgaben untergliedern sich dabei weiter. Beispielsweise werden im Rahmen der Fahrplanung häufig zunächst für jede Zeitscheibe (Hauptverkehrszeit, Spätverkehr etc.) die Taktlagen (auch: Minutenpläne bzw. Fahrlagen) der einzelnen Linien bestimmt. Anschließend werden geeignete Übergänge zwischen den Zeitscheiben entwickelt und ggf. einzelne Verstärkerfahrten eingepflegt. Schließlich muss insbesondere im Schienenverkehr noch eine Abstimmung mit dem Eisenbahninfrastrukturunternehmen bzw. mit konkurrierenden Eisenbahnverkehrsunternehmen erfolgen.



**Bild 1: Traditionelles hierarchisches Vorgehen in der Verkehrsplanung**

Seit mittlerweile etwa 10 Jahren werden die Betriebsplaner von verschiedenen Softwarepaketen unterstützt. So verfügen beispielsweise Microbus oder PTV Interplan über einen mathematischen Optimierungskern für die Umlaufplanung und für die Dienstplanung. Für die anderen Planungsschritte konnte sich jedoch noch keine entsprechende Software am Markt durchsetzen. Selbst die bloße Realisierung einzelner mathematisch optimierter Konzepte ist insbesondere für die Angebotsplanung auf ganz vereinzelte Beispiele beschränkt. So handelt es sich bei dem vom Autor auf der HEUREKA '05 vorgestellten Fahrplan 2005 der Berliner U-Bahn um das erste realisierte mathematisch optimierte Angebotskonzept [2].

## 2 Integrierte Planung

In jüngster Zeit wurden verstärkt Anstrengungen unternommen, das durch die Unterteilung in mehrere Planungsschritte zunächst vergebene Optimierungspotenzial für mathematische Methoden zu erschließen. Besonders erfolgreich gelang dies für die beiden Aufgaben der Umlauf- und Dienstplanung. Hier werden inzwischen integrierte Optimierungsverfahren in den bereits genannten Softwarepaketen angeboten.

Vor demselben Hintergrund wurde in [4] ein diskretes Optimierungsmodell entwickelt, das Linienplanung und Umlaufplanung integriert betrachtet. Ziel dieses Modells ist es, Linienpläne zu berechnen, deren Linien voraussichtlich einen besonders effektiven Fahrzeugeinsatz ermöglichen. Da die exakten Kosten der Umläufe aber erst nach einer exakten Umlaufplanung feststehen können, die wiederum streng genommen einen präzisen Fahrplan erfordert, liegt es auf der Hand, dass es sich bei der Kostenbewertung um eine bisweilen ziemlich grobe Abschätzung handeln muss.

Das Hauptproblem der in [4] vorgenommenen Abschätzung besteht darin, dass sie die Fahrplanung als Zwischenschritt komplett ausblendet. Entsprechend haben Liebchen und Möhring [5] Praxisbeispiele angegeben, in denen Belange der Fahrplanung – wie beispielsweise die Beachtung eingleisiger Strecken – verhindern, dass der eigentlich prognostizierte Fahrzeugbedarf auch tatsächlich erreicht werden kann. Kurz: Im Rahmen der integrierten Planung wurden bei der Konstruktion eines Linienplanes für seine Umlaufplanung Kennzahlen versprochen, die jedoch in der eigentlichen Umlaufplanung definitiv nicht gehalten werden können.

Die hier beobachtete wichtige Rolle der Fahrplanung für die Verkehrsplanung spiegelt sich auch in dem folgenden Zitat wieder:

*“The timetable is the essence of the service offered by any provider of public transport.”*

Tyler [6]

Es ist bereits hier festzuhalten, dass Integration selbstverständlich *kein* Selbstzweck ist. Insbesondere wird es niemals im Interesse der Verkehrsplanung sein, in dem nur wenige Monate umfassenden Rhythmus, in dem heutzutage Umlaufpläne erzeugt werden, künftig den Fahrgästen ein komplett neues Liniennetz zumuten zu wollen. Bei integrativen Optimierungsansätzen kommt es also vielmehr darauf an, das in dem gesamten Planungsprozess schlummernde Optimierungspotenzial möglichst umfassend zu wecken. Und dies bedingt wiederum, dass die Auswirkungen der Ergebnisse früher Planungsschritte (z.B. Linienplanung) auf die nachgelagerten Planungsschritte (z.B. Umlaufplanung) möglichst präzise quantitativ abgeschätzt werden.

Dass eine solche akkurate Abschätzung bislang stets konkrete Ergebnisse auch für die nachgelagerten Planungsschritte erfordert, ist eher als Manko der für die frühen Planungsschritte bekannten Verfahren aufzufassen, als dass dieses Vorgehen wirklich notwendig wäre. Insbesondere kommt es bei einer Integration von der Linien- bis zur Dienstplanung nicht darauf an, dass die zur detaillierten Bewertung der betrachteten Linienpläne herangezogenen Dienstpläne jemals in Betrieb gehen würden. Sie dienen einzig dem Zweck einer validen Kostenabschätzung für ihren jeweiligen Linienplan.

Einen in diesem Sinne zuverlässigen Integrationsansatz, bei dem also deutlich häufiger im Detail das gehalten werden kann, was bei integrierter Betrachtung in einem relativ frühen Planungsschritt versprochen wurde, hat Nachtigall [7] für die Fahrplan- und Umlaufoptimierung vorgestellt. Insbesondere in Netzen, in denen aus bestimmten Gründen feste Zuordnungen zwischen Linien und Fahrzeugen bestehen (z.B. Fahrzeugtypen, räumlich weit voneinander entfernte Endpunkte), können gezielt Taktfahrpläne berechnet werden, die bei ihrer tatsächlichen Realisierung einen äußerst effizienten Fahrzeugeinsatz ermöglichen. Übrigens: Ohne diese wichtige Eigenschaft der Taktfahrplanoptimierung hätte beispielsweise vom Autor kein Fahrplan für die Berliner U-Bahn berechnet werden können, der echte Aussicht auf Realisierung gehabt hätte. Nichtsdestoweniger gibt es Netze, für welche die Fahrzeuganzahl allein für sich genommen nur bedingte Aussagekraft besitzt, und es vielmehr zwingend gilt, auch die speziellen Belange der Dienstplanung zusätzlich zu beachten.

Die Integration einer vollwertigen Linienplanung mit einer vollwertigen Fahrplanoptimierung erweist sich bei weiter gehenden Integrationsbemühungen als eine Art „Knackpunkt“ und steht entsprechend noch aus. Auch die vorliegende Arbeit vermag diesen Durchbruch leider nicht zu erzielen. Vielmehr versteht sie sich als erstes solides Optimierungsmodell für die Fahr-, Umlauf- und sogar Dienstplanung, dessen Lösungsraum obendrein um wichtige Entscheidungen der Linienplanung bereichert wird.

Ein alternatives integriertes Vorgehen zur Linien-, Fahrplan-, Umlauf- und Dienstplanung wurde im Dezember 2007 von Michaelis und Schöbel [8] vorgestellt. In diesem umfassenden Ansatz wird eine vollständige Linienplanung incl. Wegewahl der Fahrgäste und sogar eine Modal-Split Abschätzung vorgenommen. Aus Laufzeitgründen erfolgt die Bewertung der zahlreich generierten Lösungen jedoch rein heuristisch. So wird beispielsweise bei der Fahrplanerstellung in Greedy-Manier vorgegangen. Insbesondere ist das im Allgemeinen eigentlich erforderliche Backtracking nicht realisiert. Vorbehaltlich dieser abhängig von der

Netzstruktur bisweilen gravierenden Einschränkung erfolgt die Bewertung jedoch derart, dass die im Rahmen der Linienplanung für die nachgelagerten Planungsschritte (z.B. Zahl der Dienste) versprochene Qualität auch tatsächlich eingehalten werden kann.

Einerseits sind bei diesem Vorgehen keine mathematischen Aussagen zur Güte der konstruierten Lösungen vorgesehen. Andererseits wurde die Methode jedoch bereits auf dem Netz der Göttinger Verkehrsbetriebe erprobt (im Ergebnisplan 10 Buslinien). Verglichen mit dem Status Quo wurde nach Aussage der Autoren ein sehr ähnliches Liniennetz generiert. Dies mag damit zusammenhängen, dass der Plan bezüglich der Vorgabe konstruiert werden musste, dass jede Linie einen von zwei zentralen Punkten in Göttingen ansteuert.<sup>1</sup> Vor diesem Hintergrund darf es überraschend erscheinen, dass die durch den neuen Plan erzielte Verbesserung der Angebotsqualität mit mehr als 18% beziffert wurde. Ergänzend zu diesem Vergleich mit einer der Realität entnommenen Referenzlösung dürfte als weiterer interessanter Benchmark eine Lösung dienen, die durch Hintereinanderschalten der Optimallösungen weniger umfassend integrierender Optimierungsprobleme (z.B. „nur“ Fahr- und Umlaufplanung) gewonnen wurde.

Weitere Ansätze zur Integration von Fahr-, Umlauf- und Dienstplanung basieren auf den in der Umlauf- und Dienstplanung eingesetzten Modellen. So wurde beispielsweise in [10] vorgeschlagen, die Lage einzelner Fahrten nachträglich zu verschieben, um bessere Umlauf- und Dienstpläne zu ermöglichen. Die sich bei einem solchen Vorgehen aufdrängende Frage nach den möglichen negativen Effekten derartiger Verschiebungen beispielsweise auf Fahrgastwartezeiten ist nach jüngster Auskunft der Autoren weiterhin Untersuchungsgegenstand. Eine Rückkoppelung sogar bis hinein in die Linienplanung, wie sie durch das Ändern der Routen einzelner Fahrten grundsätzlich vorstellbar wäre, wurde bis dato nicht betrachtet.

Sobald einzelne Fahrten individuell gegeneinander verschoben werden, bewegt man sich außerhalb des Rahmens der Taktfahrpläne. Damit entfallen deren Zusatznutzen [11], wie beispielsweise ihre leichte Merkbarkeit. Dem gegenüber steht ein eher bescheidener Nutzen, insbesondere wenn wie in Potsdam ein und derselbe Minutenplan von ca. 04:00h bis ca. 01:00h gilt (vgl. Kapitel 8). Borndörfer und Liebchen [12] zeigen für diesen Fall, dass bei gleicher Fahrtenzahl durch ein Abweichen vom Takt kein Fahrzeug eingespart werden kann.

In der vorliegenden Arbeit wird auf das in [2][3][7] verwendete Optimierungsmodell zur integrierten Fahr- und Umlaufplanung aufgebaut. Dieses wurde bereits von Liebchen und Möhring [5] um die Einbeziehung wichtiger Aspekte der Linienplanung erweitert (siehe Kapitel 6). In dem auf diese Weise erweiterten Lösungsraum werden entsprechend bessere Gesamtlösungen gefunden. Ehrlicherweise ist dabei festzuhalten, dass keine vollwertige Linienplanung „from scratch“ vorgenommen wird. Dieses bereits drei Planungsschritte bearbeitende Optimierungsmodell wird schließlich mit dieser Arbeit erstmals um die entscheidenden Belange der Dienstplanung ergänzt. Dabei wird streng dem Gedanken gefolgt, dass zwar modellseitig geringe vereinfachende Annahmen vorgenommen werden – so werden beispielsweise einzelne Schülerfahrten nicht betrachtet. Einmal aufgestellt, wird das Modell jedoch mit exakten Optimierungsverfahren gelöst. Beim Vergleich der im Modell leicht vereinfachten Bewertung mit einer detaillierten Analyse im Rahmen der Dienstplanoptimierung wird sich herausstellen, dass die vorgenommenen modellseitigen

---

<sup>1</sup> Auch Völker [9] hat bereits Linien-, Fahr-, Umlauf- und Dienstplanung in einem gemeinsamen Modell heuristisch betrachtet. Verglichen mit Schöbel [8] hat er stärker eingeschränkte Netztopologien betrachtet: echte Sternnetze.

Vereinfachungen offenbar nicht ins Gewicht fallen. Die Grenze des praktisch Rechenbaren wird mit dem Stadtverkehrsnetz der Landeshauptstadt Potsdam (15 Tram- und Buslinien) übrigens noch nicht einmal annähernd erreicht.

### **Gliederung**

In Kapitel 3 werden die Effekte der Fahrplanung auf die Dienstplanung anhand von Beispielen illustriert. In den Kapiteln 4 und 5 wird das mathematische Modell für die Fahr-, Umlauf- und Dienstplanoptimierung vorgestellt, und in Kapitel 6 um Aspekte der Linienplanung abgerundet (vgl. [3][5]). In Kapitel 7 wird eine leistungsfähige Heuristik speziell zur Konstruktion dienstplanungsfreundlicher Fahrpläne vorgestellt (vgl. [3]). Die Anwendung des mit dieser Arbeit vorgestellten Modells auf das Stadtverkehrsnetz der Landeshauptstadt Potsdam wird schließlich in Kapitel 8 beschrieben.

## **3 Zentrale Aspekte der Dienstplanung**

Ein besonders wichtiger Punkt der Dienstplanung ist das Einhalten sämtlicher gesetzlicher, tarifvertraglicher und ggf. noch innerbetrieblicher Vorgaben zu Pausenzeiten<sup>2</sup>. Grundsätzlich bestehen zwei Möglichkeiten, dem Personal entsprechende Pausen zu gewähren: Erstens können Pausen auf dem Fahrzeug gewährt werden, beispielsweise während planmäßiger Wendezeiten. Zweitens können Pausen durch Ablösung durch Kollegen und Verbringen der Pausenzeit in einem Pausenraum gewährt werden.

Das zweite Vorgehen hat den Vorteil, dass es Fahrplanung und Dienstplanung weitgehend voneinander entkoppelt. Es eignet sich jedoch nur für Verkehrsunternehmen, die einen sehr hohen Pünktlichkeitsgrad aufweisen. Denn ansonsten kann sich jede eingetretene Verspätung mit jeder Pausengewährung verdoppeln: Neben der eigentlichen Verspätung nimmt der abgelöste Fahrer die Verspätung seines ersten Fahrzeuges mit in die Pause. Dann kann er aber ggf. erst verspätet sein nächstes Dienststück auf einem anderen Fahrzeug antreten, und überträgt so die Verspätung seines ersten Fahrzeuges auf sein zweites Fahrzeug.

Da Bus- und Straßenverkehr mitunter starken Einflüssen des Individualverkehrs ausgesetzt sind, werden hier Pausenzeiten häufig auf den Fahrzeugen gewährt, so auch zum überwiegenden Teil bei unserem Praxispartner, dem Verkehrsbetrieb in Potsdam (ViP). Damit kommt den Wendezeiten aber eine entscheidende Rolle zu: Sind sie ausreichend lang, um als Pausenzeit anrechenbar zu sein? Und da Wendezeiten das unmittelbare Ergebnis der Fahrplanung sind, liegt bei dieser Pausenstrategie der enge Zusammenhang zwischen Fahr- und Dienstplanung auf der Hand. Wichtig dabei: In städtischen Verkehrsunternehmen machen die Personalkosten der Fahrer häufig mehr als 70% der gesamten Betriebskosten aus.

Zur "Verbesserung der Arbeitsbedingungen und der Sicherheit im Straßenverkehr" haben der Rat der Europäischen Gemeinschaften und das Bundesministerium für Verkehr verordnet, dass folgende Lenkzeitunterbrechungen einzuhalten sind:

---

<sup>2</sup> Auf eine juristisch unanfechtbare Abgrenzung der relevanten Begriffe des Arbeitszeitgesetzes, der Fahrpersonalverordnung, aus EU-Verordnungen, Tarifverträgen (z.B. TV-N) und eventuellen Betriebsvereinbarungen wird in der vorliegenden Arbeit bewusst verzichtet. Vielmehr werden die flexibelsten Pausenmodi angesetzt, die noch den Vorgaben *aller* genannten Quellen genügen.

*"Nach einer Lenkzeit von viereinhalb Stunden ist eine Unterbrechung von mindestens 30 zusammenhängenden Minuten einzulegen. Diese Unterbrechung kann durch zwei Teilunterbrechungen von jeweils mindestens 20 zusammenhängenden Minuten oder drei Teilunterbrechungen von jeweils mindestens 15 Minuten ersetzt werden."*

(§1 Abs. 3 (1) Fahrpersonalverordnung (FPersV) 2005, im Rahmen des Artikels 7 (3) der Verordnung (EWG) Nr. 3820/25)

Speziell im städtischen öffentlichen Straßenpersonenverkehr sind im Rahmen der so genannten "Sechstelregelung" auch kürzere Wendezeiten als Lenkzeitunterbrechungen anrechenbar:

*"Beträgt der durchschnittliche Haltestellenabstand nicht mehr als drei Kilometer, sind als Lenkzeitunterbrechungen Arbeitsunterbrechungen ausreichend, soweit diese nach den Dienst- und Fahrplänen in der Arbeitsschicht enthalten sind (z.B. Wendezeiten). Voraussetzung hierfür ist, dass die Gesamtdauer der Arbeitsunterbrechungen mindestens ein Sechstel der vorgesehenen Lenkzeit beträgt. Arbeitsunterbrechungen unter zehn Minuten werden bei der Berechnung der Gesamtdauer nicht berücksichtigt. Durch Tarifvertrag kann vereinbart werden, dass Arbeitsunterbrechungen von mindestens acht Minuten berücksichtigt werden können."*

(FPersV 2005, §1 Abs. 3 (2))

## **Beispiel**

Zur Illustration der bestehenden Möglichkeiten zur Einhaltung von Lenkzeitunterbrechungen werden in Tabelle 1 für ein und dieselbe Linie (Taktzeit  $T=20$  Minuten) drei verschiedene Fahrpläne angegeben. Diese werden über einen Betriebszeitraum von jeweils 18 Stunden analysiert. Jeder Fahrplan gewährt dabei auf jeweils andere Weise die erforderlichen Lenkzeitunterbrechungen.

Fahrplan 1 erfordert für seinen Betrieb permanent drei Fahrzeuge. Die Wendezeiten sind derart reichlich bemessen, dass sie zur Gewährung der vorgeschriebenen Lenkzeitunterbrechungen mehr als ausreichend sind („Blockpausen“). Abhängig von betrieblichen Vereinbarungen kann es möglich sein, einen Teil der Wendezeiten als unbezahlte Pausenzeiten zu deklarieren. Ein 18-stündiger Betrieb dieser Linie wäre bei Fahrplan 1 entsprechend durch zweimal jeweils drei, also 6 neunstündige Dienste mit jeweils etwa 8 Stunden bezahlter Zeit sichergestellt. Insgesamt ergeben sich so 48 Stunden bezahlte Zeit.

Gemäß den Belangen der Umlaufplanung könnte Fahrplan 2 grundsätzlich mit zwei Fahrzeugen betrieben werden. Die planmäßigen Wendezeiten stellen jedoch keine Lenkzeitunterbrechungen im Sinne des Gesetzgebers dar. Insofern die Pausen auf den Fahrzeugen genommen werden sollen, muss zur Gewährung entsprechender Lenkzeitunterbrechungen pro Schicht ein Pausenwagen zwei "Runden" mitfahren. Dieser könnte dann beispielsweise die eigentlich 5-minütige Wendezeit in A-Platz vorübergehend zweimal auf 25 Minuten erhöhen, mithin die in §1 Abs. 3 (1) FPersV vorgeschriebenen 20 Minuten übertreffen. In der Spitze sind also zum Betrieb von Fahrplan 2 ebenfalls drei Fahrzeuge erforderlich. Für einen 18-stündigen Betrieb dieser Linie fallen hier zunächst zweimal jeweils zwei, also 4 neunstündige reguläre Dienste an, die bis auf ihre jeweils zwei unbezahlten Blockpausen

Fahrplan 1	Bus 1	Bus 2	Bus 3	Bus 1
A-Platz	<b>08:00</b>	08:20	08:40	<b>09:00</b>
B-Tor	<b>08:14</b>	08:34	08:54	<b>09:14</b>
B-Tor	<b>08:28</b>	08:48	09:08	<b>09:28</b>
A-Platz	<b>08:42</b>	09:02	09:22	<b>09:42</b>

Fahrplan 2	Bus 1	Bus 2	Bus 1	Bus 2
A-Platz	<b>08:00</b>	08:20	<b>08:40</b>	09:00
B-Tor	<b>08:14</b>	08:34	<b>08:54</b>	09:14
B-Tor	<b>08:21</b>	08:41	<b>09:01</b>	09:21
A-Platz	<b>08:35</b>	08:55	<b>09:15</b>	09:35

**Tabelle 1: Drei Fahrpläne für dieselbe Buslinie. Durch die Sechstelregelung verursacht Fahrplan 3 bei einem 18-stündigen Betrieb die geringste bezahlte Zeit.**

Fahrplan 3	Bus 1	Bus 2	Bus 1	Bus 2
A-Platz	<b>08:00</b>	08:20	<b>08:40</b>	09:00
B-Tor	<b>08:14</b>	08:34	<b>08:54</b>	09:14
B-Tor	<b>08:23</b>	08:43	<b>09:03</b>	09:23
A-Platz	<b>08:37</b>	08:57	<b>09:17</b>	09:37

etwa 8,5 Stunden bezahlte Zeit darstellen. Hinzu kommt für den Pausenwagen ein geteilter Dienst mit etwa 5 Stunden bezahlter Zeit. Insgesamt ergeben sich also etwa 39 Stunden bezahlte Zeit, teilweise in Form geteilter Dienste. Überdies fallen hier ggf. zusätzliche Leerkilometer für Fahrten des Pausenwagens zwischen Depot und Linienendpunkt an.

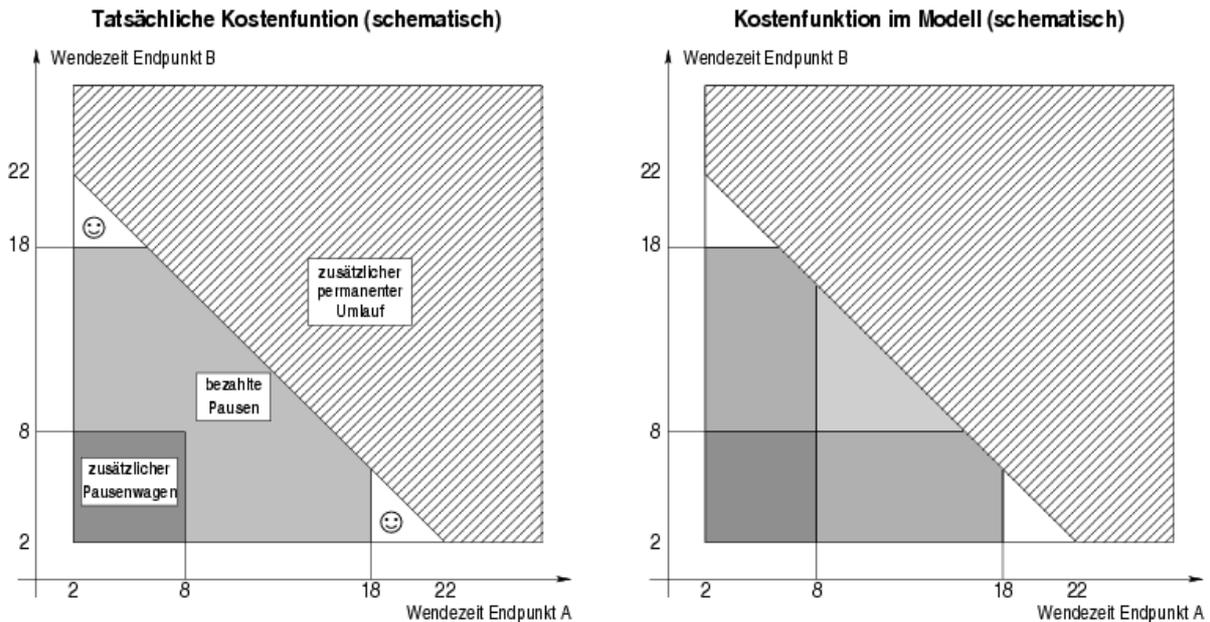
Eine passende tarifvertragliche Vereinbarung vorausgesetzt, ist die in Fahrplan 3 in B-Tor geplante Wendezeit voll für die in §1 Abs. 3 (2) FPersV ermöglichte „Sechstelregelung“ anrechenbar. Entsprechend sind über den gesamten Tag maximal zwei Fahrzeuge zeitgleich zum Betrieb dieser Linie erforderlich. Zwar sind die Wendezeiten stets bezahlte Zeit. Dennoch fallen bei einem 18-stündigen Betrieb dieser Linie in Fahrplan 3 nur 4 Dienste mit jeweils 9 Stunden bezahlter Zeit an, also 36 Stunden bezahlte Zeit.

Wohl bemerkt ist die Zahl der Nutzwagenkilometer in allen drei Fahrplänen gleich. Dass Fahrplan 1 für seinen Betrieb permanent drei Fahrzeuge erfordert, kann mit den bereits verbreiteten Methoden zur Taktfahrplanoptimierung zuverlässig erkannt, und somit in Optimierungsläufen gezielt vermieden werden. Jedoch erschließt sich der für die Dienstplangestaltung wichtige Unterschied zwischen Fahrplan 2 und Fahrplan 3 den bislang eingesetzten Verfahren zur Taktfahrplanoptimierung nicht – ca. 10 Prozent der Gesamtkosten sind in den bislang verwendeten Modellen und Verfahren zur Taktfahrplanoptimierung schlichtweg nicht erkennbar! Die entsprechende Erweiterung des Modells um diese rein fahrplanabhängige Kostenkomponente ist das Hauptanliegen dieses Beitrages.

Auf dem Weg zu diesem Ziel ist als erstes herauszuarbeiten, woran dienstplanfreundliche Taktfahrpläne erkennbar sind. Gemäß der obigen Analyse haben diese folgende Eigenschaften:

1. Es werden generell kurze Standzeiten für die Fahrzeuge eingeplant – ansonsten würden sogar zusätzliche Umläufe erforderlich, wie beispielsweise in Fahrplan 1.
2. Dort, wo gewisse Standzeiten unvermeidbar sind, wird versucht, diese derart in Wendezeiten zu bündeln, dass sie den Wert von acht Minuten übersteigen und somit für die Sechstelregelung anrechenbar werden (vgl. Fahrplan 3). Ansonsten würde wie in Fahrplan 2 der Einsatz zusätzlicher Pausenwagen erforderlich.

In Bild 2 ist der schematische Verlauf der tatsächlichen Kostenfunktion und der mit dem vorzustellenden Modell erreichbaren Kostenfunktion für eine Linie dargestellt. Ein Fahrplan für die betrachtete Linie ist durch ein Paar (A,B) seiner Wendezeiten in den beiden End-



**Bild 2:** Schematischer Verlauf der tatsächlichen Kostenfunktion (links) und der im Modell verwendeten Kostenfunktion (rechts) für eine Linie.

punkten der Linie charakterisiert und wird an dem entsprechenden Punkt in den Diagrammen lokalisiert. Fahrplan 2 aus Tabelle 1 entspricht also dem Punkt (5,7) und befindet sich damit in dem dunkelgrauen Bereich. Andere Fahrpläne derselben Linie können entweder das für die beiden Wendezeiten insgesamt verfügbare Gesamtbudget von 12 Minuten anders auf die beiden Endpunkte aufteilen oder aber einen zusätzlichen Umlauf erfordern.

Alle Fahrpläne, welche die Gesamtwendezeit bei 12 Minuten belassen, liegen auf der Geraden mit Steigung minus eins, die durch den Punkt (5,7) geht. Beispielsweise liegt Fahrplan 3 mit seinem Punkt (3,9) auf dieser Geraden. Alle Fahrpläne, die hingegen einen zusätzlichen Umlauf erfordern, liegen auf einer um den Betrag der Taktzeit verschobenen parallelen zweiten Geraden, beispielsweise Fahrplan 1 mit seinem Punkt (17,15).

In den schraffierten Flächen von Bild 2 liegen mithin die teuersten Fahrpläne. Für die anderen Flächen gilt: Je heller die Fläche, desto geringer die Kosten der in ihr liegenden Fahrpläne. Beispielsweise liegt Fahrplan 1 aus Tabelle 1 im schraffierten Bereich „zusätzlicher permanenter Umlauf“, Fahrplan 2 im Bereich „zusätzlicher Pausenwagen“ und Fahrplan 3 im Bereich „bezahlte Pausen“. Die „Smileys“ deuten an, dass in den entsprechenden Bereichen ein Pausenabzug vorgenommen werden kann („Blockpausen“), ohne dass dazu jedoch ein zusätzlicher Umlauf erforderlich wäre. Die entsprechenden Fahrpläne sind also sehr kostengünstig. Und da eine Mindestwendezeit von zwei Minuten unterstellt wird, werden kürzere Wendezeiten nicht betrachtet. Zu den sehr kostengünstigsten Fahrplänen sei noch angemerkt, dass sie nur für Linien existieren, auf denen es gilt, ein Gesamtbudget von mindestens 20 ( $18+2$ ), maximal jedoch 23 Minuten ( $2+2+20-1$ ) geschickt auf die beiden Endpunkte aufzuteilen.

Im verbleibenden Teil dieser Arbeit wird die in dem zu entwickelnden Modell angesetzte Kostenfunktion hergeleitet. Die gemeinsame Betrachtung von Fahrplanoptimierung und Dienstplangestaltung wird dabei in dem in der Taktfahrplanoptimierung etablierten Modell

vorgenommen. Daher wird dieses zunächst skizziert. Danach wird schließlich vorgeführt, wie in diesem Modell wesentliche Belange der Dienstplanung berücksichtigt werden können. Da bereits in früheren Arbeiten vorgestellt wurde, wie wichtige Aspekte der Linienplanung ebenfalls in diesem Modell abgebildet werden können, wird somit eine Brücke von der Linienplanung bis zur Dienstplanung geschlagen – mit der Fahrplanoptimierung als zentralem Bindeglied.

## 4 Mathematisches Optimierungsmodell

Als mathematisches Modell hat sich in der Taktfahrplanoptimierung das Periodic Event Scheduling Problem (PESP) von Serafini und Ukovich etabliert [13]. Dieses war auch die Grundlage der Optimierung des ersten Fahrplanes, der tatsächlich in Betrieb gegangen ist [2][3]. Der Vollständigkeit halber sei angemerkt, dass bereits in früheren Arbeiten verwandte Modelle untersucht wurden [14][15][16], insbesondere zur Optimierung der Versatzzeiten in festzeitgesteuerten Netzen von Lichtsignalanlagen des Individualverkehrs.

In einem Fahrplan gilt es, für alle vorgesehenen Fahrten die Ankunfts- und Abfahrtszeitpunkte in all ihren Stationen festzulegen. Da sich in einem Taktfahrplan beispielsweise alle 20 Minuten das gesamte Geschehen wiederholt, genügt es, für jedes Ankunfts- bzw. Abfahrtsereignis zu spezifizieren, zu welchem Zeitpunkt innerhalb der 20-minütigen Taktzeit es stattfinden soll.

Etwas formaler sei mit  $V$  die Menge aller Ankünfte und Abfahrten aller Linien in all ihren Stationen bezeichnet. Die Taktzeit beträgt  $T$ . Ein Taktfahrplan ist dann ein Vektor  $\pi$  aus  $[0, T)^V$ , wobei ohne Beschränkung der Allgemeinheit angenommen werden darf, dass  $\pi$  ganzzahlig ist. Selbstverständlich dürfen die Zeitpunkte der einzelnen Ereignisse nicht vollkommen unabhängig voneinander festgelegt werden. Vielmehr müssen gewisse Zeitdauern – also Differenzen von Ereigniszeitpunkten – in speziellen Zulässigkeitsintervallen liegen. Wenn beispielsweise ein Umstieg  $a$  von einem Ankunftsereignis  $i$  zu einem Abfahrtsereignis  $j$  mindestens  $\ell_a$  (Umsteigewegezeit) und höchstens  $u_a$  (Wartezeitbegrenzung) dauern soll, dann wird dies durch die folgende Nebenbedingung garantiert:

$$0 \leq (\pi_j - \pi_i - \ell_a) \bmod T \leq u_a - \ell_a.$$

Dabei wird das Zulässigkeitsintervall kurz mit  $[\ell_a, u_a]_T$  bezeichnet.

In dem entsprechenden Graphenmodell wird die Menge  $V$  üblicherweise als Knotenmenge interpretiert, und die Nebenbedingungen werden durch gerichtete Bögen  $A$  repräsentiert. Bögen modellieren also Zeitdauern zwischen zwei Ereignissen. Eine PESP-Instanz zu einer Taktzeit  $T$  besteht damit aus einem gerichteten Graphen  $D=(V,A)$ , sowie aus Vektoren  $\ell$  und  $u$ , welche die unteren und oberen Zeitschranken für die Zulässigkeitsintervalle der einzelnen gerichteten Bögen aus  $A$  definieren. Ein zulässiger Taktfahrplan  $\pi$  erfüllt schließlich alle Zulässigkeitsintervalle. Das Problem, für eine PESP-Instanz zu entscheiden, ob es einen zulässigen Taktfahrplan gibt, ist NP-vollständig [14][17].

Zum Lösen von PESP-Instanzen werden Techniken der Ganzzahligen Optimierung (auch: Integer Programming, IP) eingesetzt. Der Modulo-Operator ist jedoch nicht in der allgemeinen Syntax gemischt-ganzzahliger linearer Programme vorgesehen. Daher wird er durch Einführung geeigneter ganzzahliger Variablen aufgelöst. Eine zulässige Lösung einer

PESP-Instanz besteht dann neben einem Vektor  $\pi$  zusätzlich aus einem ganzzahligen Vektor  $p$  aus  $\mathbf{Z}^A$ , die zusammen

$$0 \leq (\pi_j - \pi_i - \ell_a) + T\rho_a \leq u_a - \ell_a$$

für alle Bögen  $a$  erfüllen. Der Wert  $(\pi_j - \pi_i - \ell_a) + T\rho_a$  entspricht dabei der effektiven Wartezeit des Bogens  $a$ .

Selbst wenn das PESP als reines Zulässigkeitsproblem verwendet wird, lässt sich eine hohe Qualität der Ergebnisfahrpläne für die Fahrgäste sicherstellen. Entlang von Bögen, die Umsteigevorgänge modellieren, wird dies beispielsweise durch die Wahl relativ kleiner oberer Schranken für die Zeitdauern der Umstiege erreicht. Hingegen haben Liebchen und Möhring [5] nachgewiesen, dass die ausschließliche Betrachtung fahrzeugminimaler Fahrpläne im reinen Zulässigkeitsproblem nicht garantiert werden kann, wenn die Möglichkeit der Ausdehnung von Haltezeiten besteht. Dies ist eine Hauptmotivation für die Betrachtung einer linearen Zielfunktion über dem PESP, wie sie im Folgenden vorgestellt wird.

## 5 Zielfunktionen

Eine weit verbreitete Zielfunktion in der Taktfahrplanoptimierung ist die Minimierung der gewichteten Summe effektiver Wartezeiten. Für Umsteigevorgänge liegt dies auf der Hand, ebenso für Haltevorgänge von mit Fahrgästen besetzten Fahrzeugen in Unterwegshalten. Das entsprechende gemischt-ganzzahlige lineare Programm lautet wie folgt:

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{a=(i,j) \in A} (\pi_j - \pi_i - \ell_a) + T\rho_a \\ \text{s.t.} \quad & 0 \leq (\pi_j - \pi_i - \ell_a) + T\rho_a \leq u_a - \ell_a \quad \text{für alle } a=(i,j) \text{ aus } A \\ & \rho_a \text{ ganzzahlig} \\ & \pi_i \text{ aus } [0, T] \end{aligned} \quad (\text{PESP-IP-}\pi\text{-}\rho)$$

Indem man sämtliche Zeitdauern bestraft, an denen Fahrzeuge beteiligt sind – also insbesondere Wendezeiten und Unterwegshalte – können obendrein gezielt solche Fahrpläne berechnet werden, die für ihren Betrieb nur wenige Fahrzeuge erfordern. Insbesondere wenn feste Zuordnungen zwischen Linien und Fahrzeugen bestehen, wird das sprungfixe Verhalten der realen Kostenfunktion des Fahrzeugeinsatzes in diesem Optimierungsmodell exakt abgebildet [7]. Doch auch bei a priori nicht festgelegten Linientauschen wird mit dieser Minimierung der (möglichen) Standzeiten in die richtige Richtung gearbeitet [18]. Insgesamt kann also mit PESP-IP- $\pi$ - $\rho$  eine gewichtete Summe aus Fahrgastwartezeit und Fahrzeugbedarf minimiert werden.

Innerhalb der Komplexitätsklasse NP-schwerer Optimierungsprobleme sind weitere Unterscheidungen zwischen relativ leichten und besonders schweren Problemen möglich. Solche Klassifizierungen orientieren sich an der Approximierbarkeit der Probleme. Unter den NP-schweren Optimierungsproblemen sind solche relativ gutartig, die ein so genanntes polynomielles Approximationsschema (PTAS) besitzen. Ein PTAS ist eine Familie von Algorithmen für das betrachtete Optimierungsproblem. Zu jeder vorgegebenen Approximationsgüte  $\epsilon$ , also Abweichung vom (unbekannten) Optimalwert, konstruiert dann ein Algorithmus eine Lösung mit der geforderten Approximationsgüte. Der Clou dabei: Die Laufzeit des Algorithmus ist zwar exponentiell im Kehrwert der Approximationsgüte, jedoch lediglich polynomial in der Größe des Inputs des eigentlichen Optimierungsproblems. In einem PTAS besteht also ein

klar quantifizierter Tradeoff zwischen Lösungsqualität und Rechenzeit. Für eine kompakte mathematische Beschreibung sei beispielsweise auf [19] verwiesen. Ein bekanntes kombinatorisches Optimierungsproblem, für das ein PTAS bekannt ist, ist das Rucksackproblem.

Für das als PESP-IP- $\pi$ - $p$  vorgestellte NP-schwere Optimierungsproblem wurde bislang keine unmittelbare weitere Klassifizierung in "relativ leicht" oder "besonders schwer" vorgenommen. Von dem reinen Zulässigkeitsproblem PESP kann aber auch noch ein anderes Optimierungsproblem abgeleitet werden, das sich gerade vor dem Hintergrund der Einbeziehung weiterer Anforderungen der Dienstplangestaltung als sehr praxisrelevant erweisen wird.

### **MAX-PESP**

Das folgende Optimierungsproblem wird mit MAX-PESP bezeichnet: Finde zu einer gegebenen PESP-Instanz einen Taktfahrplan  $\pi$ , der die Zulässigkeitsintervalle möglichst vieler Bögen erfüllt. Insbesondere ist *jeder* Taktfahrplan  $\pi$  formal zulässig. Die (Nicht-)Erfüllung einer PESP-Bedingung kommt vielmehr ausschließlich in der Zielfunktion zum Tragen. Die in MAX-PESP vorliegende Zielfunktion ist beispielsweise dann unmittelbar sinnvoll, wenn für möglichst viele Umsteigerelationen eine sehr kleine maximale Umsteigewartezeit von, sagen wir, fünf Minuten garantiert werden soll, vgl. [2].

Liebchen hat in [3] gezeigt, dass MAX-PESP das Problem des Findens eines maximalen  $K$ -färbbaren Teilgraphen verallgemeinert. Mithin gehört MAX-PESP zu den MAXSNP-schweren Optimierungsproblemen. Von diesen ist bekannt, dass sie kein PTAS besitzen können – es sei denn, „P=NP“. Dies wird zwar allgemein bezweifelt. Doch ein Beweis dieser zentralen Vermutung in der Kombinatorischen Optimierung steht seit mittlerweile mehr als 35 Jahren aus. In anderen Worten gehört MAX-PESP also zu den ganz besonders schweren Optimierungsproblemen. In [3] wurde überdies ein Approximationsalgorithmus angegeben, dessen Ergebnisfahrpläne stets eine garantierte Zahl von Nebenbedingungen erfüllen. Ein in empirischen Rechnungen noch besser abschneidendes Verfahren wird in Kapitel 7 skizziert und auch auf das zu untersuchende Beispielnetz angewendet.

Die Zielfunktion aus MAX-PESP lässt sich erfreulicherweise sogar in der in dem IP-Modell PESP-IP- $\pi$ - $p$  verwendeten linearen Zielfunktion exakt simulieren, siehe hierzu auch den Beitrag [2] des Autors auf der HEUREKA '05. Wichtige Eigenschaften dieses Vorgehens sind zum einen, dass formal jeder Vektor  $\pi$  aus  $[0, T]^V$  zulässig bleibt. Und wenn ein Vektor  $\pi$  die eigentlich für einen Bogen formulierte Anforderung  $[\ell_a, u_a]_T$  nicht erfüllt, schlägt ein konstant großer Indikator in der Zielfunktion zu Buche. Technisch wird dabei ein Paar antiparalleler Bögen konstruiert, das auch als „Softconstraint“ bezeichnet wird. Für diese wird hier anstelle des Begriffs „Zulässigkeitsintervall“ vielmehr der Begriff „Zielintervall“ verwendet.

### **Dienste**

Die Zielfunktion in MAX-PESP kann auch zur Erreichung von Zielen der Dienstplangestaltung genutzt werden. Ob eine Wendezeit für die Sechstelregelung anrechenbar ist, ist nämlich eine entweder-oder Entscheidung: Entweder, die Wendezeit beträgt mindestens acht Minuten und ist somit voll für die Sechstelregelung voll anrechenbar, oder sie ist überhaupt nicht anrechenbar. Analoges gilt für Blockpausen: Wenn eine planmäßige Wendezeit einen gewissen Schwellwert übersteigt – in Bild 2 sind dies 18 Minuten – dann ist der Großteil der Wendezeit geeignet, eine unbezahlte Pausenzeit darzustellen. Hingegen stellen Wendezeiten, die diesen Schwellwert nicht erreichen, immer durchgehend bezahlte Arbeitszeit dar.

Entsprechend werden als Ergebnis der Dienstplanoptimierung besonders dann sehr effiziente Dienstpläne stehen, wenn im Fahrplan viele Wendezeiten mit mindestens 8 Minuten bzw. sogar 18 Minuten eingeplant sind, vgl. Fahrplan 2 und Fahrplan 3. Die Bevorzugung von Wendezeiten, die bestimmte Schwellwerte übersteigen, darf jedoch nicht – wie in Fahrplan 1 geschehen – auf Kosten des Einsatzes zusätzlicher Fahrzeuge geschehen. Daher ist eine Kombination der beiden für das PESP vorgestellten Zielfunktionen geboten: die lineare Zielfunktion aus PESP-IP- $\pi$ - $p$  modelliert das sprungfixe Verhalten der Kostenfunktion des Fahrzeugeinsatzes, und die Zielfunktion aus MAX-PESP begünstigt für die Sechstelregelung anrechenbare Wendezeiten.

Für die in Tabelle 1 betrachtete Linie werden also für den Wendevorgang in B-Tor die folgenden Softconstraints eingeführt. Sei  $i$  das Ankunftsereignis der aus A-Platz ankommenden Fahrten und  $j$  das Abfahrtsereignis der in Richtung A-Platz abfahrenden Fahrten. Die Nicht-Anrechenbarkeit einer Wendezeit für die Sechstelregelung wird mit einer Softconstraint  $a=(i, j)$  mit Zielintervall  $[8, 21]_{20}$  modelliert. Die fehlende Möglichkeit der Definition einer unbezahlten Pause modelliert eine zu dem Bogen  $a$  parallel verlaufende Softconstraint mit Zielintervall  $[18, 21]_{20}$ . In dem eigentlichen Optimierungsmodell PESP-IP- $\pi$ - $p$  übersetzt sich jede Softconstraint entsprechend in ein Paar antiparalleler Bögen. Da alle drei für diese Linie betrachteten Fahrpläne in B-Tor Wendezeiten von weniger als 18 Minuten vorsehen, greift der Strafterm der zweiten Softconstraint bei allen drei Plänen. Im Gegensatz dazu kommt der Strafterm der ersten Softconstraint nur in Fahrplan 2 zum Tragen und legt somit den oben identifizierten tatsächlichen Kostenunterschied zwischen Fahrplan 2 und Fahrplan 3 auch im Modell offen.

Die genaue Gewichtung der Kostenfunktionen zueinander ist letztlich für jedes Verkehrsunternehmen individuell vorzunehmen. Die gewählten Koeffizienten für zusätzliche permanente Umläufe (PESP-IP- $\pi$ - $p$ ), für ein Unterschreiten des Schwellwertes für unbezahlte Blockpausen (MAX-PESP), sowie für ein Unterschreiten des für die Sechstelregelung entscheidenden Schwellwertes von 8 Minuten müssen jedoch stets das in Bild 2 (rechts) skizzierte qualitative Verhalten der Kostenfunktion sicherstellen. Zusammengefasst wird dann mit dem hier vorgestellten Modell in der Fahrplanoptimierung die folgende Strategie für die Definition der Wendezeiten umgesetzt:

- Wenn unbezahlte Blockpausen ohne einen zusätzlichen permanenten Umlauf möglich sind, dann sind diese zu bevorzugen.
- Ansonsten gilt: Wenn die Sechstelregelung ohne den Einsatz eines zusätzlichen Umlaufs eingehalten werden kann, dann ist die Sechstelregelung anzustreben.
- Falls auch dies nicht geht, dann sind generell knappe Wendezeiten einzuplanen, und die Pausenzeiten werden voraussichtlich durch vorübergehend einzusetzende zusätzliche Pausenwagen eingehalten.

Es sei angemerkt, dass es sich bei dem hier vorgeschlagenen Vorgehen um rein lokale Vorgaben für die einzelnen Wendezeiten handelt, die überdies nur in einer abstrakten Taktzeit  $T$  gemessen werden. Grundsätzlich wäre es darüber hinaus eigentlich wünschenswert, Dienste in ihrer vollen Länge von 8-9 Stunden zu verfolgen, auch um beispielsweise zu erkennen, ab wann kein weiterer Pausenabzug mehr vorgenommen werden darf. Die in Kapitel 8 zu skizzierenden detaillierten Analysen in der Dienstplanung werden jedoch nahe legen, dass dieses Vorgehen keine unzulässige Vereinfachung darstellt.

An dieser Stelle ist es wichtig, in Erinnerung zu rufen, dass Dienstplanungsaspekte nur *eine* Facette der zahlreichen Anforderungen an Taktfahrpläne bilden – wenngleich eine sehr wichtige, da unmittelbar kostenwirksame. Vor diesem Hintergrund ist es ein entscheidendes Feature des soeben vorgestellten Modells zur Integration von Fahr-, Umlauf- und Dienstplanung, dass sämtliche weitere Ziele der Fahrplanoptimierung akkurat berücksichtigt bleiben! Die wichtigsten dieser Ziele sind betriebliche Fahrbarkeit (z.B. eingleisige Strecken im Schienenverkehr) und kurze Fahrgastwartezeiten beim Umsteigen, in den Fahrzeugen, sowie an der Starthaltestelle. Die geeignete Gewichtung dieser zahlreichen und im Allgemeinen gegenläufigen Ziele bleibt dabei eine wahre Herkulesaufgabe für das Management eines jeden Verkehrsunternehmens. Denn letztlich wird mit dieser nicht weniger beantwortet als die „Gretchenfrage in der Verkehrsplanung“:

*Was kostet eine Fahrgastwarteminute?*

Liebchen und Möhring haben in [5] vorgestellt, wie im PESP zusätzlich Entscheidungen der Linienplanung noch im Schritt der Fahrplanoptimierung nachträglich korrigiert werden können, wenn dies über alle Planungsschritte betrachtet zu besseren Lösungen führt. Einen Überblick über dieses Vorgehen liefert das folgende Kapitel. In diesem Sinne ist man mit dem PESP nunmehr in der Lage, auch wichtige Entscheidungen der Linienplanung in einem für die Fahrplan-, Umlauf- und Dienstplanoptimierung geeigneten Modell integriert zu optimieren.

## **6 Linientausche**

In sehr vielen Verkehrsnetzen wird von der Technologie der Linienbündelung Gebrauch gemacht. Wenn auf Außenästen des Netzes eine geringe Bedienungshäufigkeit genügt, in dessen Zentrum jedoch eine hohe Fahrtendichte erforderlich ist, dann werden mehrere Linien parallel auf denselben Strecken durch das Zentrum geführt. Eine geeignete Vertaktung vorausgesetzt wird auf diese Weise bereits bei nur zwei parallel verkehrenden Linien der maximale Abstand zwischen zwei Fahrten halbiert. Bei zufällig gleichverteiltem Eintreffen der Fahrgäste an ihrer Starthaltestelle im zentralen Bereich verringert sich die erwartete Startwartezeit sogar noch stärker.

In einer solchen Situation stellt sich auf natürliche Weise die Frage, welche Außenäste, bzw. Liniensegmente, als direkte Linien miteinander zu verbinden sind. Als Ergebnis der Linienplanung steht insbesondere stets eine solche Zuordnung fest. Mit den von Liebchen und Möhring [5] identifizierten Modellierungsmöglichkeiten des PESP können solche Entscheidungen sogar noch während der Fahrplankonstruktion nachträglich korrigiert werden, wenn dies über alle Planungsschritte betrachtet Verbesserungen ermöglicht.

Da im PESP bislang keine Routenwahl der Fahrgäste vorgesehen ist, ist die Frage berechtigt, ob ein solcher nachträglicher Eingriff in den Linienplan im Endeffekt womöglich mehr schadet als nützt. Wird beispielsweise bei Kappung einer Direktverbindung zahlreichen Fahrgästen ein zusätzlicher Umstieg zugemutet, nur damit (voraussichtlich) ein Dienst eingespart wird?

Auch derartige Fragen sind grundsätzlich individuell für jedes Verkehrsnetz zu beantworten. Es wird sich jedoch häufig herausstellen, dass in der betrachteten Situation tendenziell wenige Fahrgäste zwischen zwei Außenästen reisen und vielmehr das Gros Quelle und/oder



der Ankunft bis zur Abfahrt entweder genau null, oder aber zwischen 7 und 13 Minuten vergehen. Letztere entsprechen wiederum der unterstellten Mindestzugfolgezeit.

Das soeben skizzierte Vorgehen lässt aber leider noch einen kleinen Aspekt unberücksichtigt. So, wie bislang beschrieben, erfolgen die Zuordnungen in Richtung und Gegenrichtung unabhängig voneinander. Dies könnte schlimmstenfalls dazu führen, dass für beide Richtungen unterschiedliche Durchbindungen ausgewählt würden. Dann wäre aber der resultierende gerichtete Linienplan nicht mehr in der allgemein gewohnten Weise als ungerichteter Graph visualisierbar – ein ganz klares k.o.-Kriterium für einen Linienplan.

Als Ausweg wurde in [5] zunächst vorgeschlagen, durch Symmetrie des zu berechnenden Fahrplanes [11] implizit auch Symmetrie für den resultierenden Linienplan zu garantieren. Erste Rechnungen mit diesem Modell hat Schmidt [20] für ein Teilnetz der S-Bahn Berlin GmbH angestellt. Später wurde in [21] ein Ansatz vorgeschlagen, bei dem durch zusätzliche Bedingungen an die ganzzahligen Variablen  $p_a$  die Symmetrie des Linienplanes gesichert werden kann, ohne dass man sich auf symmetrische Fahrpläne einzuschränken hätte. Entsprechende Optimierungsläufe wurden für die Kopenhagener S-Bahn vorgenommen.

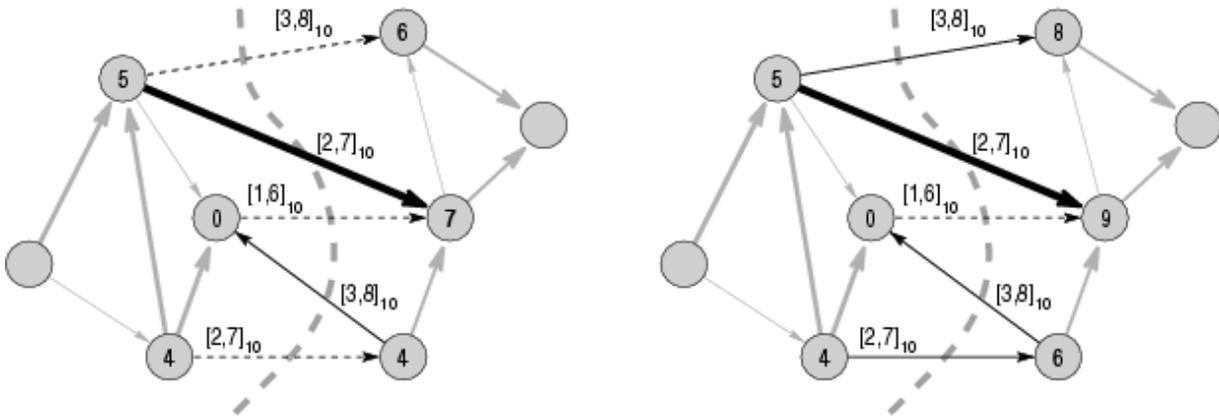
## 7 Algorithmen

Die hier vorzustellende Schnittheuristik für MAX-PESP wurde vom Autor in [3] eingeführt. Es gibt verschiedene zur Schnittheuristik verwandte Verfahren, beispielsweise den Netzwerk-Simplex Algorithmus oder die in [16] und [22] untersuchten Verfahren.

Die Schnittheuristik basiert auf zwei einfachen Eigenschaften des PESP: Erstens kann für jeden kreisfreien Teilgraphen leicht eine zulässige Lösung konstruiert werden. Zweitens gilt, dass eine identische Verschiebung auf die  $\pi$ -Werte einer Teilmenge der Knoten die Zeitdauern auf zwischen diesen Knoten verlaufenden Kanten nicht ändert. Insbesondere bleiben auf diesen Kanten (Un-) Zulässigkeit und ggf. Zielfunktionswert erhalten.

In der Schnittheuristik wird folgendermaßen vorgegangen. Im Preprocessing wird zuerst ein aufspannender Baum  $F$  in dem Digraphen  $D=(V,A)$  konstruiert. Der Digraph darf im PESP o.B.d.A. als zweifach zusammenhängend angenommen werden. Der erste Knotenvektor  $\pi$  wird derart berechnet, dass er für alle Baumkanten zulässig ist. Im eigentlichen Verfahren wird dann über die Baumkanten iteriert. Sei dabei  $a$  der aktuelle Bogen. Dieser wird vorübergehend aus  $D$  entfernt. Durch den so entstehenden Fundamentalschnitt zerfällt die Knotenmenge in zwei Zusammenhangskomponenten  $S$  und  $V \setminus S$ . Auf die  $\pi$ -Werte aller Knoten in  $S$  wird nun simultan derselbe Wert addiert, und zwar derart, dass der so modifizierte Vektor  $\pi$  für möglichst viele Bögen, die zwischen  $S$  und  $V \setminus S$  verlaufen, zulässig wird bzw. bleibt.

Im Folgenden wird die Schnittheuristik exemplarisch auf die in Bild 5 skizzierte PESP-Instanz angewendet. Die **fett** gezeichneten Bögen bilden den aufspannenden Baum  $F$ . Und die in den Knoten des linken Bildes verzeichneten Werte sind die aktuellen  $\pi$ -Werte. Der Fundamentalschnitt wird durch die geschwungene gestrichelte Linie symbolisiert und enthält fünf Bögen. Der aktuelle Vektor  $\pi$  verletzt drei dieser Bögen, nämlich die gestrichelten. In der hier betrachteten Iteration der Schnittheuristik wird auf die aktuellen  $\pi$ -Werte der rechten Knotenmenge einheitlich der Wert zwei addiert. Der auf diese Weise gewonnene Vektor  $\pi$  verletzt nur noch einen einzigen Bogen des betrachteten Fundamentalschnittes. Und für die komplett links oder rechts des Fundamentalschnittes verlaufenden Bögen ändert sich ohnehin nichts.



**Bild 4:** Eine Iteration der Schnittheuristik

Für praktische Rechnungen ist es zweckmäßig, zwischen stets einzuhaltenden sicherheitsrelevanten Anforderungen einerseits, und Wünschen bzgl. Angebotsqualität oder Kosteneffizienz andererseits zu unterscheiden. Eine Gewichtung der einzelnen Kanten ist für diesen Zweck bereits ausreichend. Dann konstruiert die Schnittheuristik meist einen Fahrplan, der fast die maximale Anzahl simultan erfüllbarer Bögen erreicht. Bezüglich der dienstplanfreundlichen Fahrplanoptimierung bedeutet dies beispielsweise, dass die Mehrzahl der Wendezeiten die für die Sechstelregelung erforderliche Dauer von mindestens acht Minuten aufweist. Dennoch wird in [3] eine über dem Kreisgraphen  $C_4$  definierte PESP-Instanz angegeben, für die die Schnittheuristik nicht vermag, die eindeutige Optimallösung zu treffen.

Für das in der vorliegenden Arbeit behandelte Netz des ViP werden sich jedoch bereits Standardmethoden der ganzzahligen Optimierung für PESP-IP- $\pi$ - $p$  als ausreichend leistungsfähig erweisen. Auf dieses Netz bezogen verstehen sich die vorzustellenden Ergebnisse der Schnittheuristik also eher als Benchmark dafür, welche Qualität bereits nach sehr kurzer Rechenzeit erzielt werden kann. Damit verbunden ist die Aussicht, dass auch für deutlich größere Netze insbesondere vor dem Hintergrund der Erstellung dienstplanfreundlicher Taktfahrpläne mit der Schnittheuristik schnell sehr gute Lösungen generiert werden können, die auch als geeignete Startlösungen für lokale Suchverfahren dienen dürften.

## 8 Verkehrsbetrieb in Potsdam

Der Verkehrsbetrieb in Potsdam (ViP) betreibt 15 Tram- und Buslinien in der Brandenburgischen Landeshauptstadt. Seit der Neugestaltung des Liniennetzes im Mai 2006 steuern alle Tramlinien den Hauptbahnhof an, mit nur einer Ausnahme. Diese Netztopologie ist ausdrücklich von den Stadtverordneten erwünscht. Des weiteren ist der Verlauf zweier Linien (92 und 96) auf der Hauptachse Kirchsteigfeld-Hauptbahnhof-Fachhochschule ebenfalls gesetzt. Daher sind die aktuell für Linienänderungen im Tramnetz bestehenden Möglichkeiten sehr begrenzt. Einzig wäre ein Tausch der Süd- und Nordsegmente zweier Linien zumindest theoretisch vorstellbar (99 und X98). Im Süden nutzen zwar beide Linien dieselbe Strecke, jedoch mit unterschiedlichen Haltemustern (Expresslinie). Diese Möglichkeit des Tausches des Expresssegmentes wird in dem hier vorgestellten Optimierungsmodell vorgesehen.

Innerhalb des Busnetzes verkehren keine zwei Linien gemeinsam über einen längeren Abschnitt. Daher bestehen hier leider keine Ansatzpunkte für die in Kapitel 6 vorgestellten

Methoden zur nachträglichen Korrektur von Entscheidungen der Linienplanung. Und die Neuordnung von Liniensegmenten an reinen Kreuzungspunkten verbietet sich, solange kein PESP-basiertes (lineares) Modell die Routenwahl der Fahrgäste unterstützt.

Der Fahrplan hat in Potsdam eine besonders klare Struktur. Jede Linie verkehrt im 20-Minutentakt. Und die Minutenpläne werden über den gesamten Betriebszeitraum<sup>3</sup> ohne Änderungen beibehalten. Die wichtigsten Linien haben einen Betriebszeitraum von 04:00h bis ca. 01:00h. Die anderen Linien verkehren entweder von ca. 05:30h bis gegen 19:00h, oder aber nur zur Hauptverkehrszeit. Hinzu kommen noch etwa fünf einzelne Schülerfahrten kurz vor 08:00h, die in ihrer Linienführung zum Teil von den regulären Linien abweichen.

Die Gültigkeit der Minutenpläne über den gesamten Betriebszeitraum hat eine weit reichende Konsequenz für die Fahrplankonstruktion. Es steht in Potsdam – wie auch in den meisten anderen Nahverkehrsnetzen – außer Frage, während der Hauptverkehrszeiten planmässig lange Haltezeiten einzuplanen, um etwaige Anschlüsse zu gewähren. Die Unveränderbarkeit der Minutenpläne im Tagesverlauf impliziert aber, dass auch abends, wenn nur noch ausgewählte Linien verkehren, keine Haltezeiten zur Anschlussgewährung eingeplant werden.

Auch in der Umlaufplanung sind beim ViP spezielle Belange zu beachten. Insgesamt fünf Linien werden als so genannte „Touristische Linien“ vermarktet. Für jede dieser Linien ist ein Fahrzeug mit der passenden Vollwerbung lackiert. Und dieses kann natürlich nur sinnvoll auf „seiner“ Linie eingesetzt werden. Entsprechend besteht für diese fünf Linien nicht die Möglichkeit, ihre Umläufe mit denen anderer Linien zu koppeln. Innerhalb des Bussystems ergeben sich wegen Vorgaben des Fahrzeugtyps (Gelenkbus bzw. Standardbus) oder wegen entlegener Endpunkte feste Linienbindungen für *alle* Linien. Letztlich dürfen nur vier Linien des Tramnetzes (91, 94, 99, X98) linienübergreifende Umläufe aufweisen. Als Richtschnur für die betriebliche Stabilität der Umläufe wird der seit Rüger [15] etablierten Vorgabe, die Wendezeit solle mindestens ein Sechstel der Fahrzeit im Umlauf ausmachen, gefolgt.

In der Dienstplanung wird im ViP grundsätzlich so verfahren, dass die Fahrer ihre Pausen auf den Fahrzeugen nehmen, vgl. Kapitel 3. Daher kommt den im Rahmen der Fahrplanoptimierung definierten Wendezeiten in der Tat eine sehr große Bedeutung zu. Im Grunde entscheidet sich bereits in der Fahrplanung, ob eine Linie im Tagesverlauf vorübergehend zusätzliche Pausenwagen erfordert, wenigstens die Sechstelregelung anwendbar ist, oder ob vielmehr sogar unbezahlte Pausenzeiten festgelegt werden können. Eine solche aggregierte Sicht auf die Dienstplanung mag eher ungewohnt erscheinen, wird doch nur eine abstrakte Taktzeit von 20 Minuten betrachtet und nicht einmal alle Fahrten berücksichtigt (Schülerfahrten). Es ist jedoch gerade ein weiteres Anliegen dieser Arbeit, ein solches leicht vergrößertes Vorgehen zu rechtfertigen. Für die in dem 20-Minutenraster der Fahrplanoptimierung messbaren Zielfunktionswerte potenziell interessanter Fahrpläne wird sich nämlich herausstellen, dass sie sich im Einklang mit den Werten detaillierter Analysen zur Dienstplanung bewegen, wie sie beispielsweise mit Microbus vorgenommen werden können.

Neben den bis hier genannten strukturellen Eigenschaften des Netzes gibt es weitere Anforderungen an die Fahrplanoptimierung. Zu nennen seien beispielsweise Besonderheiten an einzelnen Linienendpunkten. Einzelne Linien verkehren nämlich an einem Ende als Ringlinie, so dass die entsprechende „Wendezeit“ zwischen einer und drei Minuten betragen

---

<sup>3</sup> Stand bei Projektbeginn im Oktober 2006

muss. Ansonsten würde den im Fahrzeug verbleibenden Fahrgästen ein unverhältnismäßig großer Zeitverlust zugemutet. Im Tramnetz sind auf fast allen Strecken Mindestabstandszeiten von zwei Minuten einzuhalten. Zusätzlich zur bereits erwähnten Hauptachse werden auf vier weiteren Streckenabschnitten die Fahrten jeweils zweier parallel verkehrender Linien derart koordiniert, dass der Maximalabstand zweier Fahrten 13 Minuten (von 20 möglichen) Minuten nicht überschreitet – in Einzelfällen ist sogar ein exakter 10-Minutentakt einzuhalten. Schließlich sind noch ausgewählte und vor allem im Spätverkehr nach 21 Uhr relevante Anschlüsse von und zu S- und Regionalbahnlinien einzuplanen.

Bezüglich der mehreren hundert weiteren Umsteigeverbindungen sah das ursprüngliche Vorhaben eigentlich vor, die über alle Fahrgäste gemessene Gesamtwarezeit im Netz zu minimieren. Leider lag jedoch für das erst fünf Monate vor Projektbeginn neu geordnete Linienetz noch keine ausgewertete Fahrgasterhebung vor. Und mit der Übertragung der Ergebnisse früherer Erhebungen auf das bestehende Netz wurde keine verlässliche Qualität erzielt. Die Analyse der Fahrgastattraktivität der berechneten Fahrpläne ist mithin leider nur eingeschränkt aussagekräftig, da die im Optimierungsmodell verwendbaren quantifizierten Ziele von den von Planern in Einzelfällen herangezogenen qualitativen Bewertungen abweichen können. Dies ist jedoch ausdrücklich ein Datenproblem. Bei Definition klarer Bewertungsmaßstäbe für den Fahrgastnutzen sind derartige Diskrepanzen ausgeschlossen.

Auf der Kostenseite darf hier keine tiefer gehende Analyse als in Kapitel 5 unter „Dienste“ grob beschrieben erfolgen. Dies wäre nicht mit der Klausel zur Verschwiegenheit vereinbar, an die die TU Berlin mit Annahme des Auftrages gebunden ist. Es sei lediglich ergänzend angemerkt, dass ungünstige Wendezeiten dann mit einem größeren Gewicht bestraft werden, wenn sie auf Linien vorliegen, welche den gesamten Tag über verkehren.

## Rechenläufe

Der von Redundanzen befreite Graph besitzt noch 65 Knoten und gut 300 Bögen, von denen die meisten für die Zielfunktion relevant sind und sehr große Zulässigkeitsintervalle aufweisen, d.h.  $u_a - l_a \geq 14$ . Die eigentlichen Optimierungsläufe wurden mit PESP-IP- $\pi$ - $p$  vorgenommen, unter Zuhilfenahme von Softconstraints zur Einbeziehung von MAX-PESP Anforderungen, siehe Kapitel 4 und 5. Die hier zunächst zu skizzierenden praktischen Ergebnisse der Schnittheuristik dienen primär der Illustration ihrer allgemeinen Qualität. Diese motiviert insbesondere einen zukünftigen Einsatz auch für deutlich größere Netze, idealerweise im Zusammenspiel mit auf ihren Ergebnissen aufsetzenden lokalen Suchverfahren.

Für den Initialisierungsschritt der Schnittheuristik wurden in dem resultierenden PESP-Graphen nacheinander verschiedene aufspannende Bäume berechnet. Zu diesen wurden jeweils Fahrpläne konstruiert, die zunächst sämtliche Nichtbaumkanten außer Acht lassen müssen. Wenig überraschend gelang es keinem dieser Pläne, sämtliche sicherheitsrelevanten Anforderungen zu erfüllen. Vielmehr wurden stets mindestens vier dieser Bögen verletzt. Zusätzlich wurden jeweils mindestens 11 Softconstraints nicht erfüllt, die auf koordinierte Abfahrten zur Taktverdichtung oder dienstplanungsfreundliche Wendezeiten abzielen.

Die Schnittheuristik benötigt für das Netz des ViP weniger als eine Sekunde CPU-Zeit. Nach ihrer Anwendung wurde nur noch eine sicherheitsrelevante Anforderung in dem resultierenden Fahrplan verletzt. Von den Softconstraints gelang es hier bei nur noch neun nicht, sie zu erfüllen. Nach einmaliger lokaler Verbesserung [3][7] eines dieser Fahrpläne – ebenfalls

unter eine Sekunde Rechenzeit – wurden sogar *alle* sicherheitsrelevanten Anforderungen erfüllt, und nur noch sechs weitere gewünschte Anforderungen wurden nicht erfüllt.

Die Güte dieses von der Schnittheuristik erzielten Wertes offenbart sich erst nach einem Vergleich mit dem Optimalwert in MAX-PESP vollständig: Besser geht es nämlich nicht! Die sechs nicht erfüllten PESP-Bedingungen zielen allesamt auf einen unbezahlten Pausenabzug ab. Entsprechend liegen hier sehr enge Zulässigkeitsintervalle vor:  $[18, 21]_{20}$  vor. Analog zu der Diskussion von Bild 2 ergibt sich hier, dass ein Pausenabzug an *beiden* Endpunkten einer Linie nur dann möglich ist, wenn die betrachtete Linie spezielle Fahrzeiten aufweist: Das auf beide Endpunkte aufzuteilende Gesamtbudget der Wendezeit muss nämlich zwischen 36 und 42 Minuten liegen können. Dass damit unmittelbar ein zusätzlicher permanenter Umlauf erforderlich würde, ist an dieser Stelle hingegen nicht im Fokus der Betrachtung.

Die Lösung des eigentlichen Optimierungsproblems, in dem insbesondere die Aspekte Linientausch 99/X98, betriebliche Fahrbarkeit, Umsteigezeitminimierung, Fahrzeugminimierung und dienstplanungsfreundliche Wendezeiten gleichzeitig Berücksichtigung finden, wird mittels PESP-IP- $\pi$ - $p$  vorgenommen. Für die Berechnungen wurde CPLEX 10.1 auf einem Intel Pentium 4 (3.2 GHz) mit 1GB RAM Arbeitsspeicher eingesetzt. Für dieses auf dem Netz von ViP betrachtete Szenario benötigt der beste Optimierungslauf weniger als 5 Minuten CPU-Zeit. In diesem Lauf hat sich das Aktivieren von „strong branching“ als besonders förderlich erwiesen – unter Default-Einstellungen werden zum Lösen mehr als 55 Minuten benötigt. Übrigens: der am Ende des fünfminütigen Optimierungslaufes stehende Fahrplan wurde bereits nach weniger als einer halben Minute gefunden.

In dem mit diesem IP konstruierten optimalen Fahrplan wird sogar ein Umlauf weniger während der morgendlichen Verkehrsspitze benötigt, als in dem Referenzfahrplan vom September 2006. Der optimale Fahrplan hat insbesondere von der Möglichkeit Gebrauch gemacht, die südlichen Segmente der Linien 99/X98 neu zu ordnen, also das Expressegment den Zügen der Linie 99 zuzuschlagen. Auch gelang es mit diesem Plan, Potenzial für zusätzliche Verbesserungen für die Fahrgäste aufzuzeigen. Als Ergebnis interner Diskussionen stand schließlich fest, dass diese Variante *nicht* weiter zu verfolgen war. Hierbei hat folgende Überlegung eine Rolle gespielt. Das südliche Segment der Linie 99 wird an jedem Schultag gut zwei Stunden länger bedient, als das Expressegment der Linie X98. Würde nun das Expressegment der Linie 99 zugeordnet, so entfielen an den vom Expressegment ausgelassenen Haltestellen acht Halte pro Tag, ca. 6% der täglichen Halte dort.

Unter der Vorgabe, dass das seit Mai 2006 gültige Liniennetz nicht modifiziert werden darf, konnte schließlich nachgewiesen werden, dass der IST-Fahrplan in puncto betrieblicher Effizienz bestmöglich ist (Oktober 2006). Aufgrund der leider nur eingeschränkt aussagekräftigen Eingangsdaten der Reisendenströme ist ein tiefer gehender Vergleich des IST-Fahrplanes mit anderen kostenoptimalen Fahrplänen müßig.

Das eigentlich wichtigste Ergebnis der vorgenommenen Berechnungen ist jedoch das folgende: Der in den beiden Teilen von Bild 2 dargestellte Unterschied zwischen der tatsächlichen Kostenfunktion und der im PESP realisierten Kostenfunktion ist vernachlässigbar. Auch die Schülerfahrten stellen die netzweite Qualität von Minutenplänen nicht auf den Kopf. Vielmehr sind die im PESP ermittelten Zielfunktionswerte de facto rankingkompatibel mit einer detaillierten Kostenanalyse, wie sie beispielsweise mit der integrierten Umlauf- und Dienstplanung in Microbus oder PTV Interplan objektiv vorgenommen werden kann [23].

## 9 Zusammenfassung

In den Kapiteln 4 und 5 wurde ein Optimierungsmodell vorgestellt, welches dazu geeignet ist, für die Dienstplanung sehr geeignete Fahrpläne zu konstruieren, ohne dabei jedoch andere der Fahrplanung ureigenste Ziele wie beispielsweise die Angebotsqualität aus dem Visier zu verlieren. Diese Aussage stützt sich auf detaillierte Analysen zur Dienstplanung, wie sie von den Experten unseres Praxispartners Verkehrsbetrieb in Potsdam vorgenommen wurden. Insbesondere haben weder die einzelnen zusätzlichen Schülerfahrten noch die rein lokale Betrachtung der Wendezeiten die generellen Eigenschaften der Minutenpläne konkateriert. Mit der in Kapitel 6 vorgestellten Erweiterung dieses Modells ist es obendrein möglich, bestimmte zuvor in der Linienplanung gefällte Entscheidungen im Nachhinein zu korrigieren, wenn dies über alle Planungsschritte betrachtet Verbesserungen ermöglicht.

Die Integration einer vollwertigen Linienplanung mit einer vollwertigen Fahrplanoptimierung steht jedoch weiterhin aus. Neben dem hier vorgestellten Optimierungsmodell könnte auch das jüngst in [8] vorgestellte heuristische Verfahren einen Schritt auf dem Weg zur Erreichung dieses eigentlichen Zieles darstellen. Dennoch sei daran erinnert, dass Integration kein Selbstzweck ist. Ihr eigentlicher Nutzen besteht darin, in frühen Planungsschritten verlässliche Kosten- und Qualitätswerte für die nachgelagerten Planungsschritte zu liefern.

### Checkliste

Das hier vorgestellte Optimierungsmodell und -verfahren ist besonders geeignet für Netze mit den folgenden Charakteristika:

- Damit Pausenregeln überhaupt für die Fahrplanoptimierung relevant werden, muss...
  - ... ein hinreichend langer Gültigkeitszeitraum der betrachteten Zeitscheibe vorliegen – beispielsweise mindestens acht Stunden – und
  - ... Pausen müssen im Regelfall auf den Fahrzeugen gewährt werden. Ansonsten wäre die Dienstplanung unabhängig von der Fahrplanoptimierung zu betrachten (vgl. Rüger [15]) und die vom Autor bereits in [2][3] erfolgreich eingesetzten Verfahren fänden unmittelbar Anwendung.
- Optimierungspotenzial darf besonders dann erhofft werden, wenn das Verkehrsunternehmen mit seinem aktuellen Fahrplan einzelne „Kröten“ schluckt. Diese können sich auf die Angebotsqualität und/oder auf die Kosteneffizienz beziehen. Wenn ein Verkehrsunternehmen jedoch eines dieser beiden Ziele klar priorisiert und einfach seinen Fahrplan bereits konsequent an nur diesem einen Kriterium ausgerichtet hat, dann wird mathematischer Optimierung in diesem Kriterium nur noch sehr begrenztes Optimierungspotenzial zur Verfügung stehen.
- Das betrachtete Netz darf nicht zu einfach strukturiert sein (z.B. „Sternnetz“). Denn auch für zu einfache Netze vermag bereits ein manuelles Vorgehen Optimallösungen zu erzielen. Bei Netzen ab etwa 30 Linien ist das Verfahren für geeignete Teilmengen von Linien anzuwenden. Die Einteilung kann sich dabei an den im bislang angewendeten Planungsprozess betrachteten Linienpaketen orientieren.
- Idealerweise haben alle im Netz verkehrenden Linien dieselbe Taktzeit. Falls sie stärker voneinander abweichen als dass sie sich nur um einen Faktor von genau zwei unterscheiden, können nur Netze mit sehr viel weniger Linien optimiert werden.

- Es müssen zuverlässige Fahrgastdaten vorliegen. Schließlich stehen als Ergebnis vor allem die Minutenpläne der Linien fest. Und der Fahrplan ist bekanntlich die detaillierteste Angebotsinformation, die gegenüber den Kunden kommuniziert wird.

## 10 Ausblick

Es ist geplant, gemeinsam mit Michaelis und Schöbel [8] die von ihnen erzeugten Linienpläne mit einer detaillierten Fahrplanoptimierung zu unterlegen. In einer Art „best of both worlds“ Ansatz würde dann für ein im Rahmen einer vollwertigen Linienplanung konstruiertes hochwertiges Liniennetz ein nachweislich optimaler Taktfahrplan berechnet, werden der sowohl detaillierte Fahrgast- als auch Dienstplanungserfordernisse berücksichtigt.

Ferner werden die Optimierungsverfahren zur Taktfahrplanoptimierung derzeit um Robustheitsanforderungen ergänzt. Ein auf „Light Robustness“ basierender Ansatz ist in [24] beschrieben. Auf dem Harznetz der Deutschen Bahn AG hat er bereits viel versprechende Ergebnisse geliefert. Die stark multikriterielle Natur der Fahrplankonstruktion spiegelt sich damit verstärkt in den mathematischen Optimierungsmodellen wieder: nominelle Reisezeit, erwartende Reisezeit, Fahrzeugzahl, Dienstzahl und die Einhaltung aller sicherheitsrelevanter Anforderungen. Die Gefahr der Verwässerung der Teilziele wird so noch größer. Und die Wahl der „richtigen“ Gewichtung dieser vielfältigen Teilziele zueinander wird umso wichtiger.

## 11 Danksagung

Mein Dank gilt Herrn Christian Huber (ViP) für seine Initiative, der Geschäftsführung des ViP um Herrn Martin Weis für ihre Offenheit für neue akademische Methoden, sowie Herrn Elmar Swarat (TU Berlin) für seine tatkräftige Unterstützung bei der Projektentwicklung.

## 12 Literatur

- [1] GRÖTSCHEL, M., LÖBEL, A. und VÖLKER, M. (1997). Optimierung des Fahrzeugumlaufs im öffentlichen Nahverkehr. In Hoffmann, K.H. et al. (Hrsg.), Mathematik – Schlüsseltechnologie für die Zukunft. Springer, Heidelberg
- [2] LIEBCHEN, C. (2005). Der Berliner U-Bahn Fahrplan 2005 – Realisierung eines mathematisch optimierten Angebotskonzeptes. In HEUREKA '05: Optimierung in Transport und Verkehr. Tagungsbericht. Nummer 002/81. FGSV Verlag, Köln
- [3] LIEBCHEN, C. (2006). Periodic Timetable Optimization in Public Transport. dissertation.de – Verlag im Internet, Berlin
- [4] CLAESSENS, M., VAN DIJK, N. und ZWANEVELD, P. (1998). Cost optimal allocation of rail passenger lines. European Journal of Operational Research 110(3). S. 474-489.
- [5] LIEBCHEN, C. und MÖHRING, R.H. (2007): The modeling power of the periodic event scheduling problem: Railway timetables – and beyond. In Geraets, F. et al. (Hrsg.): ATMOS 2004. Band 4353 in Lecture Notes in Computer Science. Springer, Heidelberg.
- [6] TYLER, J. (2006). Philosophies of timetabling, definitions of bottlenecks and the usefulness of spreadsheets: the experience of a practical strategic timetable planner. CASPT 2006 CD-ROM

- [7] NACHTIGALL, K. (1998). Periodic Network Optimization and Fixed Interval Timetables. Habilitationsschrift. Universität Hildesheim.
- [8] MICHAELIS, M. und SCHÖBEL, A. (2007). Integrating Line Planning, Timetabling, and Vehicle Scheduling: A customer-oriented approach. ARRIVAL Technical Report 0096, Dezember 2007, Göttingen
- [9] VÖLKER, M. (2003). Ein multikriterieller Algorithmus zur automatisierten Busliniennetzplanung. Vortrag auf dem OR Workshop Optimierung im öffentlichen Nahverkehr, Berlin
- [10] FLEURENT, C., LESSARD, R. und SÉGUIN, L. (2004). Transit Timetable Synchronization: Evaluation and Optimization. CASPT 2004 CD-ROM, San Diego.
- [11] LIEBCHEN, C. (2005). Fahrplanoptimierung im Personenverkehr – muss es immer ITF sein? Eisenbahntechnische Rundschau 54(11). S. 689-702.
- [12] BORNDÖRFER, R. und LIEBCHEN, C. (2008). When Periodic Timetables are Suboptimal. In S. Nickel (Hrsg.): Operations Research Proceedings 2007, Springer, Heidelberg. Zugleich ZIB-Report 07-29, Berlin.
- [13] SERAFINI, P. und UKOVICH, W. (1989). A mathematical model for periodic scheduling problems. SIAM Journal on Discrete Mathematics 2(4). S. 550-581.
- [14] DAUSCHA, W., MODROW, H.D. und NEUMANN, A. (1985). On Cyclic Sequence Types for Constructing Cyclic Schedules. Zeitschrift für Operations Research 29, S. 1-30.
- [15] RÜGER, S. (1986). Transporttechnologie städtischer öffentlicher Personenverkehr. Transpress, Verlag für Verkehrswesen, Berlin. 3. bearb. Auflage
- [16] WEIGANG, W. (1983). Fahrplangestaltung im Mensch-Maschine-Dialog. Schienen der Welt März 2003. S. 8-26.
- [17] ODIJK, M. (1996). A constraint generation algorithm for the construction of periodic railway timetables. Transportation Research B 30(6). S. 455-464.
- [18] LIEBCHEN, C. und PEETERS, L. (2002). Some practical aspects of periodic timetabling. In Chamoni, P. et al. (Hrsg.): Operations Research Proceedings 2001, Springer, Heidelberg
- [19] KORTE, B. und VYGEN, J. (2003). Combinatorial Optimization. Band 21 in Algorithms and Combinatorics. Springer, Heidelberg
- [20] SCHMIDT, D. (2005). Linien- und Taktfahrplanung – ein integrierter Optimierungsansatz. Diplomarbeit, Technische Universität Berlin, Berlin.
- [21] VILLUMSEN, J.C. (2006). Construction of Timetables Based on Periodic Event Scheduling. Masterarbeit, Technische Universität Dänemark, Kopenhagen.
- [22] NACHTIGALL, K. und OPITZ, J. (2007). Vortrag im September 2007 auf der OR 2007, Saarbrücken.
- [23] HUBER, C. (2007). Persönliche Korrespondenz. Verkehrsbetrieb in Potsdam (ViP).
- [24] LIEBCHEN, C., SCHACHTEBECK, M., SCHÖBEL, A., STILLER, S. und PRIGGE, A. (2007). Computing Delay-Resistant Railway Timetables. Preprint, TU Berlin.