

Dienstplanoptimierung im ÖPNV

Ralf Borndörfer*

Andreas Löbel*

Schlüsselworte. Öffentlicher Personennahverkehr, Dienstplanung, Optimierung

Mathematics Subject Classification (MSC 1991). 90B06

1 Einführung

Die Dienstplanung im ÖPNV ist eine Aufgabe der *operativen Planung*, die von den Verkehrsbetrieben i. a. in mehreren aufeinanderfolgenden Schritten durchgeführt wird: Auf die Netzplanung folgen nacheinander die Linien-, Fahr-, Fahrzeugumlauf-, Dienst-, Dienstreihenfolge- und schließlich die Personaleinsatzplanung, siehe z. B. Fengler & Kolonko (1997).

Zur Lösung dieser Planungsaufgaben werden seit über zwanzig Jahren mathematische Optimierungsverfahren entwickelt, um Qualitätsverbesserungen und Kosteneinsparungen zu erreichen. Gute Übersichten über die nationalen und internationalen Aktivitäten geben die letzten Proceedings der Konferenzen *HEUREKA – Optimierung in Verkehr und Transport* (Boltze (1999), Keller (1996, 1993)) und der *International Workshops on Computer-Aided Scheduling in Public Transit (CASPT)*, (Wilson (1998), Daduna, Branco & Paixão (1995), Desrochers & Rousseau (1992) und Daduna & Wren (1988)).

Im Bereich der Dienstplanung stellt sich der aktuelle Stand wie folgt dar. Viele Verkehrsbetriebe arbeiten zwar EDV-gestützt, aber dennoch mit manueller Planung. Dies entspricht dem Entwicklungsstand der meisten Planungssysteme selbst auf internationaler Ebene, z. B. BERTA, siehe Becker, Roß & Schemczyk (1996), und MICROBUS I, siehe Bertram & Winkler (1988). Nur wenige Systeme nutzen mathematische Verfahren. Relativ weit verbreitet sind heuristische Ansätze. Beispiele hierfür sind das Verfahren HASTUS-MACRO in dem Planungssystem HASTUS, siehe Rousseau & Blais (1988), und die Assignment-Heuristik in HOT II, siehe Mojsilovic (1983) und Daduna & Mojsilovic (1988). Diese Verfahren markierten zur Zeit ihrer Entwicklung den State-of-the-Art der Dienstplanung. Sie basieren auf trickreichen Relaxierungen und Dekompositionen des Dienstplanungsproblems, denn eine geschlossene Behandlung war damals noch nicht möglich. Parallel dazu begann die Entwicklung von Set-Partitioning/Set-Covering Ansätzen mit statischer Spaltenerzeugung. Vertreter dieser Entwicklungslinie sind die vor allem in Großbritannien verbreiteten Systeme IMPACS, siehe Wren & Smith (1988) und Parker, Wren & Kwan (1993), und das System TRACS II, siehe Fores, Proll & Wren (1998). Verfahren dieses Typs stellen eine modelltechnische Verbesserung dar, die eine realistische Planung erleichtert. Der algorithmische Fortschritt ist durch die heuristische Spaltenvorauswahl begrenzt. Die modernsten Verfahren basieren auf Column-Generation Techniken, mit denen große Set-Partitioning/Set-Covering Modelle implizit gelöst

*Konrad-Zuse-Zentrum Berlin, Takustr. 7, 14195 Berlin, Email: [nachname]@zib.de, URL: www.zib.de.

werden. Für die Dienstplanung im ÖPNV wurden solche Ansätze u.a. von Carraresi, Girardi & Nonato (1995), Desrosiers & Rousseau (1995) und Desrochers, Gilbert, Sauvé & Soumis (1992) vorgeschlagen. Umgesetzt wurden Sie bisher nur in dem Dienstplanungstool CREW-OPT, das ebenfalls innerhalb von HASTUS vertrieben wird, siehe Desrosiers & Rousseau (1995) und Desrochers, Gilbert, Sauvé & Soumis (1992). Übersichten zum Stand der Dienstplanoptimierung im ÖPNV geben Desrosiers, Dumas, Solomon & Soumis (1995) und Rousseau & Wren (1995).

Wir entwickeln gegenwärtig in einem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Verbundprojekt *Dienstplanung im ÖPNV** ein System, dem die oben genannte Column-Generation Methodik zugrunde liegt. Das System besteht aus einem mathematischen *Optimierungskern* und einem anwendungsspezifischen *Dienstgenerator*. Der Kern ist von der konkreten Ausgestaltung der Dienstplanungsregeln eines speziellen Verkehrsbetriebes unabhängig, während der Dienstgenerator als Interface zum Anwender die Abstimmung auf die gesetzlichen, tariflichen und betrieblichen Regelungen realisiert. Dieser Ansatz ermöglicht es, zur Behandlung des mathematischen Kernproblems effiziente Algorithmen zu entwickeln, während gleichzeitig breite Einsatzmöglichkeiten bei der Dienstplanung im ÖPNV und auch in anderen industriellen Anwendungen gegeben sind.

Wir zielen mit dem System auf die *exakte Behandlung* des Problems der Dienstplanung auf Betriebs- oder Betriebshofebene (bei Unternehmen wie etwa den Berliner Verkehrsbetrieben (BVG)). Unser Ansatz ermöglicht (i) die vollständige Ausnutzung aller betrieblichen Freiheitsgrade und (ii) die korrekte Behandlung sämtlicher gesetzlichen, tariflichen und betrieblichen Bedingungen. Auf diese Weise kann ein hohes Optimierungspotenzial direkt in den Fahrbetrieb umgesetzt werden. Unser Dienstplanungsverfahren ist in das Planungssystem MICROBUS II integriert und wird derzeit in der Qualitätssicherung evaluiert.

Wir skizzieren im Folgenden unser Optimierungsverfahren. Abschnitt 2 gibt eine Kurzeinführung in die Dienstplanung im ÖPNV. In Abschnitt 3 beschreiben wir die mathematische Methodik.

2 Die Dienstplanung im ÖPNV

Bei der *Dienstplanung im ÖPNV* geht es darum, aus einer Menge von elementaren Arbeitseinheiten, den sog. Dienstelementen, (zunächst) anonyme Tagesdienste für einzelne Fahrer zu bilden, die zusammen einen sog. Dienstplan bilden. Zu beachten sind gesetzliche, tarifliche und betriebliche Regeln für Zulässigkeit, monetäre und arbeitszeitliche Bewertung einzelner Dienste und des Plans als Ganzes, sowie die Synchronisation mit den vor- und nachgelagerten Schritten der Umlauf- und der Dienstreihenfolgeplanung. Der Planungshorizont ist ein Betriebstag, das Hauptziel ist die Minimierung der Kosten. Wir skizzieren im Folgenden grob das Problem der Dienstplanung im ÖPNV. Für eine detailliertere Darstellung verweisen wir auf Borndörfer, Löbel, Strubbe & Völker (1999) und die dort genannten Referenzen.

Die Dienstplanung gliedert sich in vier Ebenen.

Die unterste Ebene ist die der *Dienstbestandteile*, die einzelne Tätigkeiten des Fahrpersonals repräsentieren. Man unterscheidet Dienstelemente, Übergänge und Ergänzungselemente. Die Dienstelemente entsprechen Bus- oder U/S-Bahn-Fahrten und ergeben sich aus dem sog. "Schneiden" von Fahrzeugumläufen an Ablösepunkten, an denen ein Fahrerwechsel möglich

*Förderungskennzeichen 03-GR7ZI1-4

ist. Zwei Dienstelemente werden durch einen Übergang miteinander verknüpft, wenn es (lokal) möglich ist, die Elemente in einem Dienst hintereinander durchzuführen. Die Übergänge enthalten Wegezeiten, Pausenzeiten etc. und sind die wichtigsten Freiheitsgrade der Dienstplanung. Anzahl und Ausgestaltung hängen stark vom Regelwerk ab. Ergänzungselemente sind ein dritter Typ von Dienstbestandteilen, der zur Modellierung von Vorbereitungs- und Abschlußarbeiten dient. Solche Arbeiten fallen am Beginn oder Ende von Diensten, Dienstteilen oder Dienststücken, also an bestimmten Stellen eines Dienstes, an.

Die zweite Ebene bilden die *Dienste*. Jeder Dienst muß den Regeln einer sog. Dienststart entsprechen, in der u.a. mögliche Arbeitszeiten, Lenkzeiten, Pausenmodelle, Zuschläge etc. festgelegt sind. Ein Beispiel für eine typische Dienststart ist ein "zusammenhängender Frühdienst".

Auf der dritten Ebene des *Dienstplans* gibt es ebenfalls Regelungen, die vor allem den Dienstmix betreffen, d. h. das Verhältnis der verschiedenen Dienststarten zueinander.

Die vierte Ebene betrifft die *Integration der Dienstplanung in die Gesamtplanung*. Hier ergeben sich Fragen der Abgrenzung der Planungsperiode, der Abstimmung mit den vor- und nachgelagerten Planungsschritten, der sog. "Stabilität" der Planung über die Woche und der sog. Anpassung.

3 Mathematische Dienstplanungsmethodik

Die mathematische Methodik der Dienstplanung spiegelt die in Abschnitt 2 genannten vier Ebenen genau wider.

Die Grundlage und erste Ebene bildet ein graphentheoretisches Modell des Dienstplanungsproblems. In diesem *Dienstplanungsgraphen* bilden die Dienst- und Ergänzungselemente die Knoten, während die Kanten die möglichen Übergänge darstellen. Knoten und Kanten tragen Attribute wie Lenkzeit, Pausenzeit etc.

Die Dienste entsprechen auf der zweiten Ebene *Pfaden* im Dienstplanungsgraphen. Umgekehrt ist allerdings nicht jeder Pfad ein Dienst. Nur Pfade, die alle Regeln einer Dienststart einhalten, definieren zulässige Dienste.

Die Dienstplanung ist in dieser Terminologie ein Problem des Überdeckens von Knoten (der Dienstelement-Knoten) durch Pfade bestimmter Arten. Zu jedem Pfad gehört eine Bewertung, und gesucht ist eine Pfadüberdeckung mit minimalen Kosten. Zu beachten sind auf der Ebene des Dienstplanes dabei noch Anforderungen an den Mix von Pfaden verschiedener Typen.

Die Integration der Dienstplanung in die Gesamtplanung strebt man auf der vierten Ebene durch die Konstruktion geeigneter Dienstplanungsgraphen und Dienststarten sowie durch die Wahl geeigneter Zielfunktionen an.

Dieses graphentheoretische Modell bildet die Basis für die Algorithmen unseres Optimierungssystems. Die Lösung von Problemen der Pfadüberdeckung gehört zu den am besten untersuchten Fragen in der kombinatorischen Optimierung. Wir setzen auf *Column-Generation Methoden*, die auf Set-Partitioning und Set-Covering Modellen basieren. Mit solchen Verfahren wurden in der Vergangenheit große Erfolge bei der Dienstplanung im Luftverkehr erzielt, siehe Gopalan & Talluri (1998) oder das Kompendium von Yu (1998) für aktuelle Übersichten. Für eine Einführung in die Methodologie der Column-Generation empfehlen wir den Übersichtsartikel Barnhart et al. (1994).

Die grundsätzliche Vorgehensweise besteht darin, daß Pfadüberdeckungsproblem als ein ganz-

zahliges Programm (IP) der Form

$$\min c^T x, \quad Ax \geq 1, \quad x \in 0, 1^n \quad (\text{SCP})$$

zu formulieren. A ist dabei eine 0/1 Dienstelement-Pfad-Inzidenzmatrix und c ein Vektor, der einen Zielfunktionskoeffizienten für jeden Pfad enthält. Häufig anzutreffen ist auch eine Set-Partitioning Variante $Ax = 1$, in der jedes Dienstelement genau einmal überdeckt wird. In beiden Fällen ist die Anzahl der Pfade sehr groß, so daß man diese IPs implizit löst. Nach und nach werden zunächst die Spalten der für das Gesamtproblem optimalen Basis der LP Relaxierung generiert. Wie im Luftverkehr zeigt die rechnerische Erfahrung, daß man sich dabei auf eine näherungsweise Lösung der LP Relaxierung beschränken kann, ohne großes Optimierungspotenzial zu verschenken.

Diese Philosophie liegt auch unserem System zugrunde. Wir haben drei algorithmische Hauptkomponenten entwickelt, die die Column-Generation Methodik für Dienstplanoptimierung im ÖPNV umsetzen. Das erste Modul ist ein *Dienstgenerator*, der zu gegebenen Dualvariablen Dienste, also Pfade bzw. Spalten, mit negativen reduzierten Kosten erzeugt. Die Pfaderzeugung ist ein \mathcal{NP} -schweres Problem, das wir mit Methoden der dynamischen Programmierung angehen. Im zweiten Modul werden die *Dualvariablen* des aktuellen Master-Problems berechnet. Bei den sehr großen LPs in der Dienstplanung verwenden wir Lagrange- bzw. Koordinatenabstiegsverfahren. Die dritte Komponente ist eine *Primalheuristik* zur Berechnung zulässiger Dienstpläne. Wir haben ein Branch-and-Generate Verfahren entwickelt, in dem iterativ abwechselnd Variablen fixiert (und manchmal auch wieder freigegeben) und neue Dienste nachgeneriert werden.

Unser System befindet sich derzeit in einer Evaluierungsphase. Wir sind in der Lage, mittlere Szenarien mit einigen tausend Dienstelementen zu planen.

Literatur

- Ball, Magnanti, Monma & Nemhauser (Editoren) (1995). *Network Routing*, Band 8 des *Handbooks in Operations Research and Management Science*. Elsevier Sci. B.V., Amsterdam.
- Barnhart, Johnson, Nemhauser, Savelsbergh & Vance (1994). Branch-and-Price: Column Generation for Solving Huge Integer Programs. In Birge & Murty (1994), S. 186–207.
- Becker, Roß & Schemczyk (1996). BERTA – EDV-gestützte Betriebseinsatzplanung bei den Berliner Verkehrsbetrieben, Sachstand und Ausblick. *Verkehr und Technik (V+T) 2+3*.
- Bertram & Winckler (1988). Scheduling on Microcomputers Using MICROBUS. In Daduna & Wren (1988), S. 188–199.
- Birge & Murty (Editoren) (1994). *Mathematical Programming: State of the Art 1994*. Univ. of Michigan.
- Boltze (Ed.) (1999). *HEUREKA '99: Optimierung in Verkehr und Transport*, Tagungsbericht. Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Köln.
- Borndörfer, Löbel, Strubbe & Völker (1999). Zielorientierte Dienstplanoptimierung. In *Heureka '99: Optimierung in Verkehr und Transport*, S. 171–194. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln. (ZIB Preprint SC 98-41*).

*Erhältlich von URL <http://www.zib.de/ZIBbib/Publications/>

- Carraresi, Girardi & Nonato (1995). Network Models, Lagrangean Relaxation and Subgradients Bundle Approach in Crew Scheduling Problems. In Daduna, Branco & Paixão (1995), S. 188–212.
- Daduna, Branco & Paixão (Editoren) (1995). *Computer-Aided Transit Scheduling*, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. Springer Verlag.
- Daduna & Mojsilovic (1988). Computer-aided vehicle and duty scheduling using the HOT programme system. In Daduna & Wren (1988), S. 133–146.
- Daduna & Wren (Editoren) (1988). *Computer-Aided Transit Scheduling*, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. Springer Verlag.
- Desrochers, Gilbert, Sauvé & Soumis (1992). CREW-OPT: Subproblem modeling in a column generation approach to urban crew scheduling. In Desrochers & Rousseau (1992), S. 395–406.
- Desrochers & Rousseau (Editoren) (1992). *Computer-Aided Transit Scheduling*, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. Springer Verlag.
- Desrosiers, Dumas, Solomon & Soumis (1995). Time Constrained Routing and Scheduling. In Ball, Magnanti, Monma & Nemhauser (1995), Kapitel 2, S. 35–139.
- Desrosiers & Rousseau (1995). Results Obtained with Crew-Opt: A Column Generation Method for Transit Crew Scheduling. In Daduna, Branco & Paixão (1995), S. 349–358.
- Fengler & Kolonko (1997). Entwicklung von Fahrplänen unter mehrfacher Zielsetzung. *Der Nahverkehr 11/97*, 45–48.
- Fores, Proll & Wren (1998). An Improved ILP System for Driver Scheduling. In Wilson (1998), S. 43–62.
- Gopalan & Talluri (1998). Mathematical Models in Airline Schedule Planung: A Survey. *Annals of OR 76*, S. 155–185.
- Keller (Ed.) (1993). *HEUREKA '93: Optimierung in Verkehr und Transport*, Tagungsbericht. Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Köln.
- (Ed.) (1996). *HEUREKA '96: Optimierung in Verkehr und Transport*, Tagungsbericht. Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Köln.
- Mojsilovic (1983). Verfahren für die Bildung von Fahrzeugumläufen, Dienstplänen und Dienstreihenfolgeplänen. In *Heureka 83 – Optimierung in Transport und Verkehr*, S. 178–191. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.
- Parker, Wren & Kwan (1995). Modelling the Scheduling of Train Drivers. In Daduna, Branco & Paixão (1995), S. 359–370.
- Rousseau & Blais (1988). Overview of HASTUS Current and Future Versions. In Daduna & Wren (1988), S. 175–187.
- Rousseau & Wren (1995). Bus Driver Scheduling - An Overview. In Daduna, Branco & Paixão (1995), S. 173–187.
- Wilson (Ed.) (1998). *Computer-Aided Transit Scheduling*, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. Springer Verlag, Berlin.
- Wren & Smith (1988). Experiences with a Crew Scheduling System Based on Set Covering. In Daduna & Wren (1988), S. 104–118.
- Yu (1998). *Operations Research in the Airline Industry*. Int. Series in Op. Res. and Mgmt. Sci. Kluwer, Dordrecht.