Konrad-Zuse-Zentrum
für Informationstechnik Berlin

Takustraße 7
D-14195 Berlin-Dahlem
Germany

RALF BORNDÖRFER ANDREAS LÖBEL
UWE STRUBBE MANFRED VÖLKER

Zielorientierte Dienstplanoptimierung

Preprint SC 98-41 (Dezember 1998)

Zielorientierte Dienstplanoptimierung

Ralf Borndörfer[1] Andreas Löbel[1]
Uwe Strubbe[2] Manfred Völker[3]

29. Dezember 1998

Zusammenfassung. Dieser Artikel behandelt einen Ansatz zur *zielorientierten Optimierung der Dienstplanung* im ÖPNV. Der Ansatz zielt auf die vollständige Ausnutzung aller planerischen Freiheitsgrade unter korrekter Berücksichtigung von gesetzlichen, tariflichen, technischen und betrieblichen Rahmenbedingungen. Er basiert auf mathematischen Optimierungstechniken, die wir gegenwärtig in einem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Verbundprojekt[4] in einer Kooperation zwischen der HanseCom GmbH[3], der IVU GmbH[2] und dem Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin[1] entwickeln. Es ist geplant, das Verfahren in die Softwareprodukte HOT II, MICROBUS II und OPUS zu integrieren. Verhandlungen mit den Berliner Verkehrsbetrieben über eine Projektbeteiligung und Integration unserer Software in BERTA sind zur Zeit im Gang. Wir beschreiben die Methodik des Ansatzes, diskutieren Aspekte seiner praktischen Verwendung, und wir berichten über den Stand der Entwicklung.

Schlüsselworte. Dienstplanung, Optimierung, Zielorientierte Planung

Mathematics Subject Classification (MSC 1991). 90B06

1 Dienstplanoptimierung

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-, Fahrzeugeinsatz- (Umlauf-), Dienst-, Dienstreihenfolge- (Turnus-) und schließlich die Personaleinsatzplanung, siehe auch Fengler & Kolonko [1997].

Zur Lösung dieser Planungsaufgaben werden seit über zwanzig Jahren *Optimierungsverfahren* entwickelt, um Qualitätsverbesserungen und Kosteneinsparungen zu erzielen. Diese Aktivitäten dokumentieren sich in einer Serie von internationalen und nationalen Konferenzen zu diesem Thema, insbesondere den *International Workshops on Computer-Aided Scheduling in Public Transit* (CASPT) und der *HEUREKA — Optimierung in Verkehr und Transport*. Die Tagungsbände der CASPT Konferenzen (Wilson [1998], Daduna, Branco

[1] Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin, Takustr. 7, 14195 Berlin,
Email: [borndoerfer,loebel]@zib.de, URL: www.zib.de/[borndoerfer,loebel].
[2] IVU GmbH, Bundesallee 88, 12161 Berlin, Email: us@ivu-berlin.de, URL: www.ivu-berlin.de.
[3] HanseCom GmbH, Spohrstr. 6, 22083 Hamburg, URL: www.hansecom.com.
[4] BMBF-Förderkennzeichen 03-GR7ZI1-4, Informationen zum Förderprogramm unter
URL: www.iwr.uni-heidelberg.de/iwr/amj/bmbf/bmbf.html.

& Paixão [1995], Desrochers & Rousseau [1992] und Daduna & Wren [1988]) und die Tagungsberichte zur HEUREKA (Keller [1993,1996]) geben einen guten Einblick in die Entwicklungen auf diesem Gebiet.

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 & Winckler [1988]). Nur wenige Systeme nutzen bereits mathematische Verfahren, die auf heuristischen Methoden basieren. Beispiele hierfür sind das Verfahren HASTUS-MACRO in dem kanadischen Planungssystem HASTUS (siehe Blais & Rousseau [1988]) und die Assignment-Heuristik in HOT II (siehe Daduna & Mojsilovic [1988]). Diese Verfahren stellten zur Zeit ihrer Entwicklung den State-of-the-Art der Dienstplanung dar. Moderne und effiziente mathematische Ansätze standen bisher nur in dem Dienstplanungssystem CREW-OPT zur Verfügung, das ebenfalls innerhalb von HASTUS vertrieben wird (siehe Rousseau [1998], Desrosiers & Rousseau [1995] und Desrochers, Gilbert, Sauvé & Soumis [1992]). Bis auf den Ansatz in CREW-OPT weisen alle diese Verfahren folgende *Nachteile* auf:

1. Ein Großteil der betrieblichen Freiheitsgrade bleibt unberücksichtigt.
2. Sie erlauben keine Aussagen über die Güte der Lösungen ("Um wieviel könnte eine gefundene Lösung möglicherweise noch verbessert werden?"). Damit besteht insbesondere auch keine Möglichkeit der quantitativen (monetären) Analyse betrieblicher Rahmenbedingungen.

Bei den manuellen Verfahren kommt noch ein methodischer Nachteil hinzu:

3. Sie sind eher regel- denn zielorientiert (siehe Abschnitt 2).

Durch Fortschritte in der Theorie der mathematischen Optimierung und durch die rasanten Entwicklungen in der Computertechnologie wurde es in neuerer Zeit erstmals möglich, mathematische Ansätze zu verfolgen, die eine *exakte Behandlung* des Problems der Dienstplanung erlauben. Grundlagen dieser Ansätze sind sog. Set-Partitioning- und/oder Set-Covering-Modelle der ganzzahligen linearen Programmierung, die mit dynamischer Spaltenerzeugung (Diensterzeugung) und sog. Branch-and-Price-Techniken bearbeitet werden. Bei der Planung von Flugzeugflotten und Flugpersonal stellen diese Methoden den neuesten Standard dar (siehe den Übersichtsartikel Gopalan & Talluri [1998] oder das Kompendium von Yu [1998]).

In der Literatur wurden solche Ansätze für die Dienstplanung im ÖPNV neben den Veröffentlichen zu CREW-OPT auch von Carraresi, Girardi & Nonato [1995] vorgeschlagen und zum Teil auch in die Praxis umgesetzt. Nicht mehr ganz neue Übersichten zum Stand der Dienstplanoptimierung im ÖPNV geben Desrosiers, Dumas, Solomon & Soumis [1995] und Rousseau & Wren [1995].

Wir entwickeln gegenwärtig in einem vom BMBF geförderten Verbundprojekt *Dienstplanung im ÖPNV* ein System, dem u.a. die oben genannte 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 und tariflichen Nebenbedingungen und die Anpassung an die eigenen lokalen (z.B. technischen, betrieblichen etc.) Regelungen realisiert. Dieser Ansatz ermöglicht es, zur Behandlung des mathematischen Kernproblems effiziente Algorithmen und Software zu entwickeln, während gleichzeitig breite Einsatzmöglichkeiten bei der Dienstplanung im ÖPNV und auch in anderen industriellen Anwendungen gegeben sind. *Vorteile* dieses Ansatzes sind, daß er eine vollständige Ausnutzung aller betrieblichen Freiheitsgrade bei korrekter Behandlung aller gesetzlichen, tariflichen und betrieblichen Bedingungen ermöglicht sowie quantitative Aussagen über die Güte von Dienstplänen erlaubt. Wir glauben, daß diese Methoden mit dazu beitragen können, den Herausforderungen der anstehenden Deregulierung des ÖPNV nach § 90 des EU-Vertrages Maastricht II gerecht zu werden, siehe hierzu Meyer [1997] für einen Vergleich der Entwicklungen in Europa.

Der Rest dieses Artikels ist wie folgt gegliedert. Abschnitt 2 diskutiert die Unterschiede zwischen regel- und zielorientiertem Planen. Abschnitt 3 beschreibt das Problem der Dienstplanung. In Abschnitt 4 entwickeln wir ein mathematisches Modell des Dienstplanungsproblems. Dieses Modell erlaubt die Ausnutzung aller Freiheitsgrade zur Optimierung und gleichzeitig die korrekte Behandlung der gesetzlichen und betrieblichen Rahmenbedingungen. Wir behandeln die mathematische Methodik zur Behandlung dieses Modells unter besonderer Beachtung der Steuerungsmöglichkeiten durch den Planer. Der Abschnitt 5 diskutiert Aspekte der betrieblichen Praxis der Dienstplanoptimierung.

2 Von Regel- zu Zielorientierter Planung

Viele der Verfahren, die für die Dienstplanung im ÖPNV (und auch für die anderen Fragen der operativen Planung) entwickelt wurden, können als *regelorientierte Ansätze* verstanden werden. Regelplanung zielt auf die Definition eines klaren Entscheidungsprozesses ab. Die Planung wird in einer wohldefinierten Kette von aufeinanderfolgenden Einzelentscheidungen (eines verfeinerbaren Detaillierungsgrades) organisiert. Dies resultiert in Planungsvorschriften, die eine Hintereinanderausführung elementarer (Planungs-)Regeln verlangen (daher der Name) und sich etwa wie folgt lesen: “Zuerst wird Regel a) angewandt. Wenn das Resultat b) ist, wird Regel c) angewandt, andernfalls d). Danach ….”

Dadurch kann der Planer sein Resultat stets als korrektes Ergebnis eines wohldefinierten Prozesses rechtfertigen. Bei ausreichend genauer Spezifikation der Regeln wird die Planung zusätzlich reproduzierbar und sogar mechanisierbar, d.h. von Computerprogrammen durchführbar. Diese Eigenschaften sind der Grund, warum derzeit vor allem regelorientierte Verfahren eingesetzt werden.

Regelplanung verliert an Attraktivität, wenn Planung als ein Weg zur bestmöglichen Erreichung eines *Zieles* verstanden wird. Regelorientierte Verfahren versuchen natürlich auch Ziele zu erreichen, aber auf eine willkürliche Art und Weise. Sie sind i.d.R. lediglich Heuristiken (d.h. Verfahren zur Erstellung *irgendeiner* Lösung), die das Optimum eines Planungsziels i.a. nicht erreichen.

Das Auffinden einer besten Lösung (oder mehrerer Alternativen) ist die Motivation zur Entwicklung von *zielorientierten Verfahren*. Die zwei Grundideen zielorientierter Planung sind die Betrachtung eines ganzen Lösungsraumes aller möglichen Antworten auf das Planungsproblem sowie eines Zielkriteriums, das eine Bewertung und eine Beurteilung der Qualität der Lösungen erlaubt. Die Darstellung des Lösungsraumes erfolgt dabei *implizit* durch ein (abstraktes) *Modell* des Problems, das alle Planungsregeln adäquat abbilden muß. Das Modell bildet dann die Basis zur Entwicklung von *Algorithmen*, die für eine Instanz des Modells das nur implizit beschriebene Optimum *explizit* berechnen.

Die in der Einleitung beschriebene Entwicklungsgeschichte der *Optimierungsverfahren* zu Fragestellungen der operativen Planung kann als schrittweiser *Übergang von regel- zu zielorientierter Planung* verstanden werden. Das Tempo der Entwicklung wird dabei vom mathematischen Knowhow und von den verfügbaren Rechenressourcen bestimmt. Entschieden sich die Entwickler von HOT II und HASTUS-MACRO deshalb noch für die Optimierung von geeigneten Problem-Relaxierungen, so zielen moderne Ansätze nun auf die direkte Lösung des Dienstplanungsproblems ab. Und dies ist noch nicht das Ende des Weges zu einer zielorientierten Planung im ÖPNV. Der nächste Schritt zeichnet sich schon deutlich ab: Die Integration von Fahr- und Dienstplanung wird mittelfristig den Trend markieren. Eine Diskussion der Entwicklungen in der Optimierung von Transportsystemen findet sich in Borndörfer, Grötschel & Löbel [1998b].

Eine immer praxisnähere und umfassendere Optimierung von Teilaufgaben ist aber nur ein Bestandteil einer erfolgreichen operativen Planung. Wichtig ist auch, *das Gesamtziel bedarfsgerechter und kostengünstiger ÖPNV* im Auge zu behalten. So muß man z.B. bei der Umlaufoptimierung selbstverständlich darauf achten, daß Einsparungen bei den Fahrzeugen nicht bei der Dienstplanung wieder verloren gehen. Um solche Effekte zu vermeiden, muß eine geeignete *Integration* der einzelnen Optimierungsbausteine in und zu einem Gesamtsystem gewährleistet werden. Geeignet dazu sind Optimierungstools, die sich durch flexible Parametrisierung an die Erfordernisse der nachfolgenden Planungsschritte anpassen lassen.

Ein Planer, der mit einem solchen System arbeitet, wird diese Einstellmöglichkeiten genau kennen. Er wird nicht mehr in aufwendiger Kleinarbeit Lösungen selbst konstruieren. Vielmehr wird er mit seinem Wissen und seiner Erfahrung immer leistungsfähigere *Computer-Aided-Scheduling*- (kurz CAS-) Werkzeuge so kalibrieren, daß Lösungen nach seinem *Geschmack* erzeugt werden, ähnlich wie ein Konstrukteur ein CAD-System verwendet. Optimierung steht nicht im Widerspruch zu interaktiver Planung, sondern *Optimierung ermöglicht interak-*

tive Planung auf einem höheren Niveau. In den Worten des Wissenschaftlichen Beirates beim Bundesminister für Verkehr [1984]: *"Wichtig erscheint, durch interaktive Techniken einerseits die Restriktionen in Optimierungsprogrammen flexibler handhaben zu können und andererseits verschiedene (Teil-) Optimierungsprogramme unter Beachtung der sich aus den Wechselbeziehungen ergebenden Restriktionen untereinander zu verknüpfen."*

Die gerade skizzierte Vorgehensweise steht und fällt mit der *korrekten Abbildung und Behandlung aller planerischen Rahmenbedingungen* innerhalb der Optimierungsmodule. Im Bereich der Dienstplanung besteht hier Nachholbedarf, besonders durch das im internationalen Vergleich komplizierte deutsche Regelwerk. Das Beispiel des Luftverkehrs zeigt aber, daß eine solche Planungstechnik nicht nur möglich ist, sondern sogar mit wettbewerbsentscheidend sein kann, siehe etwa Horner [1995] für den Einsatz von Optimierungsmethoden bei der US-Fluggesellschaft Delta Airlines.

Wie eine Optimierung in der Dienstplanung im ÖPNV aussehen kann, wie die dort vorkommenden Rahmenbedingungen korrekt abgebildet werden können, wie Vorgaben dazu verwendet werden können, die Optimierung der Dienstplanung in den Gesamtprozeß der operativen Planung zu integrieren, und was bei der Verwendung eines solchen Tools in der Praxis zu beachten ist, das beschreiben wir in den folgenden Abschnitten.

3 Die Dienstplanung im ÖPNV

Bei der *Dienstplanung im ÖPNV* geht es darum, aus einer Menge elementarer Arbeitseinheiten, den sog. Dienstelementen, eine Menge von Tagesdiensten (für einzelne Fahrer) zu bilden. Zu beachten sind bei der Planung eine Reihe von gesetzlichen, tariflichen, technischen, betrieblichen etc. Bedingungen (für die einzelnen Dienste, aber auch für den Plan als Ganzes) sowie verschiedene Zielkriterien.

Der Rest dieses Abschnittes ist einer genaueren Beschreibung der Aufgabe der Dienstplanung gewidmet. Es ist nicht unser Ziel, Details der mannigfaltigen lokalen Ausprägungen der Problemstellung in den einzelnen Verkehrsbetrieben darzustellen. Wir wollen vielmehr einen *Rahmen* beschreiben, der alle uns bekannten Varianten und Facetten des Problems umfaßt. Wir haben bereits auf die große Bedeutung einer *korrekten Behandlung aller Rahmenbedingungen* hingewiesen; wir geben deshalb eine zwar auf einem hohen Niveau gehaltene, aber dennoch vollständige Beschreibung aller Problembestandteile. Wie alle diese *Ingredienzen* der Dienstplanung in unserem Optimierungsverfahren korrekt behandelt werden, wird in Abschnitt 4 beschrieben.

Die folgende *Darstellung* der Aufgabe der Dienstplanung ist in vier Bereiche gegliedert. Wir diskutieren zunächst die einzelnen Bestandteile von Diensten, Dienste als Ganzes, Dienstpläne und zuletzt die Einbettung der Dienstplanung in den Gesamtplanungprozeß. Die Beschreibung ist nicht als Einführung in die

Dienstplanung gedacht und setzt eine gewisse Vertrautheit des Lesers mit der Materie voraus. Referenzen sind z.B. Lehner [1978], das Glossar *Das Fachwort im Verkehr* [1992], das Manual MICROBUS 2 [1994] und der Kommentar von Rang [1996] zur Lenkzeitverordnung.

3.1 Die Dienstbestandteile

Tätigkeiten, Zeitattribute. Das Fahrpersonal führt in einem Dienst i.a. eine Reihe verschiedener Tätigkeiten durch, die anhand von Zeitattributen unterschieden werden. Zu nennen sind die Begriffe Lenkzeit, sonstige Arbeitszeit (wie Wege- oder Kurbelzeit), (Gesamt-)Arbeitszeit, Pausenzeit, und Dienstunterbrechung (siehe auch Dienstarten).

Dienstelemente. Ausgangspunkt der Dienstplanung ist das Ergebnis der Fahrzeugumlaufplanung. Die Umläufe werden an (vom Benutzer definierten) Ablösepunkten in sog. *Dienstelemente* zerlegt. Dienstelemente sind Arbeitseinheiten, die von einem Fahrer am Stück erledigt werden müssen. Jedes Dienstelement muß mit einem gültigen Dienst abgedeckt werden.

Dienstelementbestandteile. Die Dienstelemente stellen sich bei genauer Betrachtung als heterogene Gebilde heraus: Ein Dienstelement kann aus einer ganzen Sequenz von Lenk-, sonstigen Arbeits- und (fest eingeplanten) Pausenzeiten bestehen (der Leser denke z.B. an Dienstelemente, die über einen Endhaltestellenbereich ohne Ablösemöglichkeit reichen). Da die Lage der Pausenzeiten nach der gesetzlichen Lenkzeitverordnung für die Zulässigkeit eines Dienstes von Bedeutung ist, teilen wir die Dienstelemente weiter in einzelne sog. *Dienstelementbestandteile* auf. Diese haben einen Lenk-, Arbeits- und Pausenzeitanteil (letzterer liegt per Definition immer am Ende eines Dienstelementbestandteils, was durch eine ausreichend feine Aufteilung der Dienstelemente immer erreicht werden kann).

Ergänzungselemente. Zusätzlich zu den Dienstelementen, die sich aus dem Umlaufplan ergeben, können in Diensten noch Zusatzarbeiten (auch “betrieblich notwendige Arbeit” genannt) notwendig werden. Zusatzarbeiten fallen am Beginn oder Ende von Dienstteilen oder von Dienststücken (Beschreibung siehe unten) z.B. beim Fahrzeugwechsel, im Depot oder (bei der U-Bahn) beim Wechsel des Geobereiches an, wobei die Art der Arbeiten nach einer differenzierten “Positionslogik” (siehe MICROBUS 2 [1994]) von der Lage des Dienstteils oder -stücks im Dienst (z.B. spezielle Arbeiten am Beginn des ersten Dienststücks) oder vom Übergang zwischen Dienststücken/-teilen abhängen kann. Solche Zusatzarbeiten führen zu positions- und/oder übergangsabhängigen Sequenzen von sog. *Ergänzungselementen*, die die Eigenschaften von Dienstelementbestandteilen aufweisen und gegebenenfalls in die Dienste einzubauen und insbesondere für die Pausenregelung (s.u.) relevant sind.

A Priori und A Posteriori Dienstbestandteile. Dienstelementbestandteile und Ergänzungselemente können als die “Atome” der Dienstplanung betrachtet

werden. Die durchzuführenden Dienstelemente sind *a priori* bekannt, während sich die zusätzlich durchzuführenden Ergänzungselemente aus der Planung ergeben und damit *a posteriori* festliegen.

Verknüpfungen. Aus Abfolgen von Dienstelement(bestandteil)en und Ergänzungselementen werden in der Dienstplanung Tagesdienste für einzelne Fahrer gebildet. Aber nicht alle Abfolgen von Dienstelementbestandteilen und Ergänzungselementen sind zulässig (z.B. kann der Verkehrsbetrieb Fahrerwechsel zwischen bestimmter Linien verbieten wollen). Diejenigen Bestandteile, die hintereinander in einem Dienst auftreten können, werden durch eine sog. *Verknüpfung*(smöglichkeit) miteinander verbunden, die einen Pausenanteil aufweisen kann. Die Auswahl der Verknüpfungen ist ein entscheidender Teil der Dienstplanung, denn die Verknüpfungen definieren Freiheitsgrade zur Bildung von Diensten. Eine zu kleine kombinatorische Freiheit kann nur ein geringes oder gar kein Einsparpotential freisetzen. Andererseits kann für sehr große Verkehrsbetriebe das Dienstplanungsproblem nicht mehr handhabbar werden, wenn jede Haltestelle als potentieller Ablösepunkt betrachtet wird.

3.2 Die Dienste

Pausenregelung. Die gesetzliche Lenkzeitverordnung legt fest, wann und wie lange ein Fahrer mindestens Pause machen muß und wann eine Arbeitsunterbrechung als Pause anerkannt wird. Man unterscheidet die *Blockpausenregelungen* und die *Quotientenregeln*. Gesetzliche, tarifliche und betriebliche Regelungen bestimmen Längen und Lagen der Pausen. Parameter sind etwa die minimale erste, zweite oder dritte Pausenzeit bei einer, zwei oder drei Blockpausen oder die minimale anrechenbare Pausenzeit bei einer Quotientenregel.

Diensttypen. Je nach Anfangs- und Endzeit spricht man von *Früh-*, *Mittel-, Spät-* und *Nachtdiensten*. Dienste müssen nicht *zusammenhängend* sein, zur Abdeckung von Hauptverkehrszeiten sind auch *geteilte* Dienste möglich.

Dienststücke, Dienstteile. Die Dienste lassen sich in größere Untereinheiten von Dienstteilen und -stücken einteilen. Ein *Dienststück* entspricht einem maximalen Umlaufstücken zwischen zwei Ablösepunkten, das von einem Fahrer am Stück gefahren wird.

Attribute. Wie die Dienstbestandteile werden auch den Diensten verschiedene Attribute zugeordnet. Wir unterscheiden Zeitattribute wie Dienstbeginn und -ende, Schichtlänge (inkl. Dauer der Dienstunterbrechungen), Dienstlänge, Lenk-, Arbeits- und Pausenzeit und andere Attribute wie Anzahl der Dienstteile etc. Diesen Parametern können minimale, maximale, durchschnittliche und angestrebte Werte zugeordnet werden.

Dienstarten. Durch eine konkrete Festlegung der bisher genannten Parameter (also Diensttyp, Pausenregelung, Attribute) wird eine *Dienstart* festgelegt, z.B. ein zusammenhängender Frühdienste mit Sechstelregel, Dienstbeginn zwi-

schen …, Dienstende …, max. Dienstlänge …, usw. In der Dienstplanung werden nur Dienste definierter Dienstarten entsprechend deren jeweiliger Spezifikation gebildet. Die Definition der Dienstarten ist ein bedeutender Aspekt der Dienstplanung, denn die verfügbaren Dienstarten definieren wichtige Freiheitsgrade der Dienstplanoptimierung.

3.3 Der Dienstplan

Eine Menge von Diensten, in der jedes Dienstelement (genau einmal) von einem Dienst überdeckt wird, ist ein *Dienstplan*. Dienstpläne werden nach einer Reihe von Zielkriterien beurteilt, die wir nun auflisten. Daß die Wahl von Zielkriterien einen entscheidenden Einfluß auf die Ergebnisse der Dienstplanung hat, versteht sich von selbst.

Dienstbezogene Kriterien. Ein Hauptkriterium bei der Dienstplanung ist die Minimierung der *Personalkosten*. Dieser Begriff kann je nach Verkehrsbetrieb sehr verschieden definiert sein. Im allgemeinen sind die Gesamtkosten eine Summe von Kosten einzelner Dienste. Die Kosten eines einzelnen Dienstes setzen sich zusammen aus Anteilen für die Dienst- und Ergänzungselemente und für die Verknüpfungen sowie aus Anteilen für die zugrundeliegende Dienstart (z.B. Zulage für Nachtdienst). Kosten müssen nicht notwendig eine unmittelbare monetäre Interpretation haben. Man kann auch soziale und betriebliche Kriterien wie die Arbeitszeit, den Wirkungsgrad oder die Abweichung vom angestrebten Dienstschnitt optimieren, oder auch Kombinationen davon.

Dienstmix. Ein weiteres wichtiges Ziel der Dienstplanung ist ein ausgewogener Dienstmix (das im Dienstplan bestehende Verhältnis von Dienstarten oder Dienstartgruppen zueinander, z.B. max. 10% geteilte Dienste oder ca. 25% Mitteldienste). Allgemeiner formuliert ist auch eine Vorgabe von sog. Base-Constraints auf den Dienstarten denkbar, wie es bei der Dienstplanung im Luftverkehr üblich ist. Vorgaben dieser Art zielen einerseits auf die Sozialverträglichkeit der Dienstplanung, andererseits auf eine Integration der Dienstplanung und der nachfolgenden Dienstreihenfolgeplanung. Der Dienstmix ist ein typisches weiches Nebenkriterium: Grobe Abweichungen vom angestrebten Dienstmix sind nicht zulässig, aber ein (vom Anwender zu bestimmendes) Spiel zugunsten eines Hauptplanungsziels ist durchaus möglich.

3.4 Die Integration der Dienstplanung in die Operative Planung

Die beste Dienstplanung ist von geringem Nutzen, wenn sie für “das falsche Problem” vorgenommen wird oder wenn das Zusammenspiel mit den vor- und nachgeschalteten Schritten der operativen Planung nicht stimmt. Schwierigkeiten dieser Art kann man durch eine geeignete *Integration* der Dienstplanung in die operative Planung begegnen. Wir sprechen nun die Punkte an, die dabei zu beachten sind.

Periodenzuordnung. Der Ausgangspunkt dieser Betrachtung ist die Durchführung der Dienstplanung in Teilschritten für einzelne *Planungshorizonte* (i.d.R. Betriebstage). Wenn sich zwei Planungshorizonte überlappen (z.B. bei 30-stündigen Betriebstagen), ergibt sich das Problem, daß sich einzelne Dienstelemente durchaus zwei Planungshorizonten zuordnen lassen. ist von erheblicher Bedeutung, da die Überlappungszonen bei Nachtbetrieb durchaus bis zu 20% der gesamten Dienstmasse eines Betriebstages enthalten können.

Wir schlagen zur Berücksichtigung der Zuordnungsproblematik die Verwendung von sog. *optionalen Dienstelementen* vor. Optionale Dienstelemente werden der Dienstplanung als Dispositionsmasse zur Verfügung gestellt und können, müssen aber nicht, zur Bildung von Diensten verwendet werden.

Damit bietet sich die folgende *Vorgehensweise* bei der Dienstplanung an. Wir gehen davon aus, daß alle Dienstelemente bis zu einem gewissen Stichpunkt (z.B. bis zum Beginn eines Betriebstages um 0 Uhr) bereits vollständig verplant sind. Ab diesem Zeitpunkt sind einige "späte Dienstelemente" aus Umläufen, die in der Vorperiode beginnen, noch unverplant, während dafür einige "frühe Dienstelemente" aus Umläufen der gerade betrachteten Planungsperiode bereits verplant sind. In dieser Situation werden alle noch unverplanten Dienstelemente dieser Planungsperiode als Dienstmasse zur Disposition gestellt. Dabei sind alle Dienstelemente bis zum nächsten Stichpunkt (in unserem Fall z.B. 24 Uhr abends) notwendig zu verplanen, d.h. diese müssen von einem Dienst überdeckt werden. Die restlichen Dienstelemente (nach 24 Uhr) werden optional verplant. Mit der folgenden Periode wird ebenso verfahren usw. Unser Optimierungsansatz unterstützt optionale Dienstelemente. Ihre Verwendung hat den Vorteil, daß die Optimierung anhand der vom Planer vorgegebenen Zielkriterien entscheidet, welche optionalen Dienstelemente in der aktuellen Periode verplant werden. Optionale Dienstelemente sind planerische Freiheitsgrade, die zur Optimierung genutzt werden können.

Betriebliche Stabilität. Manche Verkehrsbetriebe lehnen die gerade beschriebene Art der Planung ab, da sich mit ihr für jeden Planungstag ein neuer unterschiedlicher Dienstplan ergeben wird. Sie fordern eine *Stabilität* des Dienstplans über die Woche oder zumindest für die Tage mit gleichem Umlaufplan.

Wir schlagen zur Berücksichtigung dieser Forderung einen vorgeschalteten Schritt zur Planung gemeinsamer Dienste vor. Hierzu werden zunächst die Dienstelemente ermittelt, die in allen zu synchronisierenden Perioden in gleicher Weise auftreten. Diese Dienstmasse wird wie gewohnt verplant. Der Planer untersucht anschließend die gebildeten Dienste und entscheidet, welche von diesen er tatsächlich festschreiben möchte. Die ausgewählten Dienste werden für alle Perioden des Synchronisierungszeitraumes fixiert. Die verbleibende Dienstmasse wird dann wie bereits beschrieben periodenweise verplant.

Anpassungsoptimierung. Eine häufige Situation der betrieblichen Praxis ist die *Anpassung* einer bereits vorhandenen Planung an geringfügige Änderungen der Eingabedaten, und zwar mit möglichst geringen Abweichungen von der ur-

sprünglichen Planung. Wir schlagen hierzu die folgende Technik vor: Dienste, deren Daten und Zulässigkeit sich nicht verändert haben, werden fixiert; die restliche Dienstmasse wird neu verplant.

Dienstreihenfolgeplanung. Das Ergebnis der Dienstplanung ist Input für die nachgeschaltete Dienstreihenfolgeplanung. Damit die Einordnung der Dienste in ein vorgegebenes Turnusschema möglich ist, wird ein Dienstmix benötigt, der dem Verhältnis der Positionen im Turnusschema entspricht. Eine solche Vorgabe ist eines der Zielkriterien, die wir bereits im Unterabschnitt 3.3 diskutiert haben.

4 Mathematische Optimierung

In diesem Abschnitt stellen wir unser Optimierungssystem zur Dienstplanung vor. Das System besteht aus zwei Teilen: Einem mathematischen Optimierungskern, der von der konkreten Ausgestaltung des Dienstplanungsproblems eines speziellen Verkehrsbetriebes unabhängig ist, und einem Interface, das die Anpassung an konkrete betriebliche Regelungen realisiert und den Optimierungskern bedient. Beide Komponenten basieren auf einem mathematischen Modell des Dienstplanungsproblems, das seinerseits die Grundlage für die algorithmische Behandlung des Problems mit Hilfe eines Set-Covering- bzw. Set-Partitioning-Ansatzes der ganzzahligen Programmierung bildet. Dabei dienen sog. Dienstgeneratoren (Verfahren, die auf Anforderung einzelne Dienste mit gewünschten Eigenschaften bilden können) dazu, einen durch ein ganzzahliges lineares Programm (LP) repräsentierten Dienstplan schrittweise aufzubauen, zu verbessern oder in der Qualität abzuschätzen.

Die Behandlung des ganzzahligen LPs im Optimierungskern ist losgelöst von den Einzelheiten der Dienstplanung. Damit wird es möglich, für das mathematische Kernproblem effiziente Algorithmen zu entwickeln, während durch das Interface gleichzeitig breite Einsatzmöglichkeiten bei der Dienstplanung im ÖPNV und auch in anderen industriellen Anwendungen gegeben sind.

Wir wollen im folgenden darstellen, wie das in Abschnitt 3 beschriebene Regelwerk der Dienstplanung mit dieser *Methodologie* korrekt behandelt werden kann und wie die darin enthaltenen planerischen Freiheitsgrade zur Optimierung genutzt werden können. Dabei gehen wir insbesondere auch auf die Steuerungsmöglichkeiten des Planers ein, der das Optimierungssystem auf vielfältige Weise an verschiedene betriebliche Anforderungen anpassen kann. Alle möglicherweise einmal auftretenden Anforderungen kann natürlich kein Entwickler voraussehen. Aber das Interface/Kern-Design unseres Systems ist sehr offen. Damit besteht ein Potential zur Weiterentwicklung in der Zukunft, das unseren Ansatz nachhaltig macht.

Unsere Beschreibung ist keine strenge *mathematische Diskussion* von Modellen und Algorithmen; hierzu verweisen wir den interessierten Leser auf die Literatur. Borndörfer, Grötschel & Löbel [1998a,1998b] geben eine Einführung in

bzw. Übersicht über die mathematische Optimierung von Transportsystemen, das Buch Dell'Amico, Maffioli & Martello [1997] ist eine sehr gute aktuelle kommentierte Bibliographie zur Kombinatorischen Optimierung, die Proceedingsbände Liebling & de Werra [1997] und Birge & Murty [1994] der beiden *letzten International Symposia on Mathematical Programming* stellen den aktuellen Stand der mathematischen Optimierung dar, während der darin enthaltene Übersichtsartikel Barnhart, Johnson, Nemhauser, Savelsbergh & Vance [1994] die Technik des Branch-and-Price beschreibt.

4.1 Mathematische Dienstplanungsmethodik

Die folgende Beschreibung der mathematischen Dienstplanungsmethodik ist parallel gehalten zur Darstellung der Dienstplanung in Abschnitt 3. Wir beginnen mit einem mathematischen Graphenmodell, das die Dienstbestandteile abbildet. Pfade stellen darin die Dienste dar. Die Kriterien der Dienstplanung werden durch verschiedene Kostenmodelle widergespiegelt. Den Abschluß bildet ein Abriß der Optimierungsmethodik.

Dienstplanungsgraph. Grundlegend ist ein graphentheoretisches Modell des Dienstplanungsproblems. Der wichtigste Bestandteil dieses Modells ist ein *Dienstplanungsgraph,* der die Dienstbestandteile abbildet. Die Knoten des Graphen entsprechen Dienstelementbestandteilen (DBen) und Ergänzungselementen (EEen), die Bögen entsprechen Verknüpfungen, siehe Abbildung 1. Knoten und Bögen werden mit entsprechenden Attributen (wie in 3.2 beschrieben) gelabelt.

Zwischen DBen und EEen bestehen allerdings Unterschiede. Während für jeden DB sinnvollerweise genau ein Knoten eingeführt wird, steht zunächst nicht fest, welche EEe später benötigt werden. Und auch die genaue zeitliche Lage der EEe hängt von deren Kombination nach der Positionslogik ab. Diese Unsicherheiten lassen sich auflösen, wenn man für alle möglichen Kombinationen von EEen eigene Knoten mit entsprechenden Verknüpfungen einführt. Das Ergebnis ist für jedes Dienstelement (DE) eine “Umgebung”, wie sie in Abbildung 2 gezeigt ist, entsprechendes gilt für übergangsabhängige EEe. Dieser Trick erlaubt es, die a posteriori Daten für die EEe durch eine Enumeration aller Kombinationsmöglichkeiten in a priori Daten umzuwandeln, die als Input für die Dienstplanung verwendet werden können.

Der Dienstplanungsgraph stellt damit eine Repräsentation von Tätigkeiten (DBe und EEe) durch Knoten und deren *lokale Kombinationsmöglichkeiten* in Diensten durch Bögen dar. Je nach Definition der Bögen ergibt sich eine mehr oder weniger große, beliebig *steuerbare* Kombinierbarkeit. Der Planer kann im Extremfall alle technisch möglichen Verknüpfungen zulassen, aber auch nach beliebigen Kriterien unerwünschte Kombinationen herausfiltern, oder den Graphen auf andere Art in seinem Sinne manipulieren. Entsprechend können auch den Knoten und Bögen weitere Attribute zugeordnet werden, falls zusätzliche Faktoren bei der Planung berücksichtigt werden sollen.

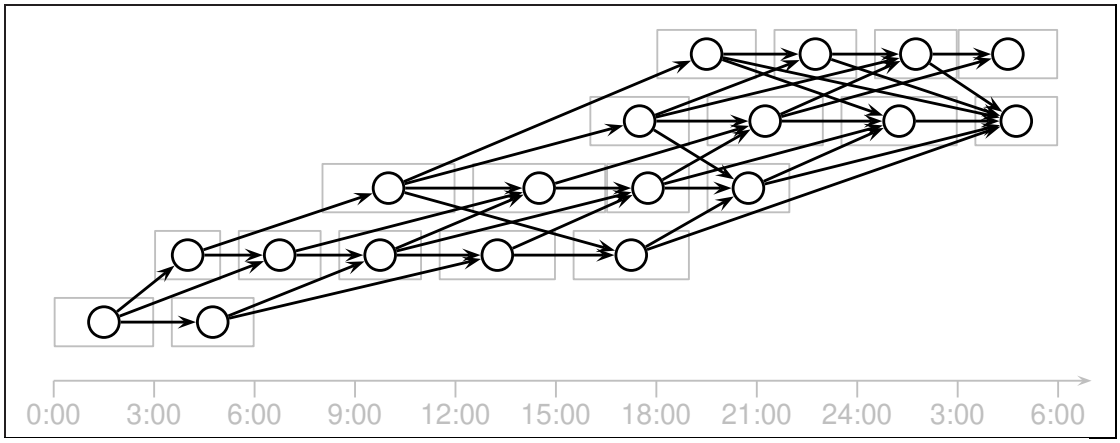

Abbildung 1: Ein Dienstplanungsgraph.

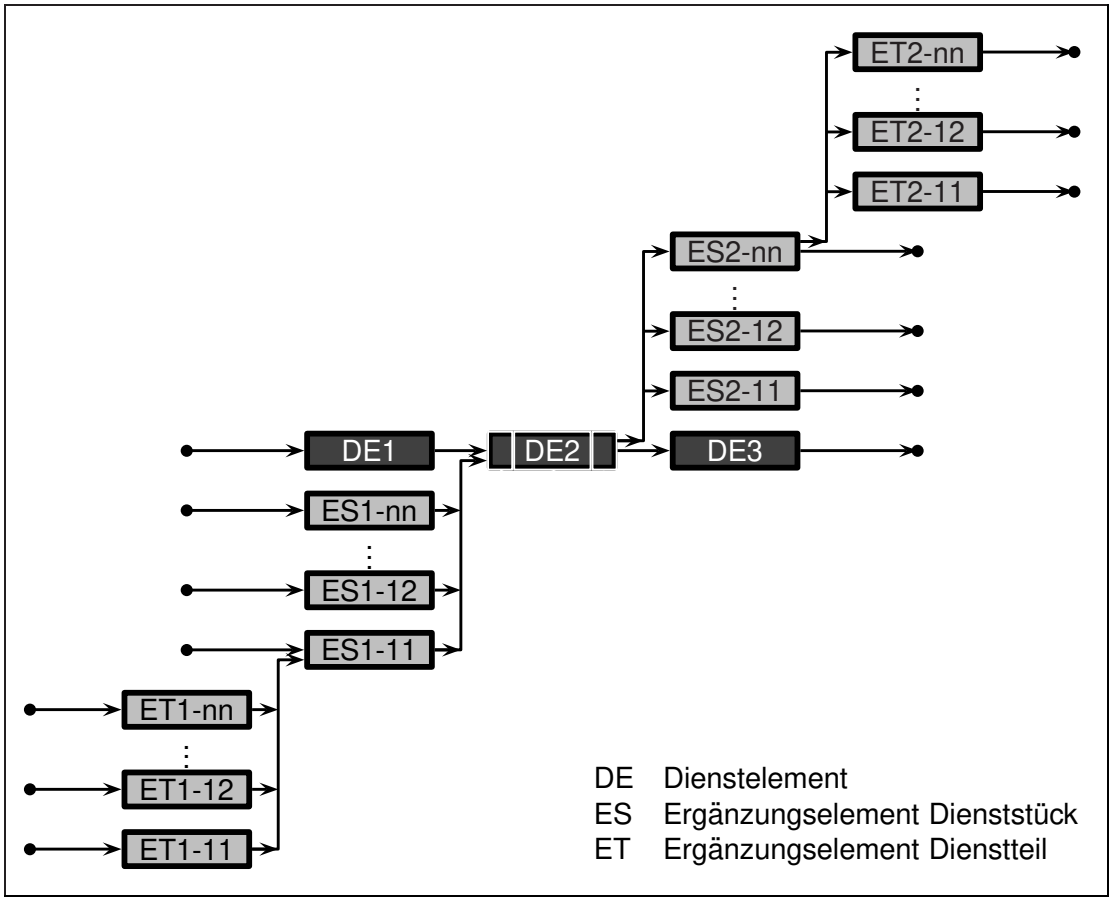

Abbildung 2: Die Umgebung des Dienstelementes DE2.

Dienstplanungsgraphen sind konzeptionell einfache Objekte. In der Praxis will ihre Modellierung aber nicht nur aus planerischen, sondern auch aus *daten-technischen* Gründen wohlüberlegt sein. Je komplizierter das Modell, desto mehr Daten muß der Verkehrsbetrieb erheben und warten (können), vgl. auch

Unterabschnitt 5.6. Die größte Bedeutung hat hier die Pflege von Streckeninformationen zur Definition von Verknüpfungen zwischen Dienststücken, was einen unmittelbaren Einfluß auf die planerische Freiheit nimmt. Auch die Erzeugung und Manipulation des Graphen sind informatische Herausforderungen. Immerhin geht es um Tausende von Knoten und Millionen von Bögen, die aus den Planungsdaten des Verkehrsbetriebs gemäß den planerischen Vorgaben für die Optimierung erzeugt werden.

Pfade mit Ressource-Constraints. Spiegeln die Bögen die lokale Kombinierbarkeit von Tätigkeiten wieder, so entsprechen die Dienste *Pfaden* im Dienstplanungsgraphen. Aber nicht alle Pfade entsprechen zulässigen Diensten. Dies ist nur dann der Fall, wenn ein Pfad einer vom Planer spezifizierten Dienstart zugeordnet werden kann. In der Regel ist eine Dienstart durch eine Reihe von sog. *Ressource-Constraints* in den Attributen der Knoten und Bögen definiert. Ressource-Constraints sind Bedingungen, die besagen, daß Summen, Maxima oder sonstige Kombinationen von Knoten- und Bogenattributen dienstartabhängige Werte nicht über- oder unterschreiten dürfen. Beispiele sind etwa Zeitfenster für die Startzeit des ersten Dienstteils, die Spezifikation der Gesamtarbeitszeit einer Dienstart, oder die Pausenregelung.

Solche Ressource-Constraints können in den einzelnen Verkehrsbetrieben sehr verschiedene Ausprägungen haben. Entscheidend ist für uns, ob sich einzelne Pfade mit diesen Eigenschaften auf Anforderung effektiv berechnen lassen — und zwar zielorientiert. Hierzu werden Verfahren, sog. *Dienstgeneratoren,* benötigt, die vereinfacht gesagt für einen gegebenen Dienstplan auf Anforderung Dienste erzeugen können, die zu einer Verbesserung des Dienstplans führen können. Die Steuerung übernimmt dabei ein ganzzahliges Programm.

In der Regel sind die meisten Ressource-Constraints im (komplexitäts-) theoretischen Sinn schwierig zu handhaben. Die Erzeugung guter Dienste ist die algorithmische Hauptschwierigkeit der Dienstplanung. Allgemein kann man alle Dienstarten mit Hilfe von sog. dynamischen Programmen erzeugen. Die Crux ist, das diese Verfahren bis zur Unbrauchbarkeit langsam ablaufen können, wenn man nicht sehr sorgfältig arbeitet. Zu praktisch brauchbaren Lösungen kommt man, wenn die Pfade aus relativ wenigen Bestandteilen bestehen oder die Anzahl möglicher und sinnvoller alternativer Fortsetzungen eines Teilpfades nicht zu groß ist. Hier ist die Kunst des Entwicklers gefragt, durch Vermeidung von Sackgassen in den Berechnungen und durch mathematische und informatische Einsicht und auch durch Tricks “das Schwierige möglich zu machen”.

Für unser Optimierungssystem entwickeln wir eine ganze Reihe von derartigen Generatoren für die uns bekannten Dienstarten, z.B. einen Generator zur Erzeugung von geteilten Diensten. Die Generatoren werden durch die Parameter der zugehörigen Dienstarten *kalibriert*, d.h. die erzeugten Dienste entsprechen der Spezifikation dieser Dienstart. Der Planer hat damit weitreichende Möglichkeiten, die Diensterzeugung nach seinen Wünschen zu beeinflussen. Und wenn doch einmal Dienste einer neuen Dienstart gewünscht werden, für die es keinen Generator gibt, so ist das System in dem Sinne offen, daß ein entspre-

chender Dienstgenerator auch noch nachträglich ergänzt werden kann, ohne daß an den anderen Optimierungskomponenten etwas geändert werden muß.

Optimierungskriterien. Eine Menge von (Dienst)Pfaden ist dann ein Dienstplan, wenn alle DB-Knoten von einem (oder auch von genau einem) Dienst überdeckt werden. Die Dienstplanung ist damit ein Problem des Überdeckens von Knoten durch Pfade. Für solche Fragestellungen sind in der ganzzahligen Programmierung dynamische *Set-Covering-Ansätze* (oder auch Set-Partitioning-Ansätze, falls eine eindeutige Überdeckung gewünscht wird) entwickelt worden. Die Ansätze modellieren das Pfadüberdeckungsproblem konzeptionell als ein ganzzahliges lineares Programm der Form

$$\min c^T x,\ Ax \geq 1,\ x \in \{0,1\}^n.$$

A ist dabei eine *m*x*n* 0/1-Matrix, deren Zeilen den zu überdeckenden DBen entsprechen. Die Spalten sind die Inzidenzvektoren aller möglichen Pfade, d.h., das i-te Element einer Spalte ist genau dann 1, falls der Dienst das i-te DB umfaßt. *c* ist ein Vektor von Zielfunktionskoeffizienten für jeden einzelnen Pfad (Dienst). Die Variablen des Programms entsprechen damit der Auswahl (1) oder Nichtauswahl (0) von Pfaden (Diensten). Die Gleichungen spiegeln die Bedingungen wider, daß jeder DB von mindestens einem Pfad überdeckt werden muß. Die Zielfunktion besagt, daß eine günstigste Kombination von solchen Pfaden gesucht wird, wobei sich die Gesamtkosten als Summe von Bewertungen einzelner Pfade darstellen.

Das *Kostenmodell* dieses Programms ist sehr flexibel. Die Bewertung eines Dienstes kann beliebige Komponenten für die Bestandteile (also für Knoten und Bögen) und für den Dienst selbst enthalten (z.B. die Bewertung der Abweichung vom angestrebten Dienstschnitt). Zu beachten ist dabei allerdings, daß diese Kostenkriterien von den Generatoren der Diensterzeugung algorithmisch gehandhabt werden können. Dies ist z.B. dann gegeben, wenn sich die Gesamtkosten eines Dienstes additiv als Summe von Kostenanteilen für die Dienstart und für die Bestandteile ergeben. Diese Konstruktion, zusammen mit der Möglichkeit der Bildung beliebiger Dienstarten, deckt die gängigen Kostenmodelle der Praxis ab.

Von etwas anderer Qualität sind die weichen Kriterien. Anforderungen wie der Dienstmix können als zusätzliche Nebenbedingungen formuliert werden. Eine Beschränkung auf die Anzahl *f* der Frühdienste ergibt in der Sprache der ganzzahligen Optimierung eine Ungleichung der Form $\sum_{j \in F} x_j \leq f$, wobei *F* die Menge aller Frühdienste bezeichnet. Dies führt auf die Betrachtung allgemeiner linearer Zusatzbedingungen, der sog. *Base-Constraints*, die approximativ zu behandeln sind. Dies ist mit Hilfe von sog. Lagrange-Techniken möglich. Dabei wird die Einhaltung der Zusatzbedingung zu einem Mit-Optimierungsziel erklärt, das je nach algorithmischer Steuerung “mehr oder weniger Ernst genommen wird”.

Ganzzahlige Programmierung mit Dynamischer Spaltenerzeugung. Es bleibt noch die algorithmische Behandlung des Set-Covering-Modells zu erläu-

tern. Dem aufmerksamen Leser wird nicht entgangen sein, daß dieses Modell von gigantischer Größe ist, da es eine Variable für jeden einzelnen Dienst enthält. Es ist ausgeschlossen, ein solches Programm explizit aufzuschreiben, geschweige denn, über solche Datenmengen explizit zu optimieren.

Der Lösungsansatz ist, mit einer relativ kleinen Mengen von Diensten explizit zu rechnen, während der Rest der Dienste, die im optimalen Dienstplan ohnehin nicht enthalten sind, *implizit* behandelt werden. Implizit behandeln heißt hier, für einen gegebenen Dienstplan Kriterien zu finden, die sicherstellen, daß alle nicht explizit erzeugten Dienste auch zu keiner Verbesserung eines gegebenen Dienstplans beitragen können. Solche Kriterien sind die aus der Theorie der Linearen Programmierung bekannten *Schattenpreise*, welche die *marginalen* Kosten der Dienstbestandteile in einem Dienst angeben, und durch die Berechnung von sog*. Reduzierten Kosten* eines Dienstes eine Abschätzung der potentiellen Verbesserung des Zielkriteriums erlauben.

Damit ergibt sich die folgende Vorgehensweise, die als Column-Generation- oder *dynamische Spaltenerzeugungstechnik* bezeichnet wird. Ausgangspunkt ist eine gegebene Menge von Diensten (die man im ersten Schritt z.B. heuristisch bestimmen kann). Diesen Diensten entspricht ein (kleiner) Teil des globalen Set-Covering-Modells. Dieses sog. Master-Problem ist derjenige Teil, der nach dem Streichen aller nicht explizit berechneten Dienst-Spalten übrig bleibt. Nun werden mit LP-Techniken die Schattenpreise der Dienstbestandteile ermittelt und den Dienstgeneratoren bekanntgegeben. Jeder Dienstgenerator prüft für seine Dienstart, ob es Dienste mit negativen reduzierten Kosten gibt, d.h. ob es Dienste gibt, die zu einer Verbesserung des Gesamtplans führen können. Wenn ja, werden die Daten für diese Dienste erzeugt und die entsprechenden Spalten dem System hinzugefügt. Diese veränderte Situation wird wieder auf dieselbe Weise auf Optimalität überprüft usw.

Der *Vorteil* dieser Vorgehensweise besteht in dem globalen Überblick des ganzzahligen Programms. Dieser erlaubt eine Adaption der Dienstgeneratoren an die Problemcharakteristik. Dienste werden damit nicht blind, sondern zielgerichtet erzeugt. Die Veröffentlichungen aus dem Bereich des Luftverkehrs zeigen, daß in der Praxis auf diese Weise meist relativ schnell ein guter Dienstplan erzeugt werden kann.

Am Ende wird die Schleife “Dienstbewertung — zielgerichtete Diensterzeugung” aber nur in Ausnahmefällen mit dem Zertifikat “optimal” abgebrochen. Irgendwann schlägt in der Praxis die Komplexität des Dienstplanungsproblems durch. Dann versagen die Dienstgeneratoren, d.h. sie sind weder in der Lage, einen verbessernden Dienst zu liefern, noch zu beweisen, daß es keinen solchen gibt.

Aber auch in diesem Fall gibt es noch Möglichkeiten. Einerseits kann man mit Hilfe eines Divide-and-Conquer Ansatzes das Problem in zwei kleinere Probleme zerlegen. Diese Technik, die *Branch-and-Price* genannt wird, kann man rekursiv anwenden, bis das Problem in triviale Einzelbestandteile aufgelöst ist. Im Extremfall kann dies allerdings auf die vollständige Enumeration aller Mög-

lichkeiten hinauslaufen. Oder, und vielleicht praxisnäher, man kann wieder mit Hilfe von reduzierten Kosten eine Aussage darüber machen, um wieviel man sich maximal noch verbessern könnte (ohne die beste Lösung berechnen zu können!). Wenn die Güte der Planung als hinreichend erachtet wird (z.B. höchstens noch 1% *Luft*) kann man auch einfach mit einer *solchen Näherungslösung bekannter Qualität* abbrechen. Diese gewünschte Planungsqualität ist einer von mehreren algorithmischen Parametern, die der Planer zu Steuerung des Verfahrens einsetzen kann.

4.2 Das Optimierungssystem

Unser Gesamtsystem besteht aus den folgenden Komponenten:

1. Einer Datenbankanbindung zur Pflege und Verwaltung von betrieblicher Information und von Planungsszenarien.
2. Modulen zur *Erzeugung* und Manipulation von Dienstplanungsgraphen.
3. *Dienstgeneratoren* für die verschiedenen parametrisierten Dienstarten.
4. Einem mathematischen *Optimierungskern* und einer Reihe von Heuristiken zur schnellen Berechnung von Lösungen und unteren Schranken.

Wir stehen gegenwärtig in der Entwicklung dieser Module. Bei dem aufwendigsten Teil, der Entwicklung des Optimierungskerns, geht es dabei um den Vorstoß in die nächste Dimension bei der Lösung von Set-Partitioning-/Set-Covering-Problemen. Dies ist keine reine Frage der Implementation, sondern es müssen auch numerische und algorithmische Hürden überwunden werden.

5 Dienstplanoptimierung in der Praxis

In diesem Abschnitt diskutieren wir Aspekte *der Dienstplanoptimierung in der Praxis*. Wir stellen drei in Deutschland verbreitete Systeme vor, gehen auf die historische Entwicklung, die Gegenwart und die Zukunft der Dienstplanung ein. Wir diskutieren die Optimierungsmöglichkeiten von heute, den Umgang mit Input und Output des Verfahrens, und besprechen Aspekte der Einführung und des Einsatzes der Dienstplanoptimierung in den Verkehrsbetrieben.

5.1 Die Systeme HOT, MICROBUS und BERTA

Die HanseCom GmbH hat mit ihrem Produkt *HOT* mehr als zwanzig Jahre Erfahrung in der optimierenden Einsatzplanung im ÖPNV. Das Programmpaket HOT hat (auch durch die Mitarbeit in Projekten wie BISON) prägenden Einfluß auf die Modellierung heutiger Planungswerkzeuge genommen. Die HanseCom hat sich bei der Weiterentwicklung von HOT immer auch auf die optimierenden Komponenten konzentriert. Auch die inzwischen mehrjährige Zusammenarbeit mit dem Konrad-Zuse-Zentrum ist durch diese Ausrichtung entstanden. Das Produkt HOT wird derzeit einem umfangreichen Redesign unterzogen. An des-

sen Ende wird ein Programmpaket auf neuer Plattform und mit neuen Optimierungskomponenten, insbesondere im Dienstplanbereich, stehen.

MICROBUS ist eine Standardsoftware, die in über 100 Verkehrsbetrieben in Europa eingesetzt wird. MICROBUS ist modular aufgebaut und wächst schrittweise mit den Anforderungen. Alle Programmbausteine (Fahr-, Umlauf-, Dienst- sowie Dienstreihenfolgeplanung und Personaldisposition) haben eine einheitliche grafische Benutzeroberfläche und eine gemeinsame Datenhaltung. MICROBUS II nutzt durchgängig die grafische Benutzeroberfläche unter Windows und verwendet ein modernes Datenbank-Management-System (ORACLE). Die Nutzung einer relationalen Datenbank garantiert eine sichere und einheitliche Datenhaltung bei gleichzeitiger Gewährleistung des Zugriffsschutzes. Die Realisierung nach dem Client/Server-Konzept ermöglicht den Einsatz auf unterschiedlichen Hardware-Plattformen mit beliebiger Skalierbarkeit vom Einzelplatzsystem bis zur Nutzung von leistungsfähigen Unix-Servern.

BERTA ist eine Spezialsoftware für die Berliner Verkehrsbetriebe (BVG). Sie basiert ebenfalls auf einer modernen Client/Server Architektur. Als Datenbank dient eine ORACLE Datenbank. Entwicklungs- und Zielplattform sind Power PCs mit den Betriebssystemen AIX und Arbeitsplatzrechner unter Windows NT.

5.2 Dienstplanung in der Vergangenheit

Die Fahrdienstplanung war früher durch folgende Randbedingungen gekennzeichnet:

1. Das Planungsziel war klar umrissen: ein Fahrerdienstplan für einen definierten Zeitraum.
2. Der Planungsprozeß war mehrschichtig von der Haltestellendefinition bis zur fertigen Dienstreihenfolge, aber zentral abgewickelt.
3. Es gab mehr oder weniger starre Regeln für die Planerstellung, die in ebenso starre Programmvorgaben mündeten.
4. Die Dienstplaner agierten real flexibler als nach außen dargestellt (Graubereich des Gestaltungsspielraums ohne Pendant im Dienstplanprogramm).
5. Der Betriebsfrieden ging vor Wirtschaftlichkeit.

Die Konzentration auf den einzelnen Plan, der von zentraler Stelle erarbeitet wurde, führte zu sehr individuellen Planungsergebnissen mit inhaltlichen Präferenzen, die i.d.R. nicht dokumentiert wurden (z.B. Verteilung von Dienstarten oder bestimmte Fahrten/Linien in bestimmten Diensten). Die zum Teil unscharfen Regeln der manuellen Planung ließen deren Resultate oft besser aussehen als die Ergebnisse eines optimierenden Programms, das an scharfe Vorgaben gebunden war. Im Übrigen war die Erhöhung der Wirtschaftlichkeit nicht wirklich oberstes Ziel der Planungsarbeit. Deshalb fand Optimierung keine Marktverbreitung und wurde, soweit vorhanden, nicht wirklich genutzt.

5.3 Dienstplanung heute

Im Gegensatz zur Vergangenheit beobachten wir heute:

1. Das Planungsziel ist vielschichtiger geworden.
2. Der Planungsprozeß gestaltet sich zwangsläufig flexibler.
3. Die Planungsarbeit ist in das innerbetriebliche Blickfeld gerückt, die Arbeit der Planer dadurch transparenter geworden.
4. Wirtschaftlichkeit steht eindeutig vor Betriebsfrieden.
5. Die Datenmodellierung wie auch die Algorithmen sind flexibler geworden.
6. Der Softwareingenieur und der Planer sind zusammengerückt.

Die Dienstplanung heute ist gekennzeichnet durch erheblich komplexere Planungsobjekte. Dienstinhalte müssen vermehrt ökonomische und soziologische Gesichtspunkte berücksichtigen (z.B. Multifunktionsdienste und Gruppendienste). Die Zahl der zu erzeugenden Planvarianten für die unterschiedlichsten Ereignisse und Zeiträume hat dramatisch zugenommen (ein bis zwei Jahresfahrpläne früher gegenüber bis zu zwanzig Fahrplänen pro Jahr heute). Die Planungsarbeit — früher eher ein Randthema in ÖPNV-Betrieben — rückt mehr und mehr in den Mittelpunkt. Die Resultate werden nicht mehr selbstverständlich hingenommen, sondern hinterfragt: “Was kostet wieviel?”, “Wieviel Reserven enthält der Plan?”, usw. Der Kostendruck durch die Öffnung des ÖPNV zum Wettbewerb hat eine Umkehr der Prioritäten von Betriebsfrieden und Wirtschaftlichkeit bewirkt.

Die geänderten Anforderungen können von heutigen DV-Lösungen bewältigt werden, da auch die DV-Verfahren flexibler geworden sind (Parameter mit fließenden Grenzbereichen, weiche Regeln, Kosten, Iterationsläufe zur schrittweisen Plangenerierung). Allerdings erfordert dies den Schulterschluß zwischen Softwareingenieur und Dienstplaner, was in der Praxis zunehmend zu beobachten ist. Den heutigen Anforderungen angepaßte Werkzeuge müssen also die Vorteile der Handarbeit (Umsetzung weicher Regeln, schnelle Bearbeitung von Besonderheiten etc.) und der DV (flexible Antwort auf vermehrte Planungsarbeit) vereinen. Sie müssen den Planer insbesondere dabei unterstützen, eine schnelle Antwort auf wirtschaftliche Fragen seiner Unternehmensführung zu finden (“Wieviel kostet eigentlich welche Pausenregelung?”).

5.4 Die Zukunft — Trends und Möglichkeiten

Die aktuell auf der Anwenderseite zu beobachtenden Entwicklungen sind im wesentlichen die weiteren Konsequenzen des bereits genannten Wettbewerbsdrucks. Alle Forderungen der oben beschriebenen Gegenwart gelten selbstverständlich auch in Zukunft. Die bisher eingesetzten Werkzeuge weisen konzeptionelle Schwächen auf, deren Ursachen in den Grenzen der bisher verfügbaren Rechenleistung liegen. Diese Aspekte und weitere neu hinzukommende Anforderungen werden zu einem tiefgreifenden Umbruch der Dienstplanung führen, sowohl organisatorisch wie DV-technisch. Die Trends der Zukunft sind:

1. Die voranschreitende Arbeitszeitflexibilisierung wird ein Überdenken der klassischen Dienstreihenfolgenbildung erfordern.
2. Die Organisationsstrukturen werden fließend und vielschichtiger.
3. Um verfügbare Ressourcen optimal (am ÖPNV-Markt) einsetzen zu können, wird der Planungsansatz nicht mehr nur angebotsbezogen, sondern auch kapazitätsbezogen erfolgen müssen.
4. Erfahrungen aus der Vergangenheit zeigen, daß die phasenorientierte Planung — insbesondere die getrennte Optimierung von Fahrzeug- und Personaleinsatz — zu unzulänglichen Programmergebnissen führt. Die Fortschritte in der DV-Technik und in der angewandten Mathematik führen zu neuen integrierten Ansätzen.

Mit der voranschreitenden Arbeitszeitflexibilisierung ergibt sich die Notwendigkeit, die geleistete und noch verfügbare Arbeitszeit des einzelnen Mitarbeiters bei der Einsatzplanung zu berücksichtigen (Mitarbeiterkalender oder auch Jahresarbeitszeitkonto). Die klassische Reihenfolgeplanung in Fahrergruppen wird ersetzt durch eine mitarbeiterbezogene Dienstzuordnung. Weiter ist der Trend zu kleineren und damit flexibleren Organisationseinheiten wie z.B. Fahrergruppen zu beobachten. Die Langzeitdienstplanung wird zukünftig daher zweckmäßigerweise nicht mehr an zentraler Stelle, sondern vor Ort und damit getrennt von der Einzeldienstbildung erfolgen. Die künftige Dienstzuordnung wird sowohl Schichtmodelle wie komplexe Dienstzeitmodelle berücksichtigen müssen.

Neben der heute im ÖPNV überwiegend angebotsorientierten Dienstplanung wird als neue Komponente die ressourcenbezogene Dienstplanung treten. Der Planer muß in der Zukunft schnell ermitteln können, ob und wie teuer er zusätzliche Leistung seines Betriebes bereitstellen kann. Nur so wird es den Verkehrsbetrieben ermöglicht, weitere Verkehrsleistung unter wirtschaftlich vertretbaren Bedingungen zu akquirieren. Umgekehrt kann die Prüfung erforderlich werden, welche Auswirkungen auf die Verkehrsleistung eine Auslagerung von Fahrpersonal zur Folge hat (z.B. bei Ausgründungen).

Bei diesen Entscheidungen werden neben den Personalkosten selbstverständlich auch die Fahrzeugkosten eine Rolle spielen. Die Reduzierung auf überschaubare Organisationseinheiten sowie die erweiterten Möglichkeiten heutiger Optimierungsprogramme (mehr Rechenleistung, leistungsfähigere Algorithmen) ermöglicht es, einen seit langem diskutierten Ansatz in Angriff zu nehmen: Die integrierte Fahrzeugumlauf- und Dienstplanoptimierung. Dies erfordert allerdings die umfassende Überarbeitung der heutigen Kostenmodelle in enger Zusammenarbeit zwischen DV- und Planungsfachleuten.

Die Forderung der Zukunft ist also eine integrierte, hochflexible Optimierung, die unter Berücksichtigung der vorgegebenen Parameter möglichst konkrete Planungsergebnisse liefert. Der betriebliche Planer wird mehr denn je gebraucht — aber als Architekt, nicht als Handwerker. Er erarbeitet Zielvorgaben für Kostenmodelle, definiert Parameter und deren Werte und definiert die Zielrichtung von Algorithmen. Den überwiegenden Teil des Handwerks erledigt dann das Programm nach den Vorgaben des Planers.

5.5 Optimierungsmöglichkeiten heute

Softwarelösungen sind kein Allheilmittel, doch unterstützen sie den Optimierungsprozeß im Verkehrsbetrieb in hohem Maße. Optimierungen oder auch Verbesserungen sind in den Bereichen Organisation (Kommunikation, …), Planung (Fahrplan-, Dienstplanerstellung, …), Durchführung (Disposition, …) und Evaluierung (Abrechnungssysteme, Statistiken, …) möglich. Ein Optimierungspotential mit großer Auswirkung liegt im Rahmen der *Planung*, da diese die Basis für alles Weitere darstellt. Ziel der Softwareprodukte im Bereich der Planung ist es zum einen, dem Kunden eine bessere Informationsmöglichkeit zu bieten (Auskunftssysteme auf Diskette, CD-ROM oder Internet, ggf. hinterlegt mit Karten) und zum anderen Hilfen anzubieten, die es ermöglichen, Einsparpotentiale aufzuzeigen und freizusetzen (Fahrzeuge und Personal).

Wie o.a. gibt es zur Reduzierung des Fahrzeugbedarfes schon eine Reihe von Methoden von unterschiedlicher Qualität. Im Rahmen der Softwareprodukte BERTA und MICROBUS ist ein Umlaufoptimierungsverfahren des Konrad-Zuse-Zentrums integriert. Im Bereich der Reduzierung des Fahrpersonals gibt es noch wenige in der Praxis eingesetzte Verfahren. Die Ursache für die geringe Verbreiterung von *Dienstplanoptimierungsverfahren* (vor allem in Deutschland) liegt darin, daß zum einen die Komplexität der mathematischen Optimierungsalgorithmen aufgrund der hohen Anzahl von Nebenbedingungen (NB) zu groß war, daß spezielle Sonderregelungen zur Bildung der Dienste in Grenzsituationen (durch leichten Regelverstoß ein Dienst gespart) angewandt wurden und daß die Akzeptanz der Sachbearbeiter für den Einsatz von Optimierungsverfahren nicht vorhanden war. In der praktischen Erfahrung im Umgang mit Optimierungsverfahren bei etlichen Verkehrsbetrieben wurde deutlich, daß die Nebenbedingungen die Hemmschwelle sind, die es zum erfolgreichem Einsatz von solchen Verfahren zu überwinden gilt.

5.6 Das Problem der Nebenbedingungen

Mit der Pflege und Verwaltung der *Nebenbedingungen* steht und fällt ein erfolgreicher Einsatz von Optimierungsverfahren. Gerade in Deutschland gilt es stärker als im Ausland, viele gesetzliche, tarifliche und vertragliche Regelungen zu berücksichtigen. Im nachfolgenden werden die beiden unterschiedlichen Vorgehensweisen zur Integration von Nebenbedingungen vorgestellt.

Methode 1: Lösungsansatz High-Input. Der Lösungsansatz *High-Input* geht davon aus, daß *alle* Nebenbedingungen in der Datenbank gepflegt werden. Das bedeutet, alle globalen und vor allem alle lokalen Parameter müssen einmal aufgenommen und danach immer gepflegt und gewartet werden. Ggf. müssen Ausnahmen definiert werden, wie z.B.: Der Dienst auf Linie 3 um 13:15 Uhr kann gegen die 1/6-Regelung um eine Minute verstoßen. Es müssen sinnvolle tageszeit- und ortsabhängige Wegezeiten definiert werden, u.s.w. Fazit: Man

erhält ein Ergebnis, daß sich an den Gesetzen und Vorgaben orientiert, jedoch mit einem sehr hohen Pflege- und Verwaltungsaufwand.

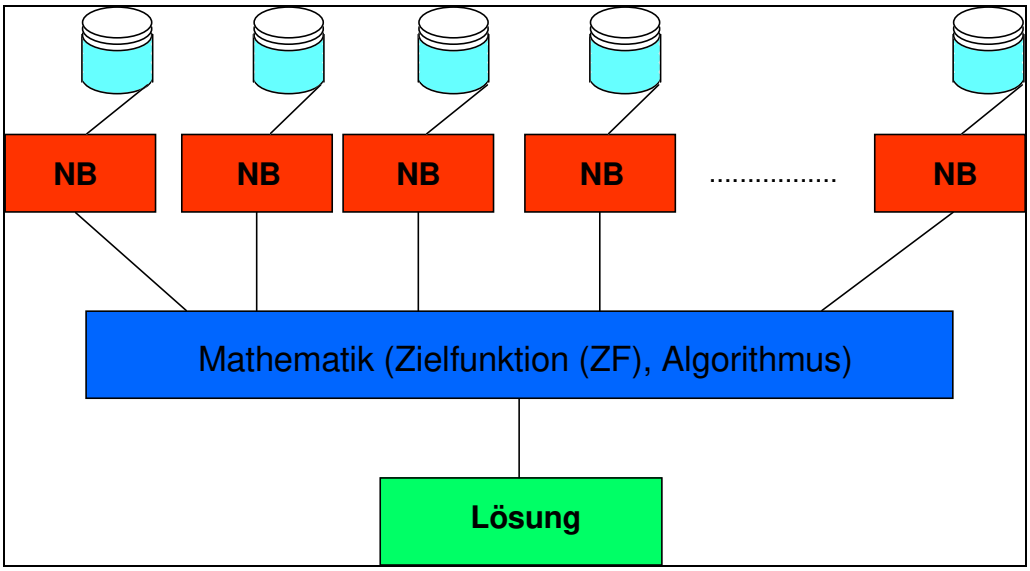

Abbildung 3: Lösungsansatz High-Input.

Methode 2: Lösungsansatz Low-Output. Dieser Lösungsansatz geht davon aus, daß *sehr wenige* NB in der Datenbank gepflegt werden. Dadurch werden Vorgaben mangelhaft berücksichtigt und das Ergebnis ist nicht ansprechend. Fazit: Das resultierende Optimierungsergebnis entspricht nicht den Erwartungen des Planers. Somit ist ein hoher Nachbearbeitungsaufwand unvermeidbar.

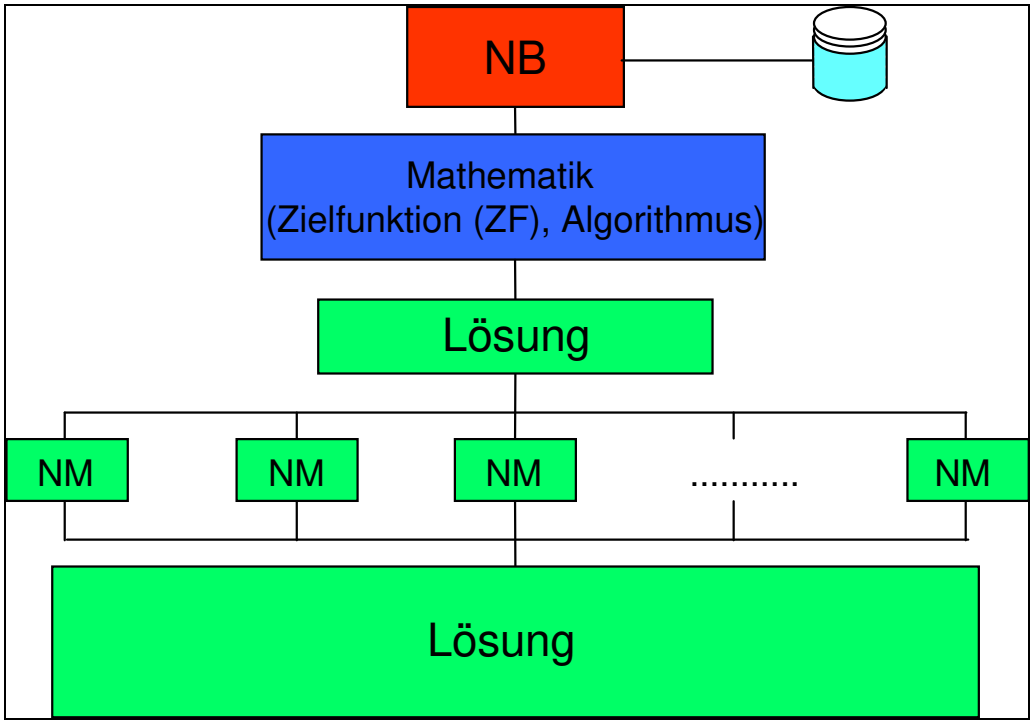

Abbildung 4: Lösungsansatz Low-Output.

Die beiden vorgestellten Methoden sind Extreme. In der Praxis muß ein Mittelweg gefunden werden, der einerseits einen vertretbaren Pflegeaufwand der Nebenbedingungen vorsieht und andererseits ein Ergebnis liefert, daß nur noch in geringem Umfang nachgebessert werden muß. Die Erfahrungen, die in den ersten praktischen Anwendungen mit der Dienstplanoptimierung gemacht wurden zeigen, daß ein höherer Schulungs- und Einführungsbedarf notwendig ist, um die jeweiligen Sachbearbeiter zu qualifizieren.

5.7 Erfolgreiche Einführung der Dienstplanoptimierung durch Qualifiziertes und Motiviertes Personal

Um einen reibungsfreien und erfolgreichen Einsatz der Dienstplanoptimierung zu gewährleisten, ist eine frühzeitige Einbindung der Sachbearbeiter absolut notwendig. Die erfolgreiche Einführung von Optimierungsverfahren bei Verkehrsbetrieben ist sehr stark von der *Motivation* der Sachbearbeiter abhängig. Nur qualifizierte und engagierte Mitarbeiter der Verkehrsbetriebe sollten bei der Einführung mitwirken, da auf diesen Mitarbeiterkreis eine Reihe neuer Aufgaben und Pflichten zukommt. Der Sachbearbeiter muß sich mit einer neuen Arbeitsweise vertraut machen, er muß neue Daten pflegen, die er früher nicht benötigte, und er hat die Aufgabe, Ergebnisse zu bewerten und zu analysieren. Der jedoch schwierigste Punkt ist das Feststellen von *Fehlplanungen* in der Vergangenheit. Mit einem Optimierungsverfahren wird dem Benutzer ein Tool zur Hand gegeben, mit dem er seine eigenen Fehlplanungen feststellen kann und feststellen wird. Diese werden durch Statistiken wie Wirkungsgrade, Anzahl von Fahrzeugen oder Anzahl von Diensten dokumentiert. Wichtig ist, daß dem Sachbearbeiter frühzeitig deutlich gemacht wird, daß die Verbesserungen, die durch den Einsatz von Optimierungsverfahren entstehen, von niemandem per Hand hätten erreicht werden können. Die Komplexität der Möglichkeiten, Fahrten zu Umläufen und Dienststücke zu Diensten zu verknüpfen, ist ab einer gewissen Größenordnung zu komplex, um sie manuell optimal zu leisten. Mit dem Einsatz von Optimierungsverfahren sollen nicht Fehler dokumentiert werden, sondern es ist das Ziel, wirtschaftliche Verbesserungen und Einsparpotentiale für die Zukunft aufzuzeigen.

Literatur

Barnhart, Johnson, Nemhauser, Savelsbergh & Vance (1994). Branch-and-Price: Column Generation for Solving Huge Integer Programs. In Birge & Murty [1994], Seiten 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], Seiten 188–199.

Birge & Murty (Ed.) (1994). *Mathematical Programming: State of the Art 1994*. University of Michigan.

Borndörfer, Grötschel & Löbel (1998a). Alcuin's Transportation Problems and Integer Programming. In Butzer, Jongen & Oberschelp (Ed.), *Karl der Grosse und sein Nachwirken*, Band 2: Mathematical Arts, Seiten 379–409, Brepols, Turnhout, Belgien.

Borndörfer, Grötschel & Löbel (1998b). Optimization of Transportation Systems. Preprint SC 98-09, Konrad-Zuse-Zentrum Berlin, erhältlich via WWW unter URL: www.zib.de. Erscheint in *ACTA FORUM ENGELBERG 98*.

Carraresi, Girardi & Nonato (1995). Network Models, Lagrangean Relaxation and Subgradients Bundle Approach in Crew Scheduling Problems. In Daduna, Branco & Paixão [1995].

Daduna, Branco & Paixão (Ed.) (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], Seiten 133–146.

Daduna & Wren (Ed.) (1988). *Computer-Aided Transit Scheduling*, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. Springer Verlag.

Das Fachwort im Verkehr (1992). Alba Fachverlag, Düsseldorf.

Dell'Amico, Maffioli & Martello (Ed.) (1997). *Annotated Bibliographies in Combinatorial Optimization*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester.

Desrochers, Gilbert, Sauvé & Soumis (1992). CREW-OPT: Subproblem modeling in a column generation approach to urban crew scheduling. In Desrochers & Rousseau [1992], Seiten 395–406.

Desrochers & Rousseau (Ed.) (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 (Ed.), *Network Routing*, Band 8 des *Handbooks in Operations Research and Management Science*, Seiten 35–139. Elsevier Science B.V., Amsterdam.

Desrosiers & Rousseau (1995). Results Obtained with Crew-Opt: A Column Generation Method for Transit Crew Scheduling. In Daduna, Branco & Paixão [1995].

Fengler & Kolonko (1997). Entwicklung von Fahrplänen unter mehrfacher Zielsetzung. *Der Nahverkehr 11/97, Seiten 45–48*.

Gopalan & Talluri (1998). Mathematical Models in Airline Schedule Planning: A Survey. *Annals of OR 76, Seiten 155–185*.

Horner (1995). The Mother of All OR Problems. *OR/MS Today 8/95*.

Keller (Ed.) (1993). *HEUREKA '93: Optimierung in Verkehr und Transport*, Tagungsbericht. FGSV, Köln.

Keller (Ed.) (1996). *HEUREKA '96: Optimierung in Verkehr und Transport*, Tagungsbericht. FGSV, Köln.

Lehner (1978). *Der maximale Wirkungsgrad des Personaleinsatzes*. Handbuch der Verkehrswirtschaft. Alba Buchverlag, Düsseldorf.

Liebling & de Werra (Ed.) (1997). *Lectures in Mathematical Programming. The Mathematical Programming Society, Band 79, Nr. 1–3. Elsevier, Amsterdam.*

Meyer (1997). Regionalisierung und Wettbewerb. *Der Nahverkehr 5/97*.

MICROBUS 2 (1994). IVU GmbH, Berlin.

Rang (1996). *Lenk- und Ruhezeiten im Strassenverkehr*. Verlag Heinrich Vogel, München.

Rousseau (1998). Applying CrewOpt to “Large” Problems. In Wilson [1998].

Rousseau & Blais (1988). Overview of HASTUS Current and Future Versions. In Daduna & Wren [1988].

Rousseau & Wren (1995). Bus Driver Scheduling — An Overview. In Daduna, Branco & Paixão [1995].

Wilson (Ed.) (1998). *Computer-Aided Transit Scheduling*, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. Springer Verlag, Berlin. In Vorbereitung.

Wissenschaftlicher Beirat beim Bundesminister für Verkehr — Gruppe Verkehrstechnik (1984). Zur Bedeutung Interaktiver Planungs- und Organisationshilfen im Verkehrswesen. *Internationales Verkehrswesen 3*.

Wren (Ed.) (1981). *Computer Scheduling of Public Transport: Urban Passenger Vehicle and Crew Scheduling*. North-Holland, Amsterdam.

Yu (1998). *Operations Research in the Airline Industry*. International Series in Operations Research & Management Science. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.