

Algorithmische Fahr- und Umlaufplanung im ÖPNV

# Neue Freiheitsgrade für die Planer

von Reinhard Huschke, Freiburg



1. Jeder Bus zählt: Ziel eines jeden Verkehrsbetriebs ist ein möglichst effektiver Fahrzeug- und Personaleinsatz.  
Aufnahme: IVU

Die wirtschaftliche Lage der kommunalen Verkehrsbetriebe ist angespannt, gleichzeitig nimmt der Wettbewerbsdruck durch Privatanbieter und EU-weite Ausschreibungen von Verkehrsleistungen zu. Durch eine effektivere Betriebsplanung könnten jedoch mancherorts noch Kosten gespart und sogar Ressourcen für eine Verbesserung des Fahrgastangebots freigesetzt werden. Mathematische Verfahren helfen dabei, diese brachliegenden Reserven zu entdecken und zu mobilisieren.

Rund siebenzig Prozent der Kosten, die in einem Verkehrsbetrieb entstehen, sind Personalkosten [4]. Das größte Potenzial zur Effektivitätssteigerung liegt also darin, einen Fahrplan mit möglichst wenig Fahrern und Fahrzeugen umzusetzen. Dies ist leichter gesagt als getan, ist doch die Planung von Fahrzeugumläufen und Fahrdiensten bereits in kleineren Verkehrsbetrieben eine hochkomplexe Aufgabe. Erst recht gilt dies für Großstadtnetze wie das Busnetz des größten deutschen kommunalen Verkehrsbetriebs: Die rund 28.000 Busfahrten auf 160 Linien, die von den Berliner Verkehrsbetrieben (BVG) täglich durchgeführt werden, kann kein Mensch mehr überschauen, geschweige denn die (kosten)optimale Kombination aller Fahrzeug- und Fahrereinsätze von Hand ermitteln.

## Drag and Drop statt Bleistift und Papier

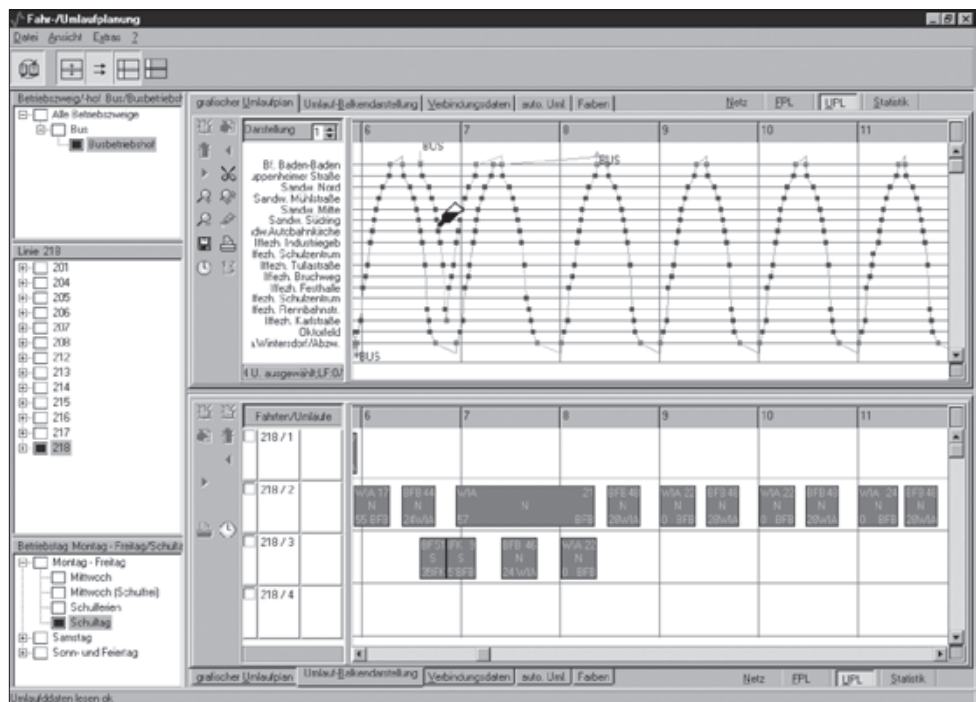
Bei ihrer Betriebsplanung bedienen sich die meisten Verkehrsbetriebe heute leistungsfähiger Software-Werkzeuge, die den Planer mit komfortablen Benutzeroberflächen für die Dateneingabe, Konsistenzprüfungen eingegebener Daten bis hin zur selbständigen Berechnung einzelner Planungsschritte unterstützen. Produkte dieser Art sind zum Beispiel HASTUS (Anbieter: GIRO Inc., Montreal), MICROBUS (IVU Traffic Technologies AG, Berlin), ptv interplan (PTV AG, Karlsruhe), DIVA (MDV Mentz Datenverarbeitung GmbH, München) und andere mehr. Diese Software-Pakete decken mehrere Planungsschritte von der Linien- und

Fahrplanung über die Umlauf- und Dienstplanung (Abb. 2a/b), die Personaldisposition bis zur Lohnabrechnung (inkl. Schnittstellen zu betriebswirtschaftlicher Standardsoftware) ab. In diesen Systemen sind bereits Optimierungsmodule der Art integriert (bzw. deren Integration geplant), wie wir sie in diesem Bericht betrachten wollen.

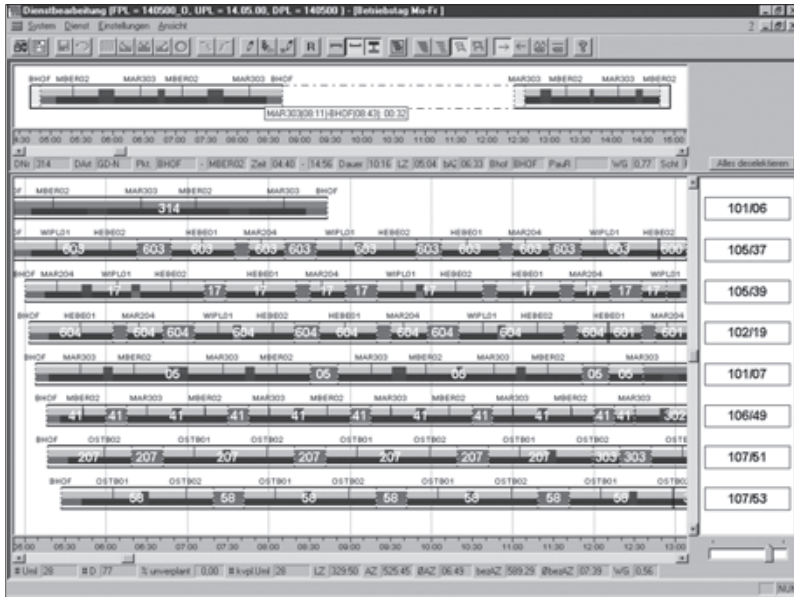
Im Folgenden wollen wir Liniennetz und Fahrplan als gegeben voraussetzen und die Planungsstufen Umlaufplanung und Dienstplanung näher betrachten. In jeder der genannten Planungsstufen sind eine Vielzahl von Bedingungen zu berücksichtigen – bei den Umläufen vor allem die Kompatibilität von Fahrzeugtypen und Routen, bei den Diensten die häufig sehr komplexen arbeitsrechtlichen Bestimmungen und Betriebsvereinbarungen. Die Aufgabe des Planers im Verkehrsbetrieb ist es nun, innerhalb dieses Regelwerks eine Planung hinzubekommen, die sämtliche Betriebsabläufe so effektiv wie möglich gestaltet. Dabei wählt er die nach seiner Erfahrung günstigen Umläufe und Dienste aus, bis sich eine konsistente Gesamtplanung ergibt.

## Mehr Freiheitsgrade durch algorithmische Planung

Bei der „heuristischen“ (erfahrungsgeleiteten) Vorgehensweise schränkt der Planer durch seine Auswahl die Menge der möglichen Lösungen schrittweise ein; dies kann (je nach seinem planerischem Talent) zu akzeptablen bis sehr guten Lösungen führen, allerdings wird durch die frühzeitige Eliminierung weniger sinnvoll erscheinender Varianten möglicherweise eine noch bessere Gesamtlösung verhindert. Deshalb versuchte man bereits in den 1980er Jahren, „algorithmische“ Methoden einzusetzen: Dabei handelt es sich um mathematische Rechenverfahren, die systematisch (und unvoreingenommen) die gesamte Menge möglicher Planungsvarianten nach der hinsichtlich vorgegebener Bedingungen und Planungsziele optimalen Lösung durchsuchen. Die ersten Programme dieser



2a. Den Planern stehen leistungsfähige Software-Werkzeuge zur Verfügung – hier die grafische Bearbeitung der Umlaufplanung mit der Software ptv interplan.  
Abbildung: PTV



2b. Dienstplanung mit der Software MICROBUS 2

Abbildung: IVU

Art waren allerdings sehr langsam, kompliziert und wenig benutzerfreundlich: Ergebnisse der Optimierungsrechnungen lagen erst nach Tagen und Wochen vor, und die Planer mussten „halbe Mathematiker“ sein, um mit den Systemen arbeiten zu können.

Heute, mehrere Computergenerationen später, hat sich das Bild grundlegend gewandelt: Bessere Algorithmen und leistungsfähigere Rechner liefern Ergebnisse binnen Minuten oder Stunden. Allein in den zehn Jahren zwischen 1987 und 1997 hat sich die Bearbeitung komplexer linearer Probleme, die bei Optimierungsaufgaben zu lösen sind, um den Faktor 106 beschleunigt, wobei die Hardware und die verwendeten Algorithmen gleichermaßen um einen Faktor 1000 schneller geworden sind. Eine Rechnung, die früher ein Jahr gedauert hätte, kann also jetzt in 30 Sekunden durchgeführt werden [5]. Die Bedienung der heute üblichen grafischen Oberflächen setzen keinerlei Kenntnis der mathematischen Abläufe mehr voraus, der Planer arbeitet ausschließlich mit den ihm vertrauten Begrifflichkeiten.

Zu den Pionieren dieser „neuen Generation“ algorithmischer Optimierungsverfahren in Deutschland gehört das Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik in Berlin (ZIB). Seit Anfang der 1990er Jahre entwickeln Prof.Dr. Martin Grötschel und seine Mitarbeiter im ZIB-Arbeitsbereich „Scientific Computing“ Optimierungsalgorithmen für ÖPNV-Anwendungen; seit Mitte der 90er Jahre entstanden dort im Rahmen von BMBF-Forschungsprojekten (Bundesministerium für Forschung und Bildung) gemeinsam mit Industriepartnern und Verkehrsbetrieben Software-Module für die Optimierung von Fahrzeugumläufen, Dienstplänen sowie – zur Zeit noch in der Übergangsphase vom wissenschaftlichen Prototypen zum alltagstauglichen Tool – für die integrierte Umlauf- und Dienstplanung. Diese Module werden von den ZIB-Entwicklern in ihrer eigenen Firma (Löbel, Borndörfer & Weider GbR) gepflegt, weiterentwickelt und von der IVU in ihrem Planungssystem MICROBUS 2 vermarktet.

Der aktuelle Stand und die Möglichkeiten der mathematischen Optimierung im ÖPNV sollen am Beispiel der ZIB-Entwicklungen kurz dargestellt werden.

### Stufe 1: Umlaufoptimierung

Nach betriebswirtschaftlicher Rechnung schlägt jeder Bus jährlich mit 150.000-200.000 EUR zu Buche. Oberstes Ziel der Umlaufplanung ist es daher, den vorgegebenen Fahrplan in der Spitze mit einer minimalen Anzahl von Bussen zu bedienen; in zweiter Linie ist die Einsatzzeit der Fahrzeuge zu minimieren, was unter anderem durch flexiblere Übergänge von Fahrzeugen von einer auf eine andere Linie erreichbar ist. Als Randbedingung bei Linienübergängen ist zu berücksichtigen, dass nicht jeder Fahrzeugtyp auf jeder Route eingesetzt werden kann (etwa Doppeldecker und Gelenkbusse, die ausreichende freie Höhen bzw. Mindeststradien verlangen).

Ein Beispiel: Im Busnetz der BVG sind etwa 400 Millionen Übergänge von Fahrzeugen von einer Linie auf eine andere theoretisch möglich, davon sind jedoch nur etwa 70 Millionen zulässig, da nicht jeder der 14 unterschiedlichen Bustypen der BVG-Flotte jede Strecke befahren kann. Aus den verbleibenden etwa 70 Millionen Varianten ist der optimale Umlauf für die 28.000 Fahrgastfahrten eines normalen Betriebstages zu ermitteln.

Graphentheoretisch ist die Umlaufoptimierung ein so genanntes Mehrgüterflussproblem, das sich – trotz der für den Laien erschreckend hohen Zahl von Variablen – exakt lösen lässt. Das ZIB entwickelte hierfür einen Algorithmus, der mit so genannten Lagrange-Pricing-Techniken sowie der in Optimierungsproblemen verbreiteten Methode der Spaltenerzeugung arbeitet. Dabei betrachtet man zuerst eine Teilauswahl aller möglichen Umlaufvarianten und eliminiert daraus solche, die nicht sinnvolle Verbindungsfahrten enthalten, nimmt dann weitere Umläufe hinzu und so fort, bis der gesamte Lösungsraum abgearbeitet ist.

Der 1994-97 entwickelte ZIB-Algorithmus ist heute in den Planungssystemen „BERTA“ der BVG und in „MICROBUS“ der IVU integriert. Die BVG konnte damit allein im Betriebshof Berlin-Spandau, einem der damals zehn Busdepots der Hauptstadt, 38 Busse (das ist fast jeder fünfte in diesem Depot beheimatete Bus) und 377 Betriebsstunden einsparen [3];

eine Mitte der 1990er Jahre durchgeführte Modellrechnung für den Busbetrieb der Hamburger Hochbahn (HHA) ergab ein Einsparungspotenzial von 26 Fahrzeugen (ca. 3 %) und von 10 % der Betriebskosten [1]; bei den Stadtwerken Bonn (Abb. 1) konnten bei einer im Jahr 2001 realisierten Optimierung fünf von 200 Bussen (2,5 %) eingespart werden.

ZIB-Mitarbeiter Dr. Ralf Borndörfer betrachtet die Umlaufoptimierung für den ÖPNV als „aus mathematischer Sicht erledigt“: Man könne heute praktisch jeden Betrieb der Welt „auf Knopfdruck“ optimieren.

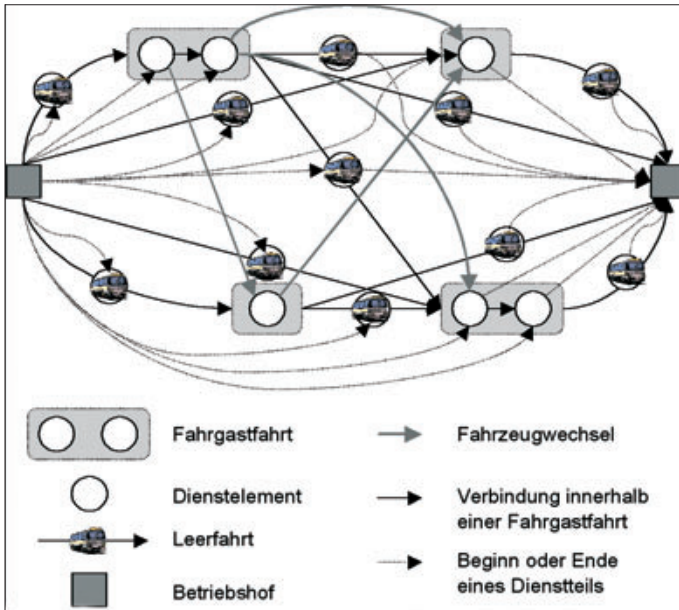
### Stufe 2: Dienstplanoptimierung

Die nächste Planungsstufe, die Dienstplanung, war algorithmisch weitaus schwieriger zu behandeln, da hierbei eine Vielzahl von Regeln zu berücksichtigen sind, die sich zudem von Verkehrsbetrieb zu Verkehrsbetrieb stark unterscheiden. Solche Regeln sind zum Beispiel tarifvertraglich vereinbarte Arbeits-, Lenk- und Pausenzeiten, Vergütungsregeln und betriebliche Präferenzen hinsichtlich der Dienstlängen und -teilungen. Je nach Betriebsgröße kommen da schnell Millionen oder sogar Milliarden von Variablen zusammen, die auf komplizierte Weise miteinander verknüpft sind.

Bei der Dienstplanung betrachtet man so genannte Dienstelemente, die kleinsten ununterteilbaren Arbeitseinheiten eines Fahrers. Die Umläufe werden an möglichen Ablösepunkten in Dienstelemente geschnitten. An dieser Stelle der Planung spricht man noch von anonymen Diensten, da die Zuordnung von Fahrern zu den Diensten erst nach Fertigstellung des Dienstplans erfolgt.

Beim ZIB entwickelte man zunächst ein graphentheoretisches Modell, das die Dienstelemente und die bei der Dienstbildung zu berücksichtigenden Regeln repräsentiert. Die Suche nach dem optimalen Dienstplan ist ein so genanntes Pfadüberdeckungsproblem, welches sich im Allgemeinen nicht exakt lösen lässt; vielmehr nähert sich der ZIB-Algorithmus dem Optimum schrittweise mittels so genannter Lagrange-Pfadsuchtechniken und der bereits bei der Umlaufplanung verwendeten Spaltenerzeugung an. Das Verfahren ist heute in der Software MICROBUS integriert und wird seit Mitte 2001 bei den Stadtwerken Bonn (SWB) eingesetzt. In Bonn konnten damit ohne Erhöhung der durchschnittlichen Dienstzeit zwölf von 280 Vollzeitdiensten (4,3 %) eingespart werden.

Ein mathematisch anderer Ansatz wird vom Karlsruher Software-Anbieter PTV verfolgt: in seiner Planungssoftware ptv interplan kommt ein so genannter evolutionärer Algorithmus zur Anwendung, bei dem eine gewisse Menge unterschiedlicher Dienstschnitte erzeugt, diese paarweise verglichen und die jeweils besseren in einer weiteren Vergleichsrunde („Generation“) stärker gewichtet werden. Laut PTV-Entwicklungsleiter Michael Beck liegt der Vorteil dieses Verfahrens im schnelleren Zugriff auf Ergebnisse, da Optimierungsrechnungen nach jeder beliebigen Zahl von Generationen unterbrochen werden und die Qualität von Planer über-



3a. Optimierungsprobleme (hier das Beispiel der integrierten Optimierung) lassen sich als graphentheoretische Modelle formulieren. Abbildung: ZIB

$$\min \sum_{i \in D} c_i x_i + \sum_{j \in A} c_j y_j$$

sodass

$$y(\delta^+(t)) = 1, \quad \forall \text{ Dienstelemente } t$$

$$y(\delta^-(t)) = 1, \quad \forall \text{ Dienstelemente } t$$

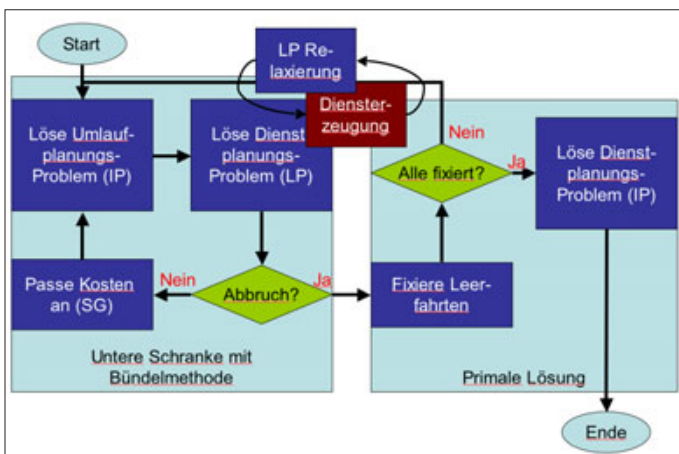
$$\sum_{d \text{ Dienst: } d \text{ enthält } t} x_d = 1, \quad \forall \text{ Dienstelemente } t$$

$$\sum_{d \text{ Dienst: } d \text{ enthält } b} x_d = y_b, \quad \forall \text{ Leerfahrten } b$$

$$x_t \in \{0, 1\} \quad \forall \text{ Dienstelemente } t$$

$$y_a \in \{0, 1\} \quad \forall \text{ Verbindungen } a$$

3b. Alternative Formulierung des Optimierungsproblems algebraisch als Gleichungssystem mit ganzzahligen Variablen („ganzzahlige Programme“). Abbildung: ZIB



3c. Zur Lösung eines solchen Gleichungssystems muss ein geeigneter Algorithmus entwickelt werden. Abbildung: ZIB

prüft werden können. Ein erster Praxistest wird gegenwärtig bei den Stadtwerken München (SWM) durchgeführt.

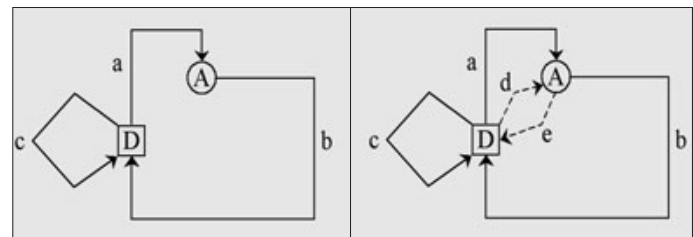
Die ZIB-Entwickler wiederum nehmen für ihren Algorithmus in Anspruch, dass er den Nachweis der Praxistauglichkeit bei der Optimierung komplexer Szenarien mit Tausenden von Dienstelementen und Dutzenden von Dienstarten (entsprechend einem mittelgroßen Verkehrsbetrieb oder einem Betriebshof eines großen Verkehrsbetriebs) bereits erbracht habe.

Rein betriebswirtschaftlich gesehen führt die Optimierung der Dienstpläne im Allgemeinen erst dann zu günstigeren Lösungen, wenn einzelne Regeln des Betriebs verändert werden. Ein Beispiel von den Stadtwerken Wiesbaden: Durch Optimierung des werktäglichen Dienstplans mit MICROBUS 2 konnten von 280 Diensten ohne Regeländerung nur drei eingespart werden; bei einer zeitlichen Ausdehnung der geteilten Dienste über die bisher gültige Grenze von 18 Uhr (die sich an den früheren Ladenschlusszeiten orientierte) hinaus stieg das Einsparpotenzial auf bis zu 40 Dienste, das nun stufenweise über mehrere Jahre realisiert werden soll.

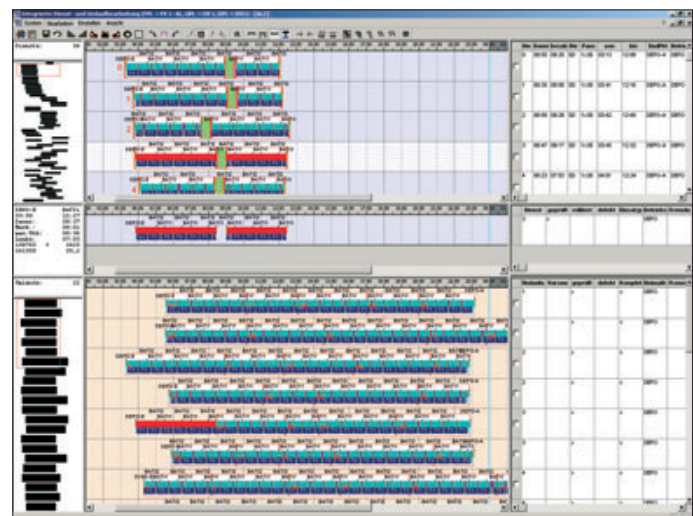
Neben den Einsparungen von Betriebskosten wirkt sich vor allem der Zeitgewinn bei der Planung selbst positiv aus: Für die manuelle Erstellung eines komplexen Dienstplans benötigt ein Planer bisher mehrere Tage oder sogar Wochen; mit dem Optimierungstool liegt das Ergebnis nach wenigen Rechenstunden vor. Es ist damit erstmals möglich, mehrere unterschiedliche Planungen zu berechnen und zu vergleichen – man muss sich nicht mit dem „ersten besten“ Dienstplan, der alle Regeln erfüllt, zufriedengeben.

### Stufe 3: Von der sequenziellen zur integrierten Optimierung

Wenn die Fahrzeug-Umläufe und die Dienstpläne der Personale optimiert sind, ist dann das Maximum an Effektivität erreicht? Nicht unbedingt: ein



4. Insbesondere im Regionalverkehr sind Umlauf- und Dienstplanung eng verzahnt: Dargestellt sind drei Fahrgastfahrten a, b, c zwischen dem Depot (D) und einem Linienend- bzw. Anfangspunkt (A). Bei sequenzieller Planung bietet sich an, zwei Umläufe (a, b) und c zu bilden, sodass auf Leerfahrten verzichtet werden kann. Der lange Umlauf (a, b) kann jedoch nicht von einem Dienst abgedeckt werden, sodass ein dritter Fahrer erforderlich ist. Diese Lösung funktioniert aber nur, wenn A ein Ablösepunkt ist. Abhilfe schaffen zwei Leerfahrten vom/zum Depot d, e; auf diese Weise sind alternative Umläufe (a, e, c) und (d, b) möglich, die direkt mit Diensten unterlegt werden können. Abb.: [2]



5. Integrierte Optimierung von Umläufen und Diensten. Das vom ZIB entwickelte Modul ist zur Zeit in Regensburg in der Evaluierung. Abbildung: IVU

optimaler Umlaufplan kann zu ungünstigen Diensten führen und umgekehrt. Besonders augenfällig ist dieser Zusammenhang im Regionalverkehr, wo es kaum Ablösemöglichkeiten für die Fahrer außerhalb der Depots gibt, sodass ein langer Umlauf möglicherweise nicht von einem Fahrer in der vorgegebenen Dienstzeit gefahren werden kann. Ein einfaches Beispiel ist in Abb. 4 dargestellt.

Um ein globales Optimum zu finden, ist anstelle der – bisher betrachteten – sequenziellen Optimierung von Umläufen und Diensten eine simultane, integrierte Optimierung erforderlich. Zu diesem Zweck hat das ZIB im Rahmen eines BMBF-Forschungsprojektes gemeinsam mit den Industriepartnern IVU und MDV sowie mit den Regensburger Verkehrsbetrieben (RVB) als „Lead-User“ einen Algorithmus für die integrierte Optimierung von Umläufen und Diensten entwickelt. Hierzu werden die vorhandenen mathematischen Methoden zur Umlaufplanung und Dienstplanung bei der Berechnung gekoppelt. Ähnlich wie bei der Dienstplanung ist eine exakte Lösung des Problems im Allgemeinfall nicht möglich, sondern man nähert sich dem Optimum iterativ an. Dabei werden nur solche Leerfahrten beibehalten, die mit einem Dienst belegbar sind. Am Ende bleibt ein Rest nicht zugeordneter Fahrten und Dienste übrig – so zu sagen Fahrer ohne Busse und Busse ohne Fahrer –, die vom System sequenziell „fixiert“ werden müssen (vgl. Abb. 3c).

Der theoretische Vorteil der integrierten Optimierung ist gleichzeitig ihr praktischer Nachteil: Durch die Kombination der Lösungsmengen von Umläufen und Diensten multipliziert sich die Anzahl der Freiheitsgrade, es gibt also wesentlich mehr Optimierungsmöglichkeiten; andererseits entsteht so ein Zahlenraum mit Milliarden von Variablen, der zur Zeit nur bei kleinen bis mittleren Verkehrsbetrieben wie dem RVB mit wochentäglich 1500 Fahrgastfahrten beherrschbar ist. Beim ZIB ist man jedoch zuversichtlich, dass die Güte der Algorithmen und die Rechenleistungen in zehn Jahren ausreichen werden, um auch Großbetriebe integriert optimieren zu können.

Das Optimierungsmodul wird zur Zeit in Regensburg evaluiert. Auch wenn die Ergebnisse der bisher vorliegenden Modellrechnungen noch nicht eins zu eins in die Praxis übertragbar sind, die Tendenz ist viel versprechend: Die Referenzwerte der bisherigen Planung für die Anzahl von Diensten, Fahrzeugen und die bezahlte Zeit konnten fast durchweg unterboten werden; auch bei einer Vergleichsrechnung mit sequenzieller Optimierung von Umläufen und Diensten lag die integrierte Optimierung vorn.

Für das Regensburger Sonntagsszenario lieferte das Programm zwei überraschende Alternativen, die in der bisherigen (manuellen) Planung so noch nicht vorgekommen waren: Die erste Variante enthält einen Dienstplan, der vorwiegend Kurzdienste mit Lenkzeiten unter viereinhalb Stunden vorsieht und somit weniger Pausenzeiten erfordert. Würde der Plan umgesetzt, könnte die bezahlte Zeit um ca. 3 % und die Anzahl der Dienste um ca. 5 % reduziert werden. Die zweite Variante mit einer besonders langen durchschnittlichen Dienstzeit von über acht Stunden würde eine noch größere Einsparung an Diensten mit sich bringen. Auch auf der Umlaufseite liegen beide Rechnungen unter dem Referenzwert.

Den größten Produktivitätsschub sieht der Regensburger Betriebsleiter Rainer Kuschel jedoch im Planungsablauf selbst: „Als wir das Projekt mit dem ZIB starteten, kam es uns vor allem darauf an, die Dienstplanerstellung zu beschleunigen, um schneller auf wechselnde Anforderungen reagieren und auch mal mit Alternativen experimentieren zu können.“

## Strukturelle Probleme in den Verkehrsbetrieben

Die Suche nach geeigneten Lösungsverfahren ist nicht die einzige Herausforderung für die Optimierer – es gibt auch Widerstände struktureller Art. In deutschen Verkehrsbetrieben herrscht – eher historisch als betriebstechnisch bedingt – eine unübersehbare Vielfalt von Regelungen, die meist in Betriebsvereinbarungen niedergelegt sind, welche die Dienstplanberechnungen wesentlich verkomplizieren; die Software muss für jeden Betrieb angepasst werden, durchgeführte Modellrechnungen sind in der Regel nicht auf einen anderen Betrieb übertragbar. „Jeder, und sei er noch so klein, glaubt, dass er etwas Besonderes ist und eine spezielle Lösung benötigt – zum Beispiel bei den Pausenregelungen“, beklagt Martin Grötschel. „Die Kosten für eine derartige Marktfragmentierung sind gigantisch.“

Hinzu komme das Beharrungsvermögen manch eines kommunalen Unternehmens: Viele Betriebe fürchteten mögliche Änderungen ihrer ge-

wohnten Strukturen mehr, als dass sie die Chancen der neu gewonnenen Spielräume sähen. Aufgrund der prekären wirtschaftlichen Lage, in der sich viele Verkehrsbetriebe befinden, rechnet der Forscher jedoch über Kurz oder Lang mit einem „Sieg der Vernunft“; da sich alte Strukturen und Monopole nach und nach auflösten, nehme auch die Offenheit für neue Ansätze zu.

Nicht nur beim Fahrpersonal, auch bei den Sachbearbeitern in der Planung sei Umdenken gefragt: Das regelkonforme Austüfteln von Umläufen und Diensten trete in den Hintergrund, die Zielorientierung in den Vordergrund. Martin Grötschel sieht hier einen allmählichen Mentalitätswechsel vom „soliden Rechner“ zum „kreativen Planer“ voraus. Die Optimierung werde zu einem „Decision Tool“ der Verkehrsbetriebe, der Planer mutiere zum „Strategen“.

## Fazit und künftige Entwicklungen

Verbesserte Algorithmen und die hohen Rechenleistungen moderner Computer machen die Optimierung von Umläufen und Dienstplänen heute zu einem interessanten Werkzeug für Verkehrsunternehmen, welches die manuelle bzw. interaktive Planung ergänzt. Die Optimierungsprogramme laufen sämtlich auf handelsüblichen PCs, eine spezielle Rechnerarchitektur ist nicht erforderlich. Die Berechnung eines Umlauf-Szenarios dauert typischerweise einige Minuten, die – mathematisch komplexere – Dienstplanbildung einige Stunden.

Neben den erzielbaren Rationalisierungseffekten wirkt sich der deutlich reduzierte Planungsaufwand und die hierdurch gewonnene Flexibilität vorteilhaft aus. Eine kurzfristige Umplanung oder die Berechnung von Planungsvarianten ist kein Problem mehr. Alternative Regeln für Dienst- und Pausenzeiten oder Entlohnungsmodelle können durchgerechnet und dem Betriebsrat zur Abstimmung vorgelegt werden. Auch für die Teilnahme an Ausschreibungen sind die Optimierungstools eine wichtige Kalkulationshilfe.

Nach Einschätzung von Ralf Borndörfer und IVU-Vertriebsleiter Andreas Langenhan geht der Trend von der sequenziellen Planung zur Integration von Umlauf- und Dienstplanung; erste Modellrechnungen und Evaluierungen liegen hier bereits vor (vgl. obige Angaben zu Regensburg). Als weitere Integrationsstufe bietet sich die Einbeziehung des Fahrplans an: Bei der „fahrplansensitiven“ Optimierung wird der Fahrplan nicht mehr als feste Ausgangsgröße betrachtet, sondern im Interesse effektiverer Umlauf- und Dienstbildungen in gewissen Grenzen variiert. Wie die Umlauf- und Dienstplanoptimierung selbst ist dies eigentlich keine neue Idee, aber erst mit den heutigen mathematischen und technischen Mitteln erscheint sie wirklich attraktiv.

Ein weiteres Ziel ist die Adaption der für den Busverkehr entwickelten Umlaufplanung an die Erfordernisse des Bahnbetriebs. Während bei der Dienstplanoptimierung nur einige Regeln anzupassen sind, muss die Umlaufoptimierung für die bahntypischen Gegebenheiten wie Spurbindung, Fahren im Zugverband und die größeren Planungshorizonte von mehreren Betriebstagen weiterentwickelt werden. Der erste Praxiseinsatz der adaptierten Dienstplanoptimierung wird wahrscheinlich bei den S-Bahnen München und Rhein-Neckar erfolgen, die seit Ende 2003 bzw. Frühjahr 2004 mit dem MICROBUS-System arbeiten.

Andreas Langenhan sieht jedenfalls noch viel Potenzial für mathematische Lösungen im ÖPNV: „Das Thema Optimierung fängt eigentlich erst an.“

### Literaturhinweise

- [1] Martin Grötschel, Andreas Löbel, Manfred Völker: Optimierung des Fahrzeugumlaufs im Öffentlichen Nahverkehr, August 1996; Download unter <http://www.zib.de/PaperWeb/abstracts/SC-96-08>
- [2] Ralf Borndörfer, Andreas Löbel, Steffen Weider: Integrierte Umlauf- und Dienstplanung im Öffentlichen Nahverkehr, Januar 2002; Download unter <http://www.zib.de/PaperWeb/abstracts/ZR-02-10>
- [3] Berlinbrief Nr. 9/10 2003, i.A. des Berliner Senats herausgegebener Newsletter, [www.berlin.de/berlinbrief](http://www.berlin.de/berlinbrief)
- [4] Die IT-Plattform für den öffentlichen Verkehr; Broschüre der IVU Traffic Technologies AG, erhältlich unter <http://www.ivu.de>
- [5] Robert E. Bixby: Solving Real-World Linear Programs: A Decade and More of Progress. Erschienen in Operations Research Vol. 50, No. 1 (Januar/Februar 2002), S. 3-15