Konrad-Zuse-Zentrum
für Informationstechnik Berlin

Takustraße 7
D-14195 Berlin-Dahlem
Germany

RALF BORNDÖRFER ANDREAS LÖBEL
STEFFEN WEIDER

Integrierte Umlauf- und Dienstplanung im Öffentlichen Nahverkehr

ZIB-Report 02-10 (Januar 2002)

Integrierte Umlauf- und Dienstplanung im Öffentlichen Nahverkehr*

Ralf Borndörfer[1] Andreas Löbel[1] Steffen Weider[1]

5. Januar 2002

Zusammenfassung. Wir beschreiben einen Ansatz zur integrierten Umlauf- und Dienstplanung im öffentlichen Nahverkehr. Der Ansatz zielt auf die Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades dieser beiden Planungsschritte und auf die besondere Planungsproblematik im Regionalverkehr. Wir entwickeln dazu mathematische Optimierungstechniken für den Einsatz in den Planungssystemen MICROBUS II und DIVA.

Schlüsselworte. Integrierte Umlauf- und Dienstplanung, Umlaufplanung, Dienstplanung, Optimierung, Regionalverkehr

Mathematics Subject Classification (MSC 1991). 90B06

1 Einführung

Wichtige Teilschritte der operativen Planung von Verkehrsbetrieben sind die Fahr- oder Umlaufplanung und die Dienstplanung, siehe auch Fengler & Kolonko [1997]. Die Effizienz dieser Planungsschritte wird u.a. anhand von *Wirkungsgraden* beurteilt, vgl. Lehner [1978]. Die Wirkungsgrade für Umlauf- und die Dienstplanung sind wie folgt definiert:

$$\text{Fahrplanwirkungsgrad} \quad \eta_{\text{v}} = \frac{\text{Fahrplanmasse}}{\text{Umlaufmasse}}$$

$$\text{Dienstplanwirkungsgrad} \quad \eta_{\text{d}} = \frac{\text{Umlaufmasse}}{\text{Dienstplanmasse}}.$$

(Lehner [1978] verwendet die Bezeichnungen Kurbelzeit, Wagenumlaufzeit und gesamte Dienstdauer anstelle von Fahrplanmasse, Umlaufmasse und Dienstplanmasse.) Die Gesamteffizienz von Umlauf- und Dienstplanung, der sog. *Planbauwirkungsgrad*, ergibt sich als das Produkt dieser beiden Größen:

$$\text{Planbauwirkungsgrad} \quad \eta_{\text{v}} \cdot \eta_{\text{d}} = \frac{\text{Fahrplanmasse}}{\text{Dienstplanmasse}}.$$

Abbildung 1 illustriert die Zusammenhänge zwischen diesen drei Wirkungsgraden. Die Niveaulinien verdeutlichen, dass ein und dem selben Planbauwirkungsgrad verschiedene Kombinationen von Fahrplan- und Dienstplanwirkungsgrad entsprechen. Dabei kann ein geringer Fahrplanwirkungsgrad durch einen hohen Dienstplanwirkungsgrad kompensiert werden und umgekehrt.

* Dieses Vorhaben wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung und Technologie unter dem Förderkennzeichen 03-GR7ZI1-4 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt liegt bei den Autoren.

[1] Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin, Takustr. 7, 14195 Berlin, www.zib.de, Email [nachname]@zib.de

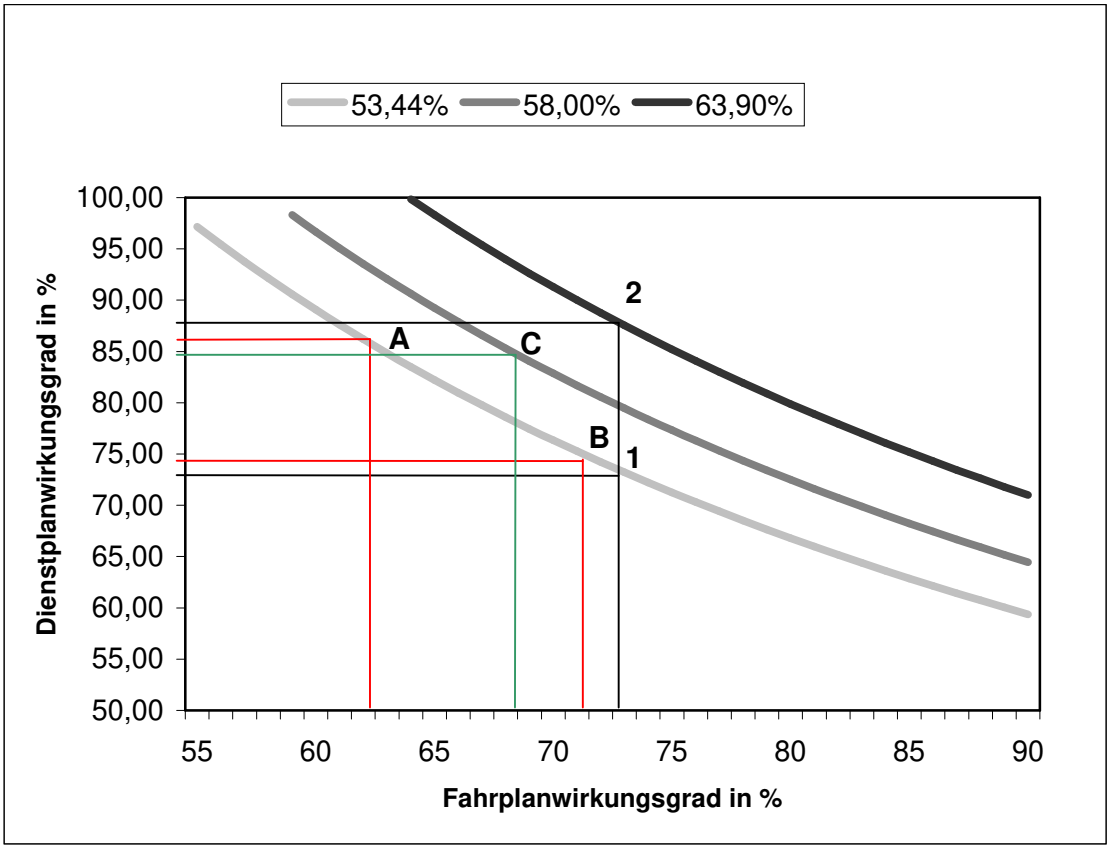

Abbildung 1: Niveaulinien im Planbauwirkungsgrad

Eine einseitige Konzentration auf die Verbesserung des Fahrplan- oder des Dienstplanwirkungsgrades führt in der Regel nicht zu einem optimalen Gesamtergebnis. So kann beispielsweise ein hoher Dienstplanwirkungsgrad erzielt werden, indem in der Umlaufplanung genügend Standzeiten in die Umläufe eingebaut werden, um den Fahrern in der Dienstplanung an diesen Stellen Pausen auf den Fahrzeugen zu gewähren. Dieses Vorgehen führt zu einem guten Dienstplanwirkungsgrad, aber es belastet den Fahrplanwirkungsgrad. Diese Situation ist in Abbildung 1 im Punkt A dargestellt. Umgekehrt führt die Vermeidung von Standzeiten in der Umlaufplanung dazu, dass die Fahrer sich vermehrt zu Pausenräumen begeben müssen. Die dabei anfallenden zusätzlichen Wegezeiten und die Verminderung der Umlaufmasse verschlechtern dann den Dienstplanwirkungsgrad (Punkt B). Keiner dieser beiden Ansätze führt i.A. zu einer optimalen Kombination. Um den Planbauwirkungsgrad zu verbessern, müssen beide Planungsprobleme in einer *integrierten Planung* simultan betrachtet werden. Dann können einzeln betrachtet suboptimale Umlauf- und Dienstpläne zu einer Verbesserung des Planbauwirkungsgrades führen (Punkt C). Dieser Sachverhalt ist das erste wichtige Argument für die Verwendung von Ansätzen zur integrierten Umlauf- und Dienstplanung.

Ein weiteres, nicht minder wichtiges Argument betrifft die besondere Planungssituation im *Regionalverkehr*. Dort gibt es im Vergleich zum städtischen Nahverkehr nur wenige oder gar keine Ablösepunkte außerhalb der Betriebshöfe. Bei sequentieller Planung von Umläufen und Diensten kann es in der Folge zu

unlösbaren Problemen bei der Gewährung von Pausen kommen. Im Regionalverkehr muss deshalb besonders auf die Dienstplantauglichkeit der Umläufe geachtet werden. Eine integrierte Umlauf- und Dienstplanung ist der richtige Ansatz zur Lösung dieses Problems.

Der *Stand* in der integrierten Planung stellt sich wie folgt dar. Optimierungsansätze zur integrierten Umlauf- und Dienstplanung werden seit etwa 20 Jahren untersucht, siehe Freling, Wagelmans & Paixão [1999] für eine aktuelle Übersicht. Ball, Bodin & Dial [1983] und Patrikalakis & Xerocostas [1992] stellten die ersten integrierten Modelle vor. Eine direkte Lösung dieser Modelle war aber mit den damaligen Methoden und Rechnern noch nicht möglich. Es wurden deshalb verschiedene mehrstufige heuristische Methoden entwickelt, die alle entweder zuerst Dienste auf der Fahrplanmasse konstruieren oder zuerst Umlaufpläne unter Beachtung von Dienstplanungsregeln aufbauen (Ball, Bodin & Dial [1983], Darby-Dowman, Jachnik, Lewis & Mitra [1988], Falkner & Ryan [1992], Patrikalakis & Xerocostas [1992]). Exakte Ansätze werden erst seit kurzem betrachtet. Freling [1997] und Freling, Huisman & Wagelmans [2001] schlagen ein gekoppeltes Umlauf- und Dienstplanungsmodell vor, das sie mit Lagrange- und Spaltenerzeugungsmethoden bearbeiten. Die Autoren berichten über die integrierte Optimierung von einzelnen Linien der Verkehrbetriebe Rotterdam (RET) mit bis zu 259 Fahrgastfahrten, 8 Dienstarten, 14 Bussen und 24 Fahrern. Haase, Desaulniers & Desrosiers [2001] untersuchen ein Modell zur integrierten Planung mit einem Depot und einer homogenen Fahrzeugflotte. Sie betrachten zwei Dienstarten: Kurzdienste mit einem Dienststück bis zu 5 Stunden und zusammenhängende Dienste mit zwei Dienststücken und einer Blockpause zwischen 15 und 90 Minuten. Die Dienste enthalten im Schnitt 2,5 Fahrten. Sie bearbeiten künstlich erzeugte Probleme mit bis zu 350 Fahrgastfahrten mit einem Branch-and-Cut-Verfahren.

In den aktuellen *Planungssystemen* sind solche Verfahren noch nicht erhältlich. Die Verkehrsbetriebe planen deshalb zum größten Teil sequentiell.

Das Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin (ZIB) entwickelt in Kooperation mit der IVU Traffic Technologies AG (IVU), der Mentz Datenverarbeitung GmbH (MDV) und der Regensburger Verkehrsbetriebe GmbH (RVB) gegenwärtig in einem vom BMB+F geförderten Verbundprojekt ein *Optimierungssystem* zur integrierten Umlauf- und Dienstplanung im Nahverkehr. Unser Ansatz zielt auf eine exakte Abbildung des Planungsproblems unter Berücksichtigung sämtlicher gesetzlicher, tariflicher und betrieblicher Regeln und auf die Ausnutzung aller Freiheitsgrade zu näherungsweise optimalen Lösung von Problemen von der Größenordnung mittlerer Verkehrsbetriebe. Wir beabsichtigen, das Verfahren in die Planungssysteme MICROBUS II der IVU und DIVA der MDV zu integrieren.

Dieser Artikel diskutiert die wesentlichen Aspekte unseres Ansatzes. Der Inhalt ist in drei Abschnitte gegliedert. Abschnitt 2 stellt die wichtigsten Unterschiede zwischen integrierter und sequentieller Planung dar. Die Methodik der integrierten Umlauf- und Dienstplanung wird in Abschnitt 3 behandelt. Abschnitt 4 enthält Fallstudien. Sie zeigen anhand von drei Beispielen den derzeitigen Stand unseres Systems IS-OPT auf.

2 Besondere Aspekte der Integrierten Planung

Das Problem der integrierten Umlauf- und Dienstplanung lässt sich, ähnlich wie seine beiden Unterprobleme, in fünf Ebenen untergliedern. Die unterste Ebene der Planungsatome bilden die *Umlauf- und Dienstbestandteile* wie Fahrten und Leerfahrten, Dienst- und Ergänzungselemente, Übergänge etc. Auf diese folgen die Ebenen der nächstgrößeren Einheiten der *Einzelumläufe bzw. Einzeldienste* und des ganzen *Umlauf- bzw. Dienstplans*. Zwei weitere Ebenen dienen der Einbettung in den Gesamtprozess der operativen Planung. Wir unterscheiden eine Ebene der *internen Integration* von Umlauf- und Dienstplanung und eine dieser übergeordnete Ebene der *externen Integration* mit den vorausgehenden und nachfolgenden Planungsschritten der Fahrplanerstellung und der Turnus- und Personaleinsatzplanung.

Die wesentlichen *Unterschiede* zwischen integrierter und sequentieller Umlauf- und Dienstplanung finden sich auf der untersten atomaren Planungsebene und auf der internen Integrationsebene. Auf der untersten Ebene werden *zusätzliche Freiheitsgrade* im Bereich der Dienstplanung geschaffen. Während in der sequentiellen Planung die Leerfahrten eines Umlaufplans der nachfolgenden Dienstplanung fest vorgegeben sind, stehen in der integrierten Planung jederzeit alle möglichen Leerfahrten als Freiheitsgrade bei der Konstruktion von Diensten zur Verfügung. Zusätzliche Freiheitsgrade werden auch auf der internen Integrationsebene freigesetzt. Dort entfallen *künstliche Hilfsregeln*, mit denen eine heuristische Abstimmung zwischen Umlauf- und Dienstplanung angestrebt wird. An die Stelle dieser künstlichen Regeln tritt die Optimierung von *Gesamtzielen*.

Im verbleibenden und weitaus größten Teil der Gliederung bestehen zwischen integrierter und sequentieller Planung keine Unterschiede. Die Planungsbegriffe, alle weiteren Freiheitsgrade, die Regelwerke und die Maßnahmen zur externen Integration sind identisch. Ausführliche Darstellungen dieser Dinge finden sich in Löbel & Strubbe [1996] (Umlaufplanung) und Borndörfer, Löbel, Strubbe & Völker [1999] (Dienstplanung) und der in diesen Artikeln genannten Literatur.

Zusätzliche Freiheitsgrade in der Dienstplanung. Die wichtigste Quelle zusätzlicher Freiheitsgrade in der integrierten Planung ist die Berücksichtigung sämtlicher *Fahrtverknüpfungen* nicht nur in der Umlaufplanung, sondern auch in der Dienstplanung. (Fahrtverknüpfungen umfassen neben den klassischen *Leerfahrten* weitere Möglichkeiten der Bildung von Anschlussfahrten, z.B. das schlichte Warten am Haltemast auf die nächste Taktfahrt.) Abbildung 2 illustriert das Prinzip an einem Beispiel.

Skizziert ist ein Planungsproblem des Regionalverkehrs, bei dem es zu *Zulässigkeitsproblemen* bei der Konstruktion von Diensten kommt. Es sind drei Fahrtgastfahrten a, b und c durchzuführen. Fahrt a führt vom Depot D zum Punkt A, die Anschlussfahrt b führt von A zurück zu D. Fahrt c beginnt und endet bei D. Bei sequentieller Planung bietet es sich im ersten Schritt der Umlaufplanung an, diese Fahrten mit 2 Umläufen (a,b) und (c) durchzuführen. Dann sind keine Leerfahrten nötig. Bei Wahl geeigneter Fahrtzeiten und Dienstplanungsregeln entsteht jedoch ein langer Umlauf (a,b), der nicht im Ganzen von einem Dienst abgedeckt werden kann. Wenn A kein Ablösepunkt ist, kann die-

ser Umlaufplan nicht mit Diensten unterlegt werden (links). Abhilfe schaffen zwei Leerfahrten d und e. Damit sind alternative Umläufe (a,e,c) und (d,b) möglich, die direkt mit Diensten unterlegt werden können (rechts).

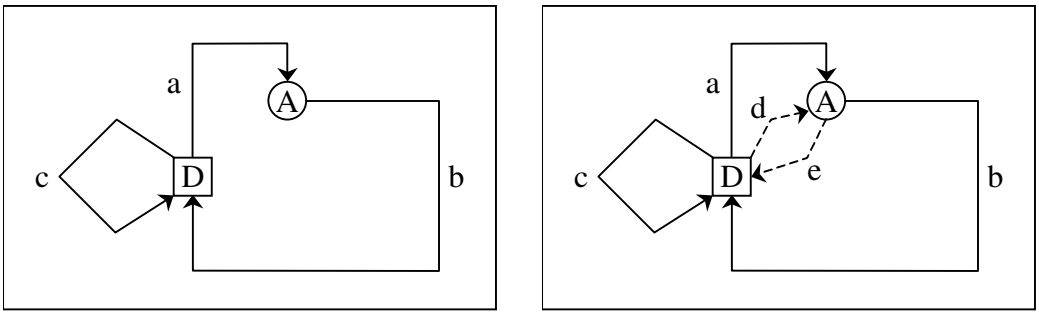

Abbildung 2: Probleme der Regionalplanung

Eine *Optimierungsvariante* dieser Problematik erhält man, wenn man A zu einem Ablösepunkt erklärt. Die sequentielle Umlaufplanung verändert sich dadurch nicht. Bei geeigneten Fahrtzeiten und Dienstplanungsregeln muss bei A mit einem dritten Fahrer abgelöst werden (links). Die Verwendung der Leerfahrten d und e ermöglicht dagegen die Umläufe (a,e,c) und (d,b), die mit nur zwei Diensten unterlegt werden können.

Diese einfachen Beispiele machen die *Bedeutung von Fahrtverknüpfungen für die Dienstplanung* sehr deutlich. Leerfahrten sind keine unveränderbare Eingabegröße der Dienstplanung. Sie stellen Freiheitsgrade dar, die gezielt zur Ablösung von Fahrern genutzt werden können. Dies kann auch und gerade auf Kosten der Umlaufeffizienz vorteilhaft sein.

Die Anzahl möglicher Verknüpfungen wächst quadratisch mit der Anzahl an Fahrgastfahrten. Ein Problem mit 2.000 Fahrgastfahrten kann durchaus 200.000 Verknüpfungen enthalten. Ein Umlaufplan fixiert inklusive Ein- und Aussetzfahrten etwas mehr als 2.000 dieser Verknüpfungen. Integrierte Planung ermöglicht die systematische Nutzung auch der übrigen 198.000 Möglichkeiten. Im Vergleich zur sequentiellen Planung bedeutet dies eine wesentliche *Erweiterung des Planungsspielraums*.

Eine wichtige Voraussetzung für die Umsetzbarkeit integrierter Ansätze ist, dass diese Erweiterung der Planungsbasis aus *datentechnischer Sicht* unbedenklich ist. Die erforderliche Primärinformation besteht aus Dienstplanungsdaten für alle Verknüpfungen wie Lenk-, Arbeits- und Pausenzeitanteilen etc. Diese Daten werden zum Teil bereits in den Planungssystemen gepflegt. Für den Verkehrsbetrieb ändert sich daher an der *Art* der Datenhaltung beim Übergang von sequentieller zu integrierter Planung nichts. In Bezug auf die *Datenmenge* entsteht ein Mehraufwand, wenn bisher keine Dienstplanungsdaten für unbenutzte Leerfahrten bzw. Verknüpfungen gepflegt wurden.

Für *Optimierungsansätze* müssen aus den Primärdaten mit Hilfe von Regeln und weiteren Informationen (wie z.B. Wegezeiten) Sekundärdaten mit Dienstplanungsinformationen für mögliche Ergänzungstätigkeiten vor und nach den Leerfahrten und für die möglichen Dienstübergänge zwischen allen diesen Dienstbestandteilen gebildet werden. Dies sind offensichtlich weitaus mehr Daten als im sequentiellen Fall. Die Komplexität der Einzeldaten verändert sich

aber nicht. Im Prinzip könnten daher die selben Algorithmen zur Datenaufbereitung eingesetzt werden, angewandt auf eine um alle Verknüpfungen vergrößerte Fahrtenmenge. Die Praxis ist komplizierter, da die Datenmenge bei realistischen Größenordnungen sehr stark anwächst. Doch auch diese Probleme lassen sich (mit einigem Aufwand) mit Techniken der dynamischen Erzeugung und der impliziten Behandlung von Daten lösen.

Hilfsregeln zur internen Integration in der sequentiellen Planung. Bei der Betrachtung der sequentiellen Planungsergebnisse in Abbildung 2 drängen sich verschiedene Ideen auf, wie man durch den geschickteren Einsatz sequentieller Planungstechniken unter Umständen eine bessere interne Integration von Umlauf- und Dienstplanung erreichen könnte. Wir nennen drei Beispiele.

Kostenmanipulationen in der Umlaufplanung. Eine naheliegende Möglichkeit ist die Veränderung der Kostenstruktur der Umlaufplanung mit dem Ziel der bevorzugten Konstruktion „dienstplantauglicher Umläufe". Meist verwendet man dazu eine zweistufige Zielfunktion, die bei gleicher Fahrzeuganzahl Umläufe mit mehr oder besseren Ablösepunkten begünstigt (vgl. Abbildung 2). Typische Manipulationen von Umlaufkosten sind die künstliche Verbilligung von Ein- und Aussetzfahrten von und zu einem Depot, Strafkosten für Verknüpfungen von zwei langen oder abgelegenen Fahrten etc.

Umlaufplanung mit Längenrestriktionen. Aktuelle Weiterentwicklungen in der Methodik der Umlaufplanung zielen auf die Einbeziehung von auf den Fahrzeugtyp bezogenen Längenrestriktionen für einzelne Umläufe, siehe Fischetti, Lodi, Martello & Toth [2001], Haghani & Banihashemi [2001], Spenke [2002]. Fahrzeugbetriebliche Gründe für solche Restriktionen sind uns nur beim (seltenen) Betrieb von Gasbussen bekannt (beschränkte Reichweite). Auf der Hand liegt dagegen die Verwendung zur internen Integration von Umlauf- und Dienstplanung: Durch eine künstliche Beschränkung der Umlauflänge auf die maximale Dienstdauer wird die Wahrscheinlichkeit vergrößert, dass jeder Umlauf mit einem Dienst besetzt werden kann.

Die Planung Fahrer = Fahrzeug (oder besser: Dienststück = Umlaufkurs[2]). Diese Methode verwendet das gut entwickelte Instrumentarium der Dienstplanung zur Durchführung einer vereinfachten integrierten Planung. Die Idee ist, Fahrer und Fahrzeuge in dem Sinne miteinander zu identifizieren, dass Fahrzeugwechsel außerhalb eines Depots als tabu erklärt werden. Dann entsprechen sich Dienststücke und Umlaufkurse. Ein zulässiges Umlaufkurs-Dienststück muss unter diesen Umständen neben den üblichen Dienstplanungsregeln lediglich ggf. auch gewissen Umlaufplanungsregeln genügen. Solche Regeln lassen sich gewöhnlich leicht in die Sprache der Dienstplanung übersetzen. Hanisch [1999] berichtet von einem praktischen Einsatz dieser Methode.

Techniken der genannten Art weisen folgende *Nachteile* auf. Keine von ihnen kann irgendeinen Erfolg garantieren. Der Planungsspielraum bzw. die Planungsziele werden willkürlich eingeschränkt oder verändert. Die Methoden sind in sich inkonsistent, da man i.A. viele Ausnahmen von den getroffenen Zusatzannahmen erlauben wird, und zwar immer dann, wenn die künstlichen Ein-

[2] Umlaufkurs = Umlaufstück, das an einem Depot beginnt und endet.

schränkungen überflüssig oder sogar nachteilig sind. Dies zieht ein Probieren, einen hohen Arbeitsaufwand und eine schwere Reproduzierbarkeit von Ergebnissen nach sich. Die Vermeidung von künstlichen Hilfsregeln zur internen Integration ist ein zweites Ziel der integrierten Planung.

Gesamtziel der integrierten Planung. Ein wichtiges Argument für die Machbarkeit von integrierter Planung ist die Gleichartigkeit der Zielkriterien in der Umlauf- und Dienstplanung. In beiden Problemen werden in erster Linie (monetäre) Kosten minimiert, nämlich *Fahrzeugkosten* und *Personalkosten*. Nachgeordnet betrachtet man auch Stabilitäts- und Konvenienzkriterien. Dazu gehören Maßnahmen der Anschlusssicherung und der Vermeidung von Line Hopping in der Umlaufplanung und die Ausrichtung von Diensten an Standards wie dem Dienstschnitt in der Dienstplanung. In der Gesamtsicht ergeben sich aber durch die Integration von Umlauf- und Dienstplanung keine ernsthaften neuen Zielkonflikte. Es gibt ein *natürliches Gesamtziel* integrierter Planung in der Form einer Summe von Kosten der Umlauf- und Dienstplanung bzw. des Produktes der Wirkungsgrade.

Bei der *Ausgestaltung des Gesamtziels* gibt es Wahlmöglichkeiten in Bezug auf die Zusammensetzung der beiden Einzelterme für die Fahrzeug- die Personalkosten und auf deren relative Bedeutung für das Gesamtziel. Diese Wahlmöglichkeiten sollten insbesondere in Bezug auf die Übernahme von Teilen von sequentiellen Zielfunktionen sorgfältig geprüft werden. Wir diskutieren die Form der Einzelterme und drei Gesamtzielfunktionen. Wir beschränken uns der Einfachheit halber auf monetäre Kosten; für andere Kriterien gilt Analoges.

Fahrzeug- und Personalkosten. In der sequentiellen Planung ist die Verwendung von zwei- oder mehrstufigen Zielfunktionen *ohne direkten Bezug zur Kostenrechnung* verbreitet. So minimiert man in der Umlaufplanung typischerweise primär die Fahrzeuganzahl und sekundär Größen wie Fahrkilometer oder Fahrzeit. Desgleichen betrachtet man in der Dienstplanung vorrangig die Dienstanzahl und bedient die sekundären Stellschrauben für die Standardisierung von Diensten „nach Gefühl“.

Solche mehrstufigen Kostenmodelle mit willkürlichen Einheitskosten für Umläufe und Dienste setzen die verschiedenen Kostenbestandteile nicht in das richtige Verhältnis. Sie erlauben keine kontinuierliche und präzise *Verrechnung* verschiedener Kostenkomponenten zu sinnvollen Gesamtkosten. Soweit solche Modelle verwendet werden, ist eine Voraussetzung für die Integration von Umlauf- und Dienstplanung die Umstellung sämtlicher Zielkriterien auf Kostenrechnungsgrößen oder äquivalente Einheiten einer „corporate currency“.

Gesamtkosten. Drei wichtige Varianten sind:

(1) *Summierte Gesamtkosten*

$k_\mathrm{v} + k_\mathrm{d} =$ Fahrzeugkosten + Personalkosten

(2) *Zweistufige Gesamtkosten*

$M \cdot k_\mathrm{v} + k_\mathrm{d} =$ vorrangig Fahrzeugkosten, nachrangig Personalkosten,

wobei $M > \max k_\mathrm{d}$

(3) Planbauwirkungsgrad

$$\eta_v \cdot \eta_d = \frac{\text{Fahrplanmasse}}{\text{Umlaufmasse}} \cdot \frac{\text{Umlaufmasse}}{\text{Dienstplanmasse}} = \frac{\text{Fahrplanmasse}}{\text{Dienstplanmasse}}.$$

In den *summierten Kosten* (1) werden Fahrzeug- und Personalkosten ohne Unterschied miteinander verrechnet. Wenn man, wie wir dies getan haben, Fahrzeug- und Personalkosten mit der gleichen Einheit (monetär oder nicht monetär) misst und bewertet, sind die summierten Kosten die logisch richtigen Gesamtkosten für die integrierte Planung.

Die *zweistufigen Kosten* (2) implementieren eine Zielfunktion, in der die Umlaufoptimierung Vorrang vor der Dienstplanoptimierung hat. Mit dieser Zielfunktion simuliert die integrierte Planung eine sequentielle Planung, d.h. sequentielle Planung kann als integrierte Planung mit einer speziellen Zielfunktion der Form (2) aufgefasst werden.

Dies ermöglicht einen direkten *Vergleich* zwischen sequenzieller und integrierter Planung. Unter der Annahme

(4) $k_v \sim k_d$, d.h. Personal- und Fahrzeugkosten sind proportional,

sind die Zielfunktionen (1) und (2) äquivalent. Diese Annahme ist aber nicht immer gerechtfertigt. Abbildung 2 (siehe Seite 5) gibt ein Beispiel für eine Situation, in der die Personalkosten abnehmen, obwohl die Fahrzeugkosten zunehmen, d.h. die Personal- und Fahrzeugkosten verhalten sich gerade nicht proportional, sondern entgegengesetzt. Dieses Argument zeigt, dass die Proportionalitätsannahme (4) im Regionalverkehr nicht haltbar ist. Insbesondere sind für die Minimierung der summierten Kosten (1) gerade die Fälle mit umgekehrtem Zusammenhang interessant. Im deutschen Regionalverkehr sind die Personalkosten im Schnitt etwa doppelt so hoch wie die Fahrzeugkosten (Leuthardt [1998]). In diesem Licht erscheint dort eine vorrangige Behandlung von Fahrzeugkosten insgesamt wenig attraktiv.

Der Planbauwirkungsgrad (3) gibt den relativen Produktivnutzen einer Arbeitsminute an. Diese Kennzahl ermöglicht gewisse inner- und zwischenbetriebliche Vergleiche. Der Planbauwirkungsgrad berücksichtigt keine *Fixkosten* für Fahrzeuge und Dienste und keine *Zuschläge* für Überstunden etc. Im Extremfall erzielt der Einsatz eines eigenen Fahrzeugs und eines eigenen Fahrers für jede einzelne Fahrgastfahrt einen Umlauf-, Dienstplan- und Planbauwirkungsgrad von 100% (unter der Annahme, dass alle Fahrgastfahrten an Depots beginnen und enden und keine Ergänzungstätigkeiten notwendig werden). Der Planbauwirkungsgrad ist daher nur bedingt für Rückschlüsse auf *Kosten* geeignet.

Der einfachste Fall, in dem dies doch möglich ist, ist:

(5) $\eta_v \sim k_v$, d.h. Umlaufmasse und Fahrzeugkosten sind proportional und

(6) $\eta_d \sim k_d$, d.h. Dienstplanmasse und Personalkosten sind proportional,

d.h. es fallen nur variable Kosten an, die sich gleichförmig auf die Umlauf- und Dienstplanmasse verteilen. Gilt zusätzlich die Proportionalitätsannahme (4), dann sind der Planbauwirkungsgrad und die summierten Kosten (1) äquivalent.

Man kann die Voraussetzungen (5) und (6) näherungsweise herstellen, indem man die nicht proportionalen Kostenkomponenten der Fixkosten, Zuschläge etc. gesondert behandelt. Mit diesem Trick kann man Wirkungsgrade *in der Nähe der Optima der Fahrzeug- und Dienstzahl und bei vergleichbaren Zuschlägen* zur Abschätzung der variablen Kosten verwenden.

Das Beispiel von Abbildung 2 (siehe Seite 5) zeigt, dass die Verwendung solcher Beurteilungstechniken nicht unproblematisch ist. Abbildung 2 zeigt eine Situation, in der eine Verschlechterung des Planbauwirkungsgrades zu einem besseren Plan mit geringeren Kosten führt. Bei Vorgabe der optimalen Dienstanzahl ist dieser Plan zwar auch aus Sicht des Planbauwirkungsgrades optimal. Die Anwendung dieser Planungsmethode auf komplexere Situationen, in denen der Einsatz von Fahrzeugen und Diensten gegeneinander abgewogen werden muss, führt aber auf eine Versuchs- und Irrtumsstrategie zur Bestimmung der richtigen Fahrzeug- und Dienstanzahl.

Zielfunktionen wie (1) und (3) machen die Qualität der internen Integration zu einer präzise messbaren Größe. Die Integrations-Hilfsregeln der sequentiellen Planung versuchen natürlich auch, solche Gesamtziele zu erreichen. Sie tun dies aber auf eine willkürliche Art und Weise. Integrierte Planung löst diese Heuristiken durch eine Optimierung über die Freiheitsgrade der internen Integration ab. Die Integration von Umlauf- und Dienstplanung führt auf diese Weise zu einem *Übergang von Regel- zu Zielplanung* (siehe Borndörfer, Grötschel & Löbel [1998] und Borndörfer, Löbel, Strubbe & Völker [1999]) auf der Ebene der internen Integration.

Übernachtungen. Eine Besonderheit des Regionalverkehrs im Vergleich zum städtischen Verkehr ist das Auftreten externer *Übernachtungen* von Fahrern und Fahrzeugen und das nächtliche Abstellen von Fahrzeugen am Wohnort. Solche Gegebenheiten führen zur Notwendigkeit der *betriebstagsübergreifenden Planung* ähnlich wie im Bahn- und Luftverkehr. Die Übernachtungsproblematik berührt natürlich die integrierte Planung, sie gehört aber eigentlich zum Bereich der externen Integration. Wir möchten sie hier als einen potentiell wichtigen Punkt genannt haben, behandeln sie aber nicht weiter.

Fazit. Integrierte Planung ermöglicht die Nutzung zusätzlicher Freiheitsgrade der internen Integration für Qualitätsverbesserungen und Kosteneinsparungen. Dies ist besonders im Regionalverkehr von Bedeutung. Der Aufwand zur Datenpflege ist etwas höher, dafür entfallen Arbeiten der Abstimmung von Umlauf- und Dienstplanung. Der Preis für diese Verbesserungen sind wesentlich größere und komplexere Planungsprobleme. Deren Lösung erfordert leistungsfähige Werkzeuge der mathematischen Optimierung.

3 Methodik der Integrierten Planung

Die beiden Hauptprobleme der integrierten Planung bestehen darin, einen sehr großen Lösungsraum mit vielen Freiheitsgraden zielgerichtet zu durchsuchen

und eine korrekte Kopplung zwischen Umläufen und Diensten zu gewährleisten. Unser Ansatz setzt dazu auf eine Kombination von Umlauf- und Dienstplanungsverfahren. Diese werden über ein globales lineares Programm (LP) mit Hilfe eines Lagrange-Verfahrens koordiniert. Auf diese Weise ist es möglich, die weit entwickelten Techniken der Umlauf- und Dienstplanoptimierung für die integrierte Planung zu nutzen und gleichzeitig einen globalen Überblick über den Suchraum zu gewinnen.

Wir geben in diesem Abschnitt eine *Übersicht* über die wichtigsten Aspekte unseres Ansatzes. Die Darstellung ist nicht als detaillierte Beschreibung der mathematischen Methodik gedacht; dafür müssen wir auf zukünftige Publikationen verweisen.

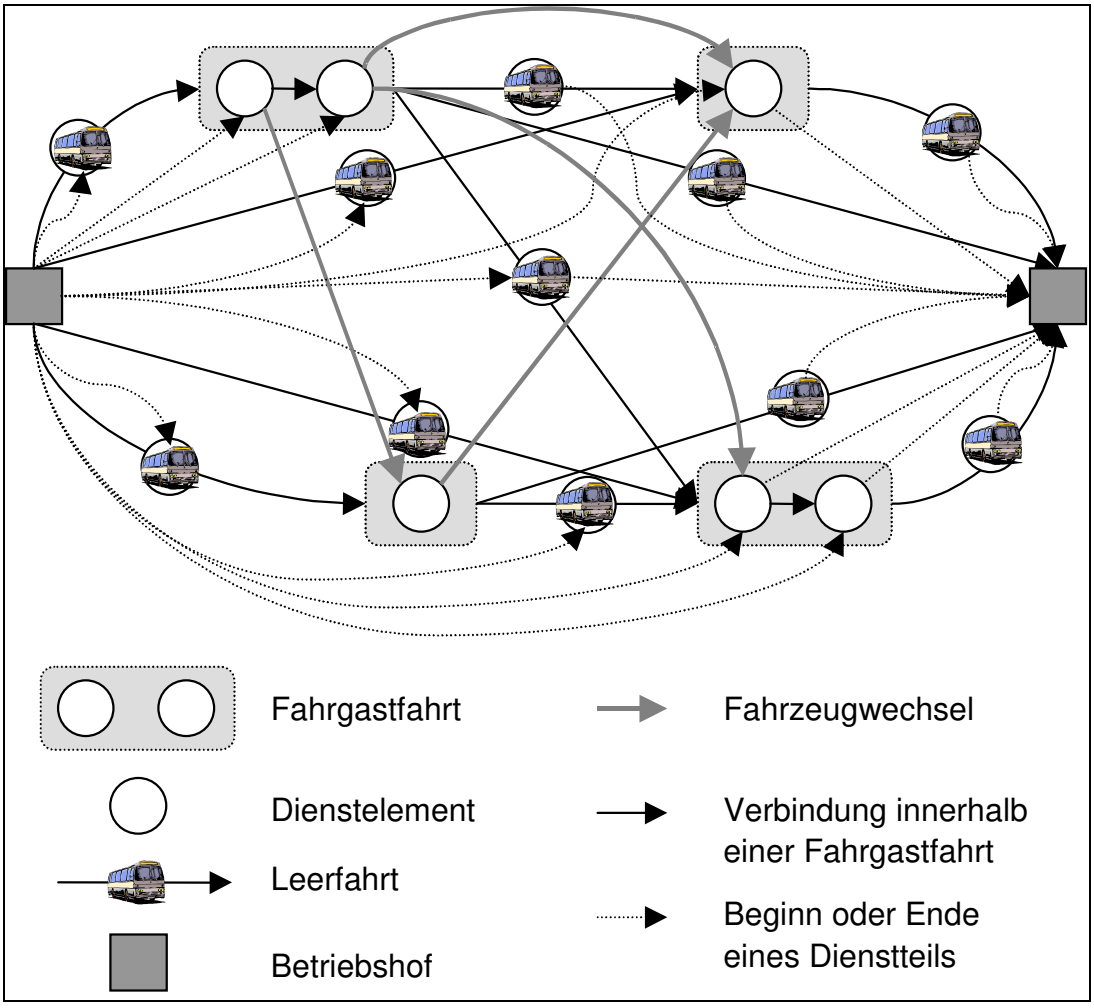

Abbildung 3: Planungsgraph der integrierten Planung

Modellierung. Unser System basiert auf einem *graphentheoretischen Modell* des Problems der integrierten Planung, das früher entwickelte Modelle zur Umlaufplanung (Löbel & Strubbe [1996], Grötschel, Löbel & Völker [1997], Löbel [1999]) und zur Dienstplanung (Borndörfer, Löbel, Strubbe & Völker [1999], Borndörfer, Grötschel & Löbel [2001]) kombiniert. Es umfasst die Datenmodelle von MICROBUS II und DIVA zur Umlauf- und Dienstplanung und sämtliche Freiheitsgrade der internen Integration. Das Modell besteht aus einem *Pla-*

nungsgraphen, dessen Knoten und Kanten die Dienstelemente, Ergänzungselemente, Fahrtenverknüpfungen und die Dienstübergänge zwischen diesen Bestandteilen darstellen, siehe Abbildung 3. Umläufe und Dienste entsprechen *Pfaden* in diesem Graphen. Die Pfade müssen den Bedingungen der Umlauf- bzw. Dienstplanung genügen, sie müssen alle Fahrgastfahrten jeweils genau einmal und die Leerfahrten (bzw. die mit Personal zu besetzenden Fahrtenverknüpfungen) konsistent überdecken, d.h. jede Leerfahrt muss entweder mit genau einem Umlauf und genau einem Dienst überdeckt werden oder gar nicht. Jeder Pfad verursacht Kosten. Gesucht ist eine gekoppelte *Pfadüberdeckung* mit minimalen Gesamtkosten. Das Problem der integrierten Planung stellt sich mathematisch als Kopplung (Auswahl der Leerfahrten) eines *Mehrgüterflußproblems* (Umlaufplanung) mit einem *Pfadüberdeckungproblem* (Dienstplanung) dar.

Wir bearbeiten dieses Modell mit Mitteln der *ganzzahligen Programmierung*. Dazu beschreiben wir das Problem der integrierten Planung (vehicle and crew scheduling problem, kurz VCSP) als ganzzahliges Programm in der Form

$$
\begin{array}{lllllll}
\text{(VCSP)} & \min & cx & + & dy & & \\
\text{(i)} & & Ax & & & = & 1 \\
\text{(ii)} & & & & Ny & = & b \\
\text{(iii)} & & & & My & = & 1 \\
\text{(iv)} & & Bx & - & y & = & 0 \\
\text{(v)} & & x, & & y & & \text{binär.}
\end{array}
$$

Diese Formulierung kombiniert ein pfadorientiertes *Set-Partitioning-Modell* der Dienstplanung mit einem bogenorientierten *Multicommodity-Flow-Modell* der Umlaufplanung. Die Variablen *x* und *y* sind Vektoren mit 0/1 Komponenten für jeden möglichen Dienst bzw. jede mögliche Leerfahrt. Die Vektoren *c* und *d* geben die Kosten der Dienste bzw. der Leerfahrten an. *A* und *B* sind die Inzidenzmatrizen von Fahrgastfahrten und Diensten bzw. von Leerfahrten und Diensten. *N* ist die Netzwerk-Inzidenzmatrix des Leerfahrtendigraphen, *b* ein Vektor von Umlaufbalancen. M ist die Inzidenzmatrix von Fahrtgastfahrten und zuführenden Leerfahrten. Die Bedingungen VCSP (i) formulieren einen gültigen Dienstplan zur exakten einmaligen Abdeckung aller Dienstelemente geplanter Fahrten, (ii) und (iii) einen gültigen Umlaufplan. Die Kopplungsbedingungen (iv) garantieren die konsistente Überdeckung der Leerfahrten. Die Zielfunktion minimiert summierte Kosten von Umlauf- und Dienstplan.

Die Formulierung VCSP beinhaltet Aufzählungen von Diensten und Leerfahrten und kann deshalb nicht explizit angegeben werden. Sie muss mit dynamischen *Zeilen- und Spaltenerzeugungstechniken* bearbeitet werden.

Lösungsmethodik. Der derzeitige Stand der Algorithmen und der Technik lässt eine exakte Lösung von VCSPs realistischer Größenordnung noch nicht zu. Unser Ansatz einer *Lagrange-Relaxierung* der Kopplungsbedingungen VCSP (iv) zielt auf die Bestimmung von näherungsweise optimalen Lösungen, dies aber unter Ausnutzung aller Freiheitsgrade.

Das Prinzip besteht darin, Umlauf- und Dienstpläne mit Mitteln der individuellen

Umlauf- und Dienstplanung zu berechnen und die Kopplung *implizit* zu realisieren. Dazu werden Steuerungsparameter benötigt, die eine konsistente Kopplung der individuellen Pläne erzwingen und gleichzeitig garantieren, dass es keine alternative konsistente Kombination mit besserem Zielfunktionswert gibt.

Solche Steuerungsparameter sind die aus der Theorie der linearen Programmierung bekannten *Schattenpreise*. Die Schattenpreise der Kopplungsgleichungen VCSP (iv) geben die marginalen Kosten einer konsistenten Kopplung an. Diese marginalen Kosten können durch die Berechnung von sog. *reduzierten Kosten* auf die individuellen Probleme der Umlauf- und Dienstplanung heruntergebrochen werden. Die reduzierten Kosten ermöglichen die Berechnung neuer Umlauf- und Dienstpläne mit verbesserter Kopplung und die Abgabe einer Garantie, dass es auf dem dabei erreichten Konsistenzniveau keine bessere Umlauf- und Dienstkombination gibt.

In unserem Verfahren werden diese Schritte iteriert. Mit jedem neuen Umlauf- und Dienstplan verändern sich dabei die Schattenpreise und damit die reduzierten Kosten. Vereinfacht dargestellt werden auf diese Weise inkonsistente oder ungünstige Kopplungen bestraft und Vervollständigungen günstiger Kopplungen belohnt. Dies bedingt wieder eine Neuberechnung von Umlauf- und Dienstplan usw. Im Laufe des Algorithmus verbessert sich der Zielfunktionswert und die Konsistenz der Kopplung. Unterwegs können aber sogenannte Null Steps auftreten; das sind Iterationen, in denen sich der Zielfunktionswert nicht verbessert oder in denen die Güte der Kopplung abnimmt.

Leider garantiert die Theorie der linearen Programmierung nicht, dass dieser Algorithmus nach einer endlichen Anzahl von Schritten mit einer zulässigen und optimalen Lösung terminiert, d.h. es wird i.A. keine vollständige Synchronisation aller Leerfahrten in der Umlauf- und in der Dienstplanung und damit keine zulässige integrierte Lösung erreicht. Das Ergebnis des Lagrange-Verfahrens ist vielmehr eine *untere Schranke* für das bestmögliche Ergebnis einer integrierten Planung. Zur Bestimmung konsistent gekoppelter Lösungen verwendet man zusätzliche *Primalheuristiken*, bei denen man etwa den Umlaufplan fixiert und auf dieser Basis eine Dienstplanung durchführt.

Der wichtigste *Vorteil* der beschriebenen Methodik liegt in dem *globalen Überblick* der LP-Methodik, die den Lösungsraum mit Hilfe von Schattenpreisen strukturiert. Damit wird eine *zielgerichtete Suche* möglich. Diese steuert auf eine relaxierte Lösung zu, die eine untere Schranke für den bestmöglichen Zielfunktionswert liefert. Damit werden zweitens *Aussagen über die Qualität* von integrierten Lösungen möglich. Der dritte Vorteil besteht in einer *Dekomposition* in die gut untersuchten Unterprobleme der Schattenpreisberechnung und der Umlauf- und Dienstplanung. Dies ermöglicht den Einsatz von leistungsfähigen, bereits vorhandenen Verfahren.

Verfahren der integrierten Planung. Unser System IS-OPT implementiert drei Verfahren der integrierten Planung: Eine *integrierte Umlauf- und Dienstplanung* (IUD) in zwei Varianten mit unterschiedlichen Primalheuristiken (IUD-1, IUD-2), ein traditionelles Verfahren der *sequentiellen Umlauf- und Dienstplanung* (SUD) und ein vereinfachtes integriertes Verfahren der „*sequentiellen Dienst- und Umlaufplanung*“ (SDU). Zur Lösung der Umlauf- und Dienstplanungsprobleme

verwenden wir angepasste Versionen von früher entwickelten Verfahren zur Umlaufplanung und Dienstplanung. Die Schattenpreise werden mit einem Subgradientenverfahren aktualisiert. Folgende Details sind zu nennen.

Sequentielle Umlauf- und Dienstplanung (SUD). Dieses Verfahren führt eine klassische *sequentielle Planung* durch, d.h. erst werden die Umläufe geplant und dann mit Diensten unterlegt. Das Verfahren dient Vergleichszwecken und wird in der integrierten Planung als Primalheuristik verwendet.

Integrierte Umlauf- und Dienstplanung (IUD). Geschätzte untere Schranke (GUS). Unsere Implementierung löst die Dienstplanungsprobleme in der Hauptschleife nur in der LP-Relaxation, und auch diese nur approximativ (die Spaltenerzeugung in der Dienstplanung bricht ab, wenn zu lange erfolglos nach Diensten gesucht wird). Wir gehen davon aus, dass die Qualität dieser Approximation gut ist, können dies aber gegenwärtig nicht garantieren. Aus diesem Grund kann auch unser integriertes Verfahren IUD gegenwärtig keine beweisbare untere Schranke liefern, sondern nur einen Schätzwert. Wir bezeichnen diesen Wert als *geschätzte untere Schranke* (GUS).

IUD mit Primalheuristik 1 (IUD-1). Bei dieser Variante wird in jeder Iteration der Hauptschleife mittels SUD eine zulässige Lösung berechnet. Die beste Lösung wird gemerkt. Diese Heuristik liefert eine gute Qualität, ist aber aufwändig.

IUD mit Primalheuristik 2 (IUD-2). Diese Variante ersetzt die Primalheuristik SUD durch ein „*Leerfahrten-Plunging*“. Das Verfahren fixiert in jeder Iteration der Hauptschleife mit Hilfe von reduzierten Kostenkriterien einige Leerfahrten als durchzuführende Fahrten. Die Fixierungen sind zunächst vorläufig. Sie werden abhängig von der Entwicklung des Zielfunktionswertes in der Folgeiteration als im nachhinein gerechtfertigt angesehen oder rückgängig gemacht. In beiden Fällen wird ggf. mit veränderten Kriterien weiterfixiert. Das Verfahren terminiert entweder mit einer zulässigen Lösung oder mit einer Restmasse von nicht mehr weiter verplanbaren Fahrten. Dies passiert beim gegenwärtigen Entwicklungsstand in ca. ein Drittel der Fälle. Da die ersten Fixierungen bereits in der ersten Iteration erfolgen, ist der Wert der GUS im Fall des Verfahrens IUD-2 der Lagrange-Wert nach der ersten Iteration, d.h. für die Startschattenpreise 0. Die GUS für IUD-2 lässt sich damit als eine geschätzte untere Schranke für eine „unabhängige Planung“ von Umläufen und Diensten interpretieren.

Sequentielle Dienst- und Umlaufplanung (SDU). Es handelt sich um ein Verfahren zur vereinfachten sequentiellen Planung im Sinne einer „*Planung Dienststück = Umlaufkurs*“ (siehe Abschnitt 2). Es gibt zwei Hauptunterschiede zur integrierten Planung. Erstens beginnt und beendet SDU ein Umlaufkurs-Dienststück immer mit einer gelenkten Fahrt vom oder zum Betriebshof, während bei IUD auch Passagierfahrten, Fußwege etc. möglich sind. Zweitens berechnet SDU nur Umlaufkurse, die in einem zweiten Schritt erst noch zu Umläufen zusammengesetzt werden müssen. Damit besteht keine Kontrollmöglichkeit über die Anzahl und/oder die Fixkosten von Fahrzeugen.

Bei SDU muss der Dienstplanungsalgorithmus ohne unterstützende Schattenpreisinformation aus einer komplementären Umlaufplanung eine ganzzahlige Lösung für ein Problem mit sehr vielen Freiheitsgraden berechnen. Dies ist im Moment nur für mittelgroße Szenarien möglich.

4 Fallstudien

Wir untersuchen in diesem Abschnitt exemplarisch die Eignung unseres Ansatzes zur integrierten Planung im Regionalverkehr. Unser Ziel ist es zu zeigen, dass integrierte Verfahren Probleme relevanter Größe und Komplexität lösen können und dass sich die Planungsqualität im Vergleich zu sequentiellen Verfahren und vereinfachten integrierten Verfahren u.U. deutlich verbessern kann.

Testszenarien. Zum Zeitpunkt der Durchführung dieser Studie standen uns Daten von drei Regionalplanungsszenarien zur Verfügung. Das kleine Szenario 1 ist anonym. Das mittlere Szenario 2 modelliert einen Teil eines Betriebshofs eines rheinländischen Verkehrsbetriebs. Szenario 3 ist groß; es stellt einen Betriebshof eines Verkehrsbetriebs aus dem Ruhrgebiet dar. Tabelle 1 listet die wichtigsten Statistiken auf. Abbildung 4 zeigt die Profile der Fahrgastfahrten.

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Depots	1	1	1
Fahrgastfahrten	90	253	1457
Leerfahrten	1848	6053	71316
Dauer der Fahrgastfahrten	39,2 h (∅ 26,13 min)	157,8 h (∅ 37,42 min)	754,68 h (∅ 31,08 min)
Min. # von Umläufen	5	24	92
Max. # parallele Fahrgastf.	4	21	82

Tabelle 1: Problemstatistiken

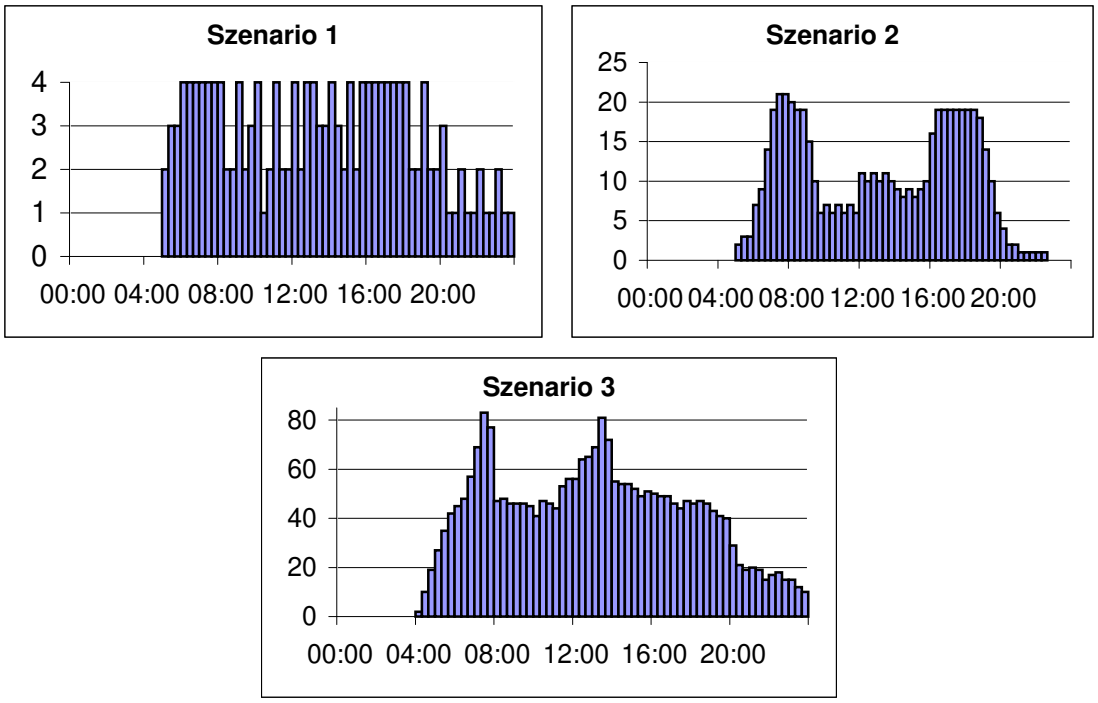

Abbildung 4: Fahrzeitprofile

Unser Daten haben noch nicht die Qualität von echten Produktionsdaten. Sie enthalten nicht alle Informationen, die wir uns für eine integrierte Planung wünschen würden. Wir mussten insbesondere alle Umlauf- und Dienstplanungsre-

geln in Anlehnung an die Praxis selbst hinzufügen. Es folgen die wichtigsten Details.

Planungsgraph. Es handelt sich im Wesentlichen aus um Lenkzeit- und Pauseninformationen auf den Leer- und Fahrgastfahrten ergänzte Umlaufplanungsdaten. Fahrzeugwechsel von Fahrern durch Fußwege etc. sind wegen fehlender Daten nicht möglich.

Umlaufplanung. Alle drei Szenarien sind flottenhomogen. Umlaufkurse können zu einem Umlauf verbunden werden, wenn die Standzeit am Betriebshof mindestens 45 Minuten beträgt.

Dienstplanung. Ein Fahrer beginnt und beendet einen Dienst am Betriebshof mit einer gelenkten Fahrgast- oder Leerfahrt oder einer Fahrt als Passagier. Im ersten Fall fällt keine Wegezeit an, im zweiten Fall berechnen wir die Fahrtdauer plus 10 Minuten als Wegezeit. Es wurden keine Vorbereitungs- oder Abschlusstätigkeiten berücksichtigt. Wir haben drei *Dienstarten* definiert, deren wichtigste Charakteristika in Tabelle 2 dargestellt sind. Für jede dieser Dienstarten sind drei *Pausenregeln* zulässig, die in Tabelle 3 beschrieben sind. Zusätzlich sind Dienste ohne Pause zulässig, wenn die maximale ununterbrochene Lenk- und Arbeitszeit nicht überschritten wird.

	Zusammenhängender Dienst	Geteilter Dienst	Teilzeitdienst
Schichtlänge	5 – 9 h	7 – 12 h	1 – 5 h
Dienstzeit	5 – 8,5 h	5 – 8,5 h	1 – 5 h
Max. ununt. Lenkzeit	4,5 h	4,5 h	4,5 h
Max. ununt. Arbeitszeit	6,5 h	6,5 h	6,5 h
Min. Dauer Dienststück	1 h	1 h	1 h
Dienstteile	1	2	1
Max. Fahrzeugwechsel	3	4	3
Dienstunterbrechung	–	2 – 6 h	–
Dienstbeginn	0:00 – 24:00 Uhr	5:00 – 8:00 Uhr	6:00 – 12:00 Uhr
Dienstbeginn 2. Teil		11:00 – 16:00 Uhr	
Dienstende	0:00 – 24:00 Uhr	14:30 – 18:30 Uhr	7:00 – 17:00 Uhr
Zielarbeitszeit	7 h 46 min	8 h	4 h

Tabelle 2: Dienstarten

	Blockpausen			1/6-Regel
	eine Pause	zwei Pausen	drei Pausen	
Arbeitszeit vor erster Pause	min. 1 h	min. 1 h	max. 5 h	–
Arbeitszeit nach letzter Pause	min. 1 h	min. 1 h	max. 5 h	–
Pausendauer	min. 30 min	min. 20 min	min. 15 min	min. 10 min

Tabelle 3: Pausenregeln

Kostenstruktur. In Ermangelung von Kostenrechnungsdaten optimieren wir

Zeiteinheiten.

Kosten der Dienste. Die *Kosten eines Dienstes* bestehen aus der bezahlten Arbeitszeit, Zu- und Abschlägen für Abweichungen von Zielwerten und gewissen Fixkosten. Die *bezahlte Arbeitszeit* ist gleich der Dienstzeit ohne Dienstunterbrechungen und ohne unbezahlte Pausen. Pausen nach der 1/6-Regel werden bezahlt, Blockpausen sind unbezahlt. Abweichungen von der Zielarbeitszeit werden mit einem *Zuschlag* von 1/5 der jeweiligen Abweichung bestraft. Die Relation von *Fixkosten* zu Zuschlägen bestimmt, ob eher die Dienstzahl minimiert oder eher die durchschnittliche Arbeitszeit erreicht wird. Wir verwenden Fixkosten von zehn Stunden pro Dienst.

Kosten der Umläufe. Die *Kosten der Umläufe* bestehen aus den *Leerfahrtzeiten* und gewissen Fixkosten. Fahrgastfahrten haben keine Kosten, da sie auf jeden Fall überdeckt werden müssen. Die *Fahrzeugfixkosten* müssen in Relation zu den Personalkosten gesehen werden. Nach Bodin, Golden, Assad & Ball [1983] dominieren in Nordamerika die Personalkosten klar die Fahrzeugkosten. Die Personalkosten machen dort bis zu 80% der operativen Gesamtkosten eines Fahrzeugs aus. Nach Leuthardt [1998] und Freling, Huisman & Wagelmans [2000] beträgt das Verhältnis von Personal- zu Fahrzeugkosten im deutschen Regionalverkehr und bei den Rotterdamer Verkehrsbetrieben etwa 2:1. Wir haben, um verschiedene Gegebenheiten abzubilden, drei Fixkostenverhältnisse von 2:1, 1:1 und 1:2 analysiert. Bei unserer Kostenstruktur kostet ein durchschnittlicher Dienst etwa 20 Stunden. Wir betrachten deshalb fixe Fahrzeugkosten von 10, 20 und 40 Stunden.

Strafkosten. Die Verfahren SUD und IUD-2 lassen u.U. einige Fahrten bzw. Dienstelemente unverplant. Wir bestrafen jedes unverplante Dienstelement mit *Strafkosten* von 80 Stunden. Unverplante Dienstelemente gehen außerdem mit ihrer Dauer plus Strafkosten von zwei Stunden in die bezahlte Zeit ein.

Rechenergebnisse. Wir berichten nun die Ergebnisse unserer Berechnungen mit unserem Optimierungssystem IS-OPT für die Szenarien 1 bis 3.

IS-OPT ist in ANSI C implementiert. Der Code wurde mit dem GNU-Compiler gcc Version 3.0.2 und den Optionen -O2 -mcpu=pentiumpro -march=pentiumpro kompiliert. Alle Rechnungen wurden auf einem Siemens Celsius 650 PC mit 2×1,7 GHz Intel Xeon Prozessor, 1GB RDRAM Hauptspeicher und einem Linux 2.4.13 Betriebssystem durchgeführt. Unser Programm verwendete nur einen der beiden Prozessoren.

Die Tabellen mit den Rechenergebnissen sind wie folgt organisiert. Tabelle 4, Tabelle 6 und Tabelle 8 zeigen die *Kosten* der besten Lösungen bzw. Schranke, die für die drei Szenarien mit den Verfahren SUD, SDU, IUD und GUS bestimmt werden konnten. Es werden jeweils die drei Fahrzeugfixkosten-Varianten mit 10 h, 20 h und 40 h betrachtet. Die sequentiellen Verfahren liefern in allen Fällen jeweils die gleiche Lösung; die Kosten unterscheiden sich genau um die unterschiedlichen Fahrzeugfixkosten. Für die kleineren Szenarien 1 und 2 wurde als integriertes Verfahren IUD-1 verwendet. Dies war für das große Szenario genauso wenig möglich wie die Anwendung von SDU. Für Szenario 3 wurde integriert mit IUD-2 gerechnet. SDU wurde abgebrochen.

Tabelle 5, Tabelle 7 und Tabelle 9 zeigen wichtige Charakteristika der berechneten *Lösungen*. Da SUD und SDU für alle Fixkosten die gleiche Lösung liefern, enthalten die Tabellen für diese Verfahren nur eine Spalte. Die beiden letzten Zeilen enthalten Rechenstatistiken. Die letzte Zeile gibt an, wie viele Diensterzeugungsiterationen (column generation phases) im Dienstplanungsalgorithmus (c) bzw. wie viele Subgradienten-Iterationen in der Hauptschleife des Lagrange-Verfahrens (s) durchgeführt wurden. In der vorletzten Spalte ist die gesamte Rechenzeit der Verfahren (inklusive Dateneinlesen) angegeben. Der Großteil der Rechenzeit (> 50%) wird in der Diensterzeugung (column generation) verbraucht, die Berechnungen der geschätzten unteren Schranken benötigen weitere 30%. Die Berechnung der Umlaufpläne kostet dagegen nur sehr wenig Rechenzeit (< 0,1%). Dies liegt unter anderem daran, dass wir flottenhomogene Szenarien betrachten. Der Umlaufplanungsalgorithmus wäre aber auch im Mehrdepotfall kein Bottleneck.

Szenario 1	SUD	SDU	IUD-1	GUS
10 h	3322,00	302,20	277,43	269,54
20 h	3372,00	372,20	324,07	316,34
40 h	3472,00	512,20	426,45	417,17

Tabelle 4: Kosten (Szenario 1)

Szenario 1	SUD	SDU	IUD-1		
Fahrzeugfixkosten	10-40 h	10-40 h	10 h	20 h	40 h
# Umläufe	5	7	5	5	5
# Dienste	19	9	9	9	9
# unverpl. Fahrten	35	--	--	--	--
Wirkungsgrade					
- Fahrplan	67,90%	64,88%	66,50%	65,17%	66,16%
- Dienstplan	44,08%	88,41%	91,04%	91,95%	87,03%
- Planbau	29,93%	57,67%	60,54%	59,92%	57,58%
Rechenzeit/sek.	24	164	949	1528	3358
# Iterationen c/s	5/--	17/--	120/28	247/55	567/117

Tabelle 5: Lösungen (Szenario 1)

Der *Stand* der integrierten Planung mit IS-OPT stellt sich wie folgt dar.

Wir sind in der Lage, Szenarien praxisrelevanter Größe und Komplexität in vernünftiger Zeit zu bearbeiten, d.h. eine integrierte Planung ist *möglich*. Wir bemerken, dass Szenario 3 nach unserem Kenntnisstand das größte integrierte Problem ist, das bisher in dieser Weise bearbeitet wurde. Es markiert in etwa die Grenze des derzeit in IS-OPT Möglichen.

Qualitätsaussagen sind in Ermangelung einer echten unteren Schranke problematisch. Der Quotient GUS/IUD liegt bis auf einen Fall (Szenario 3 mit 20 h) immer über 97%, in diesem Fall über 95%. Dies zeigt in jedem Fall eine gute Qualität der Primalheuristiken an. Freling, Huisman & Wagelmans [2001] weisen darüber hinaus in einem Fall nach, dass eine GUS-ähnliche geschätzte Schranke akkurat ist. Die (zugegeben heuristische) Übertragung dieses Argu-

ments würde unseren Ergebnissen eine sehr gute Qualität bescheinigen.

Szenario 2	SUD	SDU	IUD-1	GUS
10 h	4431,07	2364,32	2247,63	2215,07
20 h	4671,07	2624,32	2506,34	2448,88
40 h	5151,07	3144,32	3018,70	2943,24

Tabelle 6: Kosten (Szenario 2)

Szenario 2	SUD	SDU	IUD-1		
Fahrzeugfixkosten	10-40 h	10-40 h	10 h	20 h	40 h
# Umläufe	24	26	24	24	24
# Dienste	53	46	46	47	47
# unverpl. Fahrten	36	--	--	--	--
Wirkungsgrade					
- Fahrplan	73,13%	68,36%	72,14%	72,52%	72,03%
- Dienstplan	64,33%	80,18%	76,39%	75,29%	79,62%
- Planbau	47,05%	54,81%	55,11%	54,60%	57,35%
Rechenzeit/sek.	239	2414	10555	10959	10473
# Iterationen c/s	9/--	34/--	133/21	169/23	103/24

Tabelle 7: Lösungen (Szenario 2)

Dies gilt auch im *Vergleich* mit den sequentiellen Verfahren.

Das Verfahren *SDU* erreicht oder übertrifft durch seine Fokussierung auf die Dienstplanung zwar im Dienstplan- und im Planbauwirkungsgrad IUD. Es benötigt dafür jedoch viele Fahrzeuge. SDU erkauft sich also den guten Planbauwirkungsgrad mit einem teuren Umlaufplan.

Szenario 3	SUD	SDU	IUD-2	GUS
10 h	13513,60	--	3955,34	3879,52
20 h	14433,60	--	5001,79	4763,24
40 h	16273,60	--	6744,72	6606,64

Tabelle 8: Kosten (Szenario 3)

Szenario 3	SUD	SDU	IUD-2		
Fahrzeugfixkosten	10-40 h	10-40 h	10 h	20 h	40 h
# Umläufe	92	--	92	94	92
# Dienste	175	--	150	150	152
# unverpl. Fahrten	116	--	--	1	--
Wirkungsgrade		--			
- Fahrplan	72,38%		72,73%	72,38%	72,54%
- Dienstplan	73.83%		87,85%	88,34%	87,50%
- Planbau	53,44%		63,90%	63,94%	63,48%
Rechenzeit/sek.	750	>108.000	23524	21707	20201
# Iterationen c/s	14/--	--	629/205	531/196	448/92

Tabelle 9: Lösungen (Szenario 3)

Das Verfahren *SUD* hat das gegenteilige Problem. Es ignoriert bei der Erstellung der Umlaufpläne den Pausenbedarf der Fahrer und die Ablöseproblematik. Dies führt zwar zu guten Fahrplanwirkungsgraden, aber auch zu ungünstigen Diensten oder sogar unverplanten Dienstelementen und zu einem schlechten Planbauwirkungsgrad. Abbildung 1 illustriert diesen Sachverhalt für das Szenario 3. Punkt 1 bezeichnet das Ergebnis von SUD. Aufgrund unverplanter Fahrten ist der Dienstplanwirkungsgrad schlecht. Punkt 2 stellt das Ergebnis der integrierten Planung IDU-2 für Fahrzeugfixkosten von 10 h dar. Der Fahrplanwirkungsgrad hat sich kaum verschlechtert. Der Dienstplanwirkungsgrad ist dagegen um 14% besser. Dadurch steigt der Planbauwirkungsgrad um ca. 10%.

Unsere Studie untersuchte auch den Einfluss von *Fahrzeugfixkosten*. Es stellt sich heraus, dass diese in den drei betrachteten Szenarien keine große Rolle spielen. IUD-1 bzw. IUD-2 finden meist einen Plan mit der minimalen Anzahl von Umläufen und in etwa der gleichen Anzahl von Diensten wie SDU. Es war deshalb nicht möglich, die Gesamtkosten zu reduzieren, indem auf Kosten der Dienste Umläufe gespart wurde oder umgekehrt.

5 Literatur

Ball, Bodin & Dial [1983] A Matching Based Heuristic for Scheduling Mass Transit Crews and Vehicles. *Transportation Science 17*, S. 4–31.

Borndörfer, Grötschel & Löbel [1998] Optimization of Transportation Systems. ZIB Preprint SC 98–09, erhältlich im WWW unter URL www.zib.de.

Borndörfer, Grötschel & Löbel [2001] Scheduling Duties by Adaptive Column Generation. ZIB Preprint ZR 01–02, erhältlich im WWW unter URL www.zib.de.

Borndörfer, Löbel, Strubbe & Völker [1999] Zielorientierte Dienstplanoptimierung. In *Heureka ´99: Optimierung in Verkehr und Transport*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, S. 171–194.

Darby-Dowman, Jachnik, Lewis & Mitra [1988] Integrated Decision Support Systems for Urban Transport Scheduling: Discussion of Implementation and Experience. In Daduna & Wren (Hrsg.) [1988] *Computer-Aided Transit Scheduling*. Proceedings of the 4th International Workshop on Computer-Aided Scheduling of Public Transport. Springer Verlag, Berlin, S. 226–239.

Falkner & Ryan [1992] EXPRESS: Set Partitioning for Bus Crew Scheduling in Christchurch. In Desrochers & Rousseau (Hrsg.) [1992] *Computer-Aided Transit Scheduling*. Proceedings of the 5th International Workshop on Computer-Aided Scheduling of Public Transport. Springer Verlag, Berlin, S. 359–378.

Fengler & Kolonko [1997] Entwicklung von Fahrplänen unter mehrfacher Zielsetzung. *Der Nahverkehr 11/97,* S. 45–48.

Fischetti, Lodi, Martello & Toth [2001] A Polyhedral Approach to Simplified Crew Scheduling and Vehicle Scheduling Problems. *Management Science 47*, S. 833–850.

Freling [1997] Models and Techniques for Integrating Vehicle and Crew Scheduling. Dissertation, Erasmus Universität Rotterdam.

Freling, Huisman & Wagelmans [2001] Applying an Integrated Approach to Vehicle and Crew Scheduling in Practice. In Voß & Daduna (Hrsg.) [2001] C*omputer-Aided Scheduling of Public Transport*. Proceedings of the 8th International Workshop on Computer-Aided Scheduling of Public Transport. Springer Verlag, Berlin, S. 73–90.

Freling, Wagelmans & Paixão [1999] An Overview of Models and Techniques for Integrating Vehicle and Crew Scheduling. In Wilson (Hrsg.) [1999] *Computer-Aided Transit Scheduling*. Proceedings of the 7th International Workshop on Computer-Aided Scheduling of Public Transport. Springer Verlag, Berlin, S. 441–460.

Grötschel, Löbel & Völker [1997] Optimierung des Fahrzeugumlauf im Öffentlichen Nahverkehr. In Hoffmann, Jäger, Lohmann & Schunck (Hrsg.) [1997] *Mathematik – Schlüsseltechnologie für die Zukunft*. Springer Verlag, Berlin, S. 609–624.

Haase, Desaulniers & Desrosiers [2001] Simultaneous Vehicle and Crew Scheduling in Urban Mass Transit Systems. *Transportation Science 35*, S. 286–303.

Haghani & Banihashemi [2001] Heuristic Approaches for Solving Large-Scale Bus Transit Vehicle Scheduling Problem with Route Time Constraints. *Transportation Science 36,* S. 309–333.

Hanisch [1999] Der Regionalverkehr Köln GmbH und Hastus. Erhältlich im WWW unter URL www.giro.ca/articles/Deutch/Koln.htm.

Lehner [1978] *Der maximale Wirkungsgrad des Personaleinsatzes*. Alba Buchverlag, Düsseldorf.

Leuthardt [1998] Kostenstrukturen von Stadt-, Überland- und Reisebussen. *Der Nahverkehr 6/98*, S. 19–23.

Löbel [1999] Solving Large-Scale Multiple-Depot Vehicle Scheduling Problems. In Wilson (Hrsg.) [1999] *Computer-Aided Transit Scheduling*. Proceedings of the 7th International Workshop on Computer-Aided Scheduling of Public Transport. Springer Verlag, Berlin, S. 195–222.

Löbel & Strubbe [1996] Wagenumlaufoptimierung – Methodischer Ansatz und Praktische Anwendung. In *Heureka ´96: Optimierung in Verkehr und Transport*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, S. 341–355.

Patrikalakis & Xerocostas [1992] A New Decomposition Scheme of the Urban Public Transport Scheduling Problem. In Desrochers & Rousseau (Hrsg.) [1992] *Computer-Aided Transit Scheduling.* Proceedings of the 5th International Workshop on Computer-Aided Scheduling of Public Transport. Springer Verlag, Berlin, S. 407–425.

Spenke [2002] *Umlaufplanung mit Längenrestriktionen*. Diplomarbeit, TU Berlin.