

2009

OPTIMIERUNGSSYSTEME IM ÖPNV: MEHRDEPOTUMLAUF- UND DIENSTPLANUNG MIT ZEITFENSTERN FÜR GEPLANTE FAHRTEN

Natalia Kliewer
Universität Paderborn

Bastian Amberg
Universität Paderborn

Boris Amberg
Universität Paderborn

Follow this and additional works at: <http://aisel.aisnet.org/wi2009>

Recommended Citation

Kliewer, Natalia; Amberg, Bastian; and Amberg, Boris, "OPTIMIERUNGSSYSTEME IM ÖPNV: MEHRDEPOTUMLAUF- UND DIENSTPLANUNG MIT ZEITFENSTERN FÜR GEPLANTE FAHRTEN" (2009). *Wirtschaftsinformatik Proceedings 2009*. 89. <http://aisel.aisnet.org/wi2009/89>

This material is brought to you by the Wirtschaftsinformatik at AIS Electronic Library (AISeL). It has been accepted for inclusion in Wirtschaftsinformatik Proceedings 2009 by an authorized administrator of AIS Electronic Library (AISeL). For more information, please contact elibrary@aisnet.org.

OPTIMIERUNGSSYSTEME IM ÖPNV: MEHRDEPOT- UMLAUF- UND DIENSTPLANUNG MIT ZEITFENSTERN FÜR GEPLANTE FAHRTEN

Natalia Kliewer, Bastian Amberg, Boris Amberg¹

Kurzfassung

Zunehmender Wettbewerb und Kostendruck verlangen von Unternehmen des öffentlichen Personennahverkehrs Fahrzeuge und Personal kosteneffizient einzusetzen. Die Planungsaufgaben Umlauf- und Dienstplanung sind komplex und werden in der Praxis traditionell nacheinander durchgeführt. Dabei können Planer durch Planungssysteme mit Optimierungskomponenten unterstützt werden, die kostenoptimale Lösungen für Planungsaufgaben vorschlagen.

Kosteneffizientere Pläne können durch mehr Flexibilität in der Planung erreicht werden, z.B. dadurch, dass beide Planungsprobleme gleichzeitig in einem integrierten Ansatz berücksichtigt werden oder durch zeitliches Verschieben bereits geplanter Fahrten im Rahmen vorgegebener Zeitfenster/Verschiebeintervalle. In diesem Beitrag wird die Kombination beider Konzepte zur Unterstützung von Planungsentscheidungen diskutiert. Es werden Modellierung und Lösungsverfahren, sowie Rechenergebnisse vorgestellt.

1. Einleitung

Kosteneffiziente Ressourceneinsatzplanung ist für Unternehmen des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) zu einem wirtschaftlichen Faktor mit hoher Relevanz geworden. Um Einsparpotentiale zu ermitteln, nutzen immer mehr Betriebe spezielle Entscheidungsunterstützungssoftware für die Planung und Optimierung der Betriebsabläufe. Dabei ermöglicht die rasante Entwicklung mathematischer und technischer Mittel die Einbettung von Optimierungsmodellen bzw. -verfahren in diese Planungssysteme. Produkte dieser Art werden von unterschiedlichen Anbietern auf dem Markt für Planungssoftware angeboten. Dazu zählen unter anderem das System Hastus (Giro Inc.), Microbus (IVU AG) und Interplan bzw. Mobile-Plan (INIT AG). Einige der in diesem Beitrag beschriebenen Ansätze sind in die Software Interplan bzw. Mobile-Plan integriert.

Wir betrachten die im ÖPNV auftretenden Umlaufplanungsprobleme (engl.: *vehicle scheduling problems, VSPs*) und Dienstplanungsprobleme (engl.: *crew scheduling problems, CSPs*). Die entsprechenden Planungsaufgaben bestehen darin, Fahrzeugumläufe für geplante Fahrten eines vorgegebenen Fahrplans zu bilden, sowie Fahrerdienste für Aufgaben, die sich aus dem Umlaufplan ergeben. Traditionellerweise werden in der Praxis beide Schritte aufgrund ihrer Komplexität sequentiell geplant, indem Umlaufpläne vor Dienstplänen bestimmt werden. Eine integrierte Betrachtung

¹ Universität Paderborn, Decision Support & OR Lab, Warburger Str. 100, D-33098 Paderborn

der Umlauf- und Dienstplanung in einem Optimierungsproblem erhöht die Flexibilität in der Dienstplanung und kann daher zu Effizienzgewinnen gegenüber der sequentiellen Planung führen. Als Input für die Umlaufplanung ist üblicherweise ein Fahrplan fest vorgegeben, der aufgrund von Kundennachfrage bestimmt wurde und die Fahrten zur Personenbeförderung definiert. Wird der Fahrplan nicht mehr als feste Ausgangsgröße betrachtet, sondern in gewissen Grenzen durch geringfügiges zeitliches Verschieben von Fahrten innerhalb von Zeitfenstern variiert, kann die Flexibilität in der Umlaufplanung erhöht werden.

Die Kombination beider Konzepte – integrierte Planung und Zeitfenster – verspricht die größten Einsparmöglichkeiten. Sie führt aber, aufgrund der extrem wachsenden Problemgröße, offensichtlich auch zu explodierenden Lösungszeiten. In diesem Beitrag werden beide Konzepte kombiniert und die Performanz verschiedener Varianten des entwickelten Lösungsansatzes untersucht.

Der Beitrag ist wie folgt aufgebaut: In Abschnitt 2 werden die betrachteten Planungsprobleme definiert. Abschnitt 3 beschreibt kurz den aktuellen Stand der Forschung für Ansätze zur Umlauf- und Dienstplanung. In Abschnitt 4 wird der Modellierungsansatz vorgestellt, in Abschnitt 5 die Integration in Planungssysteme. Abschnitt 6 zeigt erzielte Testergebnisse und in Abschnitt 7 wird eine Zusammenfassung gegeben.

2. Problemstellung

2.1. Fahrzeugumlaufplanung

Das der Umlaufplanung zugrunde liegende Planungsproblem (VSP) besteht darin, Fahrzeugumläufe für eine Menge von geplanten Fahrten (auch *Servicefahrten* genannt) so zu bilden, dass jede Fahrt von genau einem Fahrzeug bedient wird und jedes Fahrzeug am Ende des Betriebstages in sein Depot zurückkehrt. Verschiedene Arten des VSP ergeben sich durch zusätzliche Anforderungen und Freiheitsgrade, die in die Planungsentscheidungen einbezogen werden. Häufig zu berücksichtigen sind mehrere Depots für Fahrzeuge, heterogene Flotten und Fahrzeugtypgruppen. Des Weiteren werden Depot-Kapazitäten und Beschränkungen der Fahrzeuganzahl für Fahrzeugtypen betrachtet. Ein *optimaler* Umlaufplan ist durch minimale Gesamtkosten des Fahrzeugeinsatzes charakterisiert. Diese umfassen fixe Kosten für jedes genutzte Fahrzeug und variable, operative Kosten, die aus entfernungsabhängigen und zeitabhängigen Kosten bestehen. Da die fixen Kostenkomponenten üblicherweise erheblich größer als die operativen Kosten sind, enthält eine optimale Lösung immer eine minimale Anzahl von Fahrzeugen. Im Gegensatz zum Ein-Depot-Fall ist der Mehrdepot-Fall (engl.: *multiple depot vehicle scheduling problem, MDVSP*) NP-hart [1].

2.2. Dienstplanung

Das der Dienstplanung zugrunde liegende Planungsproblem (CSP) ähnelt dem Umlaufplanungsproblem, enthält aber zusätzlich Restriktionen, die gesetzliche, tarifliche und betriebliche Vorschriften für Fahrer betreffen. Die Aufgaben werden so anonymen (Tages)Diensten zugeordnet, dass jede Aufgabe ausgeführt wird, jeder entstehende Dienst die Vorschriften erfüllt, und die Gesamtkosten der Dienste minimiert werden. Die entstehenden Dienste werden als Input für die auf die Dienstplanung folgende Dienstreihenfolgeplanung genutzt, in welcher wöchentliche oder monatliche Sequenzen von Diensten konkreten Fahrern zugeordnet werden.

Eine Aufgabe, auch *Dienstelement* genannt, ist eine Sequenz von Aktivitäten, wie das Durchführen von Service- oder Leerfahrten, zwischen zwei aufeinanderfolgenden Ablösepunkten und repräsentiert die kleinste Menge an Arbeit, die einem Fahrer zugeteilt werden kann. Ein *Ablösepunkt* definiert Zeit und Ort, an welchen ein Fahrer sein Fahrzeug wechseln kann. Eine Sequenz von Aufgaben, die ein Fahrer auf einem Fahrzeug ohne Pausenunterbrechung bedient, bildet ein *Dienststück*. Ein *Dienst* besteht aus Dienststücken, die durch Pausen getrennt sind. Üblicherweise gibt es eine

Vielzahl von Diensttypen mit jeweils anderer Regelmenge. Beispiele für Dienstregeln sind minimale/maximale Arbeits- bzw. Lenkzeit, minimale Pausenlänge oder maximale Dauer eines Dienstes. Das CSP zählt bereits dann zur Klasse der NP-harten Probleme, wenn als einzige Regel, die bei der Dienstbildung zu erfüllen ist, eine Beschränkung der Arbeitszeit zu berücksichtigen ist (vgl. [6]).

2.3. Integrierte Umlauf- und Dienstplanung

Umlauf- und Dienstplanung werden traditionell sequentiell ausgeführt, d.h. Umlaufpläne werden vor Dienstplänen bestimmt. Integration und simultane Lösung beider Aufgaben kann aufgrund zusätzlicher Freiheitsgrade weitere Einsparpotentiale aufdecken. Das integrierte Umlauf- und Dienstplanungsproblem (engl.: *integrated vehicle and crew scheduling problem, IVCSP*) kann für eine gegebene Menge von Fahrten, Depots und Ablösepunkten wie folgt formuliert werden: Finde eine kostenminimale Menge von Umläufen und Diensten, so dass sowohl der Umlauf- als auch der Dienstplan zulässig und beide Pläne *kompatibel* sind. Diese sind dann kompatibel, wenn jede Service- und jede Leerfahrt eines Umlaufes durch (genau) einen Dienst abgedeckt werden. Der hier betrachtete Mehrdepot-Fall (MD-IVCSP) ist NP-hart, da sowohl MDVSP als auch CSP NP-hart sind.

2.4. Zeitfenster oder Verschiebeintervalle für geplante Fahrten

Das Berücksichtigen von Zeitfenstern oder Verschiebeintervallen (engl. *time windows, TW*) für Fahrplanfahrten bietet enormes Potential für die Ressourceneinsatzplanung im ÖPNV. Ein geringfügiges zeitliches Verschieben von Fahrten kann eine deutliche Einsparung im Fahrzeug- sowie Dienstbedarf bewirken. Das Einsparpotential ergibt sich durch neue mögliche Fahrtverknüpfungen, die ohne Verschiebung nicht möglich wären. Da die Servicefahrten im ÖPNV in der Regel minutengenau geplant werden, sind die Werte ihrer Ankunfts- und Abfahrtszeiten diskret. Die Fahrten können somit immer um ein Vielfaches der entsprechenden Zeiteinheit (hier Minuten) verschoben werden: z.B. auf 9:59 Uhr oder 10:01 Uhr bei einem Zeitfenster von -1 bis +1 Minute bezogen auf eine anfänglich geplante Abfahrtszeit von 10:00 Uhr. Die Fahrtdauer bleibt dabei erhalten.

Falls Umlauf- und Dienstplanung im Planungsprozess sequentiell durchgeführt wird, macht es Sinn, Zeitfenster oder Verschiebeintervalle bei der Umlaufplanung zu berücksichtigen. In diesem Fall wird zuerst das Mehrdepot-Umlaufplanungsproblem mit Zeitfenstern (*MDVSP-TW*) gelöst und daran anschließend das CSP mit dem errechneten optimalen Umlaufplan als Input. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, Zeitfenster im integrierten Ansatz zu betrachten, also das integrierte Umlauf- und Dienstplanungsproblem mit Zeitfenstern (*MD-IVCSP-TW*) zu lösen. In diesem Beitrag werden beide Varianten betrachtet und verglichen.

3. Stand der Forschung - Ansätze für MDVSP, CSP und IVCSP

Modellierungsansätze für das MDVSP bilden das Planungsproblem üblicherweise in einem Netzwerk-basierten Modell ab, welches eine Mehr-Schichten- oder eine Mehrgüter-Struktur besitzt. Viele Ansätze für das MDVSP berücksichtigen mögliche Paare von *kompatiblen* – d.h. hintereinander von einem Fahrzeug ausführbaren – Fahrten dadurch, dass für jedes Paar entsprechende Verbindungskanten in das Netzwerkmodell eingefügt werden. Diese explizite Modellierung aller möglichen kompatiblen Fahrtenpaare charakterisiert die meisten der existierenden Netzwerkfluss- (z.B. [18]), Quasi-Assignment ([7]) oder Set-Partitioning- ([19]) Modelle für das MDVSP und führt dazu, dass die Modelle sehr groß werden.

In [14], [16] und [17] wird ein Modellierungsansatz für das MDVSP vorgestellt, der den Nachteil einer expliziten Betrachtung aller möglichen Verbindungen vermeidet. Dieser Ansatz basiert auf einem aggregierten *Time-Space-Netzwerk* (im Folgenden *TSN*). In dieser Art von Netzwerk werden

mögliche Verbindungen zwischen Gruppen von kompatiblen Fahrten aggregiert. Dadurch verringert sich die Anzahl der Verbindungskanten im Netzwerk drastisch (stabil bei 97 bis 99%) im Vergleich zu oben genannten Ansätzen. Aufgrund dieser Art der Modellierung können die entsprechenden Mehrgüter-Fluss-Modelle sogar bei großen Instanzen mit der Branch&Cut Methode von Standard MIP-Solvern (wie ILOG CPLEX und MOPS) in akzeptabler Zeit gelöst werden. Für einen Überblick über Modelle für das MDVSP sei auf [3] verwiesen.

Das CSP wird meist als Set-Partitioning oder Set-Covering Problem formuliert. Da die Anzahl möglicher Dienste und damit Variablen des Modells bei realen Planungsproblemen riesig ist, werden diese Problemformulierungen mit Hilfe eines Column Generation Verfahrens gelöst (z.B. [8]).

In [8] wird die erste *integrierte Betrachtung von Umlauf- und Dienstplanung* vorgeschlagen. Die erste allgemeine mathematische Formulierung für das integrierte Umlauf- und Dienstplanungsproblem mit mehreren Depots (MDVCSP) wird von [12] vorgeschlagen. Grundsätzlich bestehen beide Lösungsansätze aus zwei Phasen: in der ersten Phase wird eine untere Schranke für den optimalen Lösungswert mit einem Column Generation Ansatz in Kombination mit Lagrange-Relaxation berechnet, während in der zweiten Phase eine zulässige Lösung erstellt wird. Das Lagrange-Dual-Problem wird näherungsweise mit einem Subgradientenverfahren gelöst. [2] schlagen einen Ansatz mit einer Adaption einer proximalen Bündel-Methode vor, um das Lagrange-Dual-Problem zu lösen. [9], [10] und [20] übernehmen die TSN-Struktur von [14], [16] und [17] für das IVCSP. Die Modellierung wird mit dem Lösungsschema von [8] kombiniert.

In [4] wird ein Umlaufplanungs-Ansatz vorgestellt, der *Zeitfenster für Fahrten* während Auslastungsspitzen berücksichtigt. Viele Autoren formulieren das VSP als Set-Partitioning Problem und lösen es mit Column Generation (z.B. [7]). In [11] wird ein Zeitfenster-Reduktionsschema für diese Formulierung präsentiert. Der erste exakte Ansatz, der die Betrachtung von Zeitfenstern im MDVSP erlaubt, und auf einem TSN-Modell basiert, wird in [14] und [15] vorgestellt und bildet die Basis für die Erweiterungen in diesem Beitrag. [13] weisen darauf hin, dass Zeitfenster für Fahrtenverschiebungen theoretisch mit einer integrierten Umlauf- und Dienstplanung verknüpft werden können. Praktisch umgesetzte /implementierte Modelle und Lösungsverfahren zur *integrierten Umlauf- und Dienstplanung mit Zeitfenstern* für Fahrtenverschiebungen existieren – soweit bekannt – in der Literatur nicht. Dies soll in diesem Beitrag geleistet werden.

4. Netzwerkmodell

4.1. Basis Time-Space-Netzwerkmodell

Die in diesem Beitrag genutzten Modelle für MDVSP und MD-IVCSP basieren auf dem TSN-Modell nach [17]. Das Umlaufplanungsproblem wird als Mehrgüter-Fluss-Problem in einem TSN mit mehreren Schichten modelliert. Dazu wird pro Depot-Fahrzeugtyp-Kombination eine eigene Netzwerkschicht aufgestellt. In jeder Schicht werden die potentiellen Fahrzeugaktivitäten (Servicefahrten, Leerfahrten, Warten) als Kanten zwischen Time-Space-Punkten (mögliche Abfahrts- und Ankunftsereignisse an einer Haltestelle bzw. einem Depot) dargestellt. Alle Time-Space-Punkte an einer Haltestelle bzw. an einem Depot sind in Ereignis-Zeitlinien organisiert, d.h. die Ereignisse sind zeitlich geordnet, gruppiert und durch Wartekanten miteinander verbunden.

4.2. Modellierung der Zeitfenster für geplante Fahrten

Um die möglichen Fahrtenverschiebungen im Netzwerkmodell abzubilden, wird ein neuer Typ von Kanten definiert: die *Zeitfenster-Kanten*. Diese Kanten werden wie folgt in das Modell eingefügt:

Multiplikation von Kanten: Die Zeitfenster-Kanten stellen Multiplikationen von originalen Servicefahrt-Kanten dar. Zu jeder Servicefahrt mit gegebenem Zeitfenster werden parallele Zeitfenster-

Kanten im TSN eingefügt, wobei jede davon eine Fahrtverschiebung um eine bestimmte Zeit repräsentiert. Jede neue Kante benötigt eine zusätzliche Flussvariable im mathematischen Modell.

Reduktion der Modellgröße: Das Hinzufügen der Zeitfenster-Kanten macht die Netzwerke komplexer und das ohnehin NP-harte Problem noch schwieriger lösbar. Um die Modellgröße nicht unnötig anwachsen zu lassen, werden nur die Zeitfenster-Kanten in die Netzwerke eingefügt, die tatsächlich einen neuen Anschluss bzw. zusätzliche Pausenmöglichkeiten ermöglichen können und nicht-redundant sind. Abbildung 1 zeigt ein Beispiel, in dem von vier möglichen Zeitfenster-Kanten für eine Servicefahrt von der Haltestelle 2 zur Haltestelle 1 nur zwei sinnvoll sind, weil sie neue Anschlüsse in einer der beiden Haltestellen ermöglichen (vgl. [14], [15]).

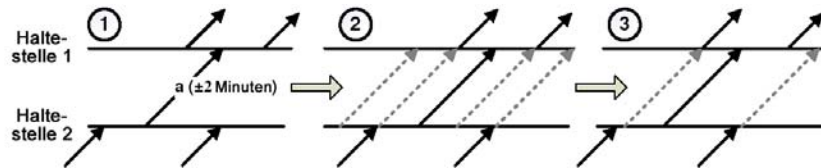


Abbildung 1: Reduktion überflüssiger Zeitfenster-Kanten

4.3. Erweiterungen für praktische Anwendungen

Im Praxiseinsatz bei Unternehmen des öffentlichen Personennahverkehrs, müssen bei der Planung mit Zeitfenstern oftmals zusätzliche Bedingungen berücksichtigt werden.

Strafkosten für Fahrtverschiebungen: Zwar sollen durch Fahrtverschiebungen Ressourcen eingespart werden, allerdings muss dabei der gegebene Fahrplan möglichst unberührt bleiben. Um sicherzustellen, dass eine Verschiebung nur stattfindet, wenn dadurch auch eine Einsparmöglichkeit von Fahrzeugen und Diensten entsteht, werden im Modell Strafkosten für Verschiebungen eingeführt.

Erhalten von Anschlussmöglichkeiten: In Fahrplänen sind die Fahrten nach der erwarteten Fahrgastnachfrage geplant. Da ein Ziel für ÖPNV-Unternehmen ein möglichst hoher Servicegrad ist, sind die Fahrten so geplant, dass Fahrgäste Buslinien ohne großen Zeitverlust wechseln können. Wenn Zeitfenster erlaubt sind, könnte es passieren, dass durch kosteneffiziente Lösungen Anschlussmöglichkeiten für Fahrgäste entfallen. Um dies zu verhindern, werden entsprechende Restriktionen in die mathematische Formulierung eingefügt.

Erhalten der Taktung: Oftmals gehören geplante Fahrten zu einer Linie, in welcher sie mit einer konstanten Taktung gefahren werden. Falls Zeitfenster berücksichtigt werden, sollten diese Linientaktungen erhalten bleiben. Dies kann dadurch berücksichtigt werden, dass im mathematischen Modell zusätzliche Nebenbedingungen eingefügt werden, die sicherstellen, dass die Fahrten einer bestimmten Linie mit gleicher Zeit verschoben werden.

Explizite diskrete Zeitfenster: Falls nur bestimmte benutzerdefinierte Fahrtverschiebemöglichkeiten gewünscht sind (z.B. -1 oder -3 Minuten, aber nicht -2), werden in einem Preprocessing-Schritt die nicht relevanten Zeitfenster-Kanten im Netzwerk gelöscht.

4.4. Ermittlung verschiebbarer Fahrten: Schnitt-Heuristik

Die Menge der verschiebbaren Fahrten kann auf unterschiedliche Weise vorgegeben werden. Möglich ist die Vorgabe eines *globalen Zeitfensters*, das für sämtliche Servicefahrten des Fahrplans gilt. Diese Art der Vorgabe hat mehrere Nachteile: die Problemgröße explodiert mit wachsender Länge des Zeitfensters und der Planer kann die Verschiebungen einzelner Fahrten nicht kontrollieren.

In der Praxis werden oft nur wenige Fahrten zum Verschieben freigegeben. Beispielsweise kann es erlaubt sein, nur spezielle Fahrten, wie Schulfahrten oder Erweiterungsfahrten zu Zeiten von Auslastungsspitzen zu verschieben. Nach unserer Erfahrung besteht häufig das Problem darin, dass der Planer zwar größtmögliche Einsparungen erreichen möchte, aber nicht weiß, welche Fahrten er dafür zum Verschieben freigeben kann. Dazu wurden Heuristiken entwickelt, die die Menge der

sogenannten *kritischen Fahrten* ermitteln. Ziel dabei ist es, möglichst wenige Fahrten zu Verschiebung freizugeben, die aber hohe Einsparungen ermöglichen und das Modell, im Vergleich zu globalen Zeitfenstern, schneller lösbar machen (vgl. [14], [15]).

Die *Schnitt-Heuristik* zur Bestimmung verschiebbarer Fahrten gewinnt die dafür notwendigen Informationen direkt aus dem gegebenen Fahrplan. Sie basiert auf der Beobachtung, dass Fahrpläne in der Regel deutliche Auslastungsspitzen aufweisen. Ziel ist es, solche Spitzen abzutragen und die Auslastung auf umliegende Gebiete zu verteilen. Wie groß die Menge der kritischen Fahrten sein soll, kann der Planer über Parameter kontrollieren.

4.5. Mathematische Formulierung für das MD-IVCSP-TW

Die mathematische Formulierung für das MD-IVCSP-TW basiert auf der Netzwerkstruktur aus den vorherigen Abschnitten. Sei $D = \{1, 2, \dots, m\}$ die Menge aller Depots und sei $T = \{1, 2, \dots, n\}$ die Menge aller zu bedienenden Servicefahrten. Die Menge der Servicefahrten, die von Fahrzeugen aus Depot $d \in D$ durchgeführt werden können, bezeichne T^d . Für jedes Depot d wird ein Umlaufplanungsnetzwerk $G^d = (N^d, A^d)$ definiert, das als Knotenmenge N^d und als Kantenmenge A^d enthält. Die Menge aller Kanten, die Aktivitäten darstellen, die sowohl ein Fahrzeug als auch einen Fahrer erfordern, sei durch $\tilde{A}^d \subset A^d$ definiert. \tilde{A}^d umfasst alle Kanten außer den Wartekanten auf der Zeitlinie eines Depots d . Sei $A^d(t) : T \rightarrow A^d$ eine Funktion, die für Servicefahrt $t \in T$ und Depot $d \in D$ die zugehörigen Servicefahrerkanten, sowie die dazugehörigen Zeitfensterkanten $(i, j) \in A^d$ liefert. Falls t nicht aus Depot d bedient werden kann, dann ist $A^d(t) = \{\}$.

Für jede Kante $(i, j) \in A^d$ werden Fahrzeugkosten c_{ij}^d definiert, die entweder einen fixen oder einen variablen Kostenanteil beschreiben. Wenn (i, j) eine Zirkulationsflusskante ist, erhält sie fixe Fahrzeugkosten, die bei einem Einsatz eines Fahrzeuges aus Depot d anfallen. Alle anderen Kanten erhalten die variablen Fahrzeugkosten, die sich aus Fahr- oder Wartezeit der der Kante entsprechenden Aktivität ableiten. Die maximale Flusskapazität u_{ij}^d auf einer Kante (i, j) wird für alle Service- und Zeitfensterkanten auf 1 gesetzt und entspricht für alle anderen Kanten der maximal pro Depot d verfügbaren Fahrzeuganzahl u^d . Es werden zwei verschiedene Arten von Entscheidungsvariablen definiert: Flussvariablen und Dienstvariablen. Ganzzahlige Flussvariablen y_{ij}^d für jede Kante $(i, j) \in A^d$ geben den Flusswert über Kante (i, j) an. Dabei entspricht jede Flusseinheit einem Fahrzeug, das die durch Kante (i, j) beschriebene Aktivität ausführt. Binäre Entscheidungsvariablen x_k mit $k \in K^d$ und zugehörigen Kosten f_k^d geben an, ob Dienst k für Depot $d \in D$ ausgewählt wird. Dabei sei K^d die Menge aller gültigen Dienste, die von Depot d aus durchgeführt werden können. Des Weiteren sei $K^d(i, j) \subset K^d$ die Menge aller Dienste, die das Dienstelement enthalten, das durch Kante $(i, j) \in \tilde{A}^d$ beschrieben ist.

Das integrierte Umlauf- und Dienstplanungsproblem mit mehreren Depots und Zeitfenstern (MD-IVCSP-TW) kann somit wie folgt formuliert werden:

$$\sum_{d \in D} \sum_{(i,j) \in A^d} y_{ij}^d c_{ij}^d + \sum_{d \in D} \sum_{k \in K^d} x_k^d f_k^d \rightarrow \min \quad (4.1)$$

$$s.t. \quad \sum_{d \in D} \sum_{(i,j) \in A^d(t)} y_{ij}^d = 1 \quad \forall t \in T \quad (4.2)$$

$$\sum_{\{j:(j,i) \in A^d\}} y_{ji}^d - \sum_{\{j:(i,j) \in A^d\}} y_{ij}^d = 0 \quad \forall d \in D, \forall i \in N^d \quad (4.3)$$

$$\sum_{k \in K^d(i,j)} x_k^d - y_{ij}^d = 0 \quad \forall d \in D, \forall (i,j) \in \tilde{A}^d \quad (4.4)$$

$$0 \leq y_{ij}^d \leq u_{ij}^d, y_{ij}^d \in N \quad \forall d \in D, \forall (i,j) \in A^d \quad (4.5)$$

$$x_k^d \in \{0,1\} \quad \forall d \in D, \forall k \in K^d \quad (4.6)$$

Mit der Zielfunktion (4.1) werden die gesamten Fahrzeug- und Dienstkosten minimiert. Die Nebenbedingungen (4.2)-(4.3) entsprechen der Mehrgüter-Fluss-Formulierung für das Umlaufplanungsproblem und stellen einen gültigen Umlaufplan sicher. Dabei garantieren die Nebenbedingungen (4.2), dass jede Fahrgastfahrt von genau einem Fahrzeug aus einem Depot bedient wird. Hier wird sichergestellt, dass die Summe aller Flüsse der zu einer Servicefahrt gehörigen Zeitfenster- und Servicefahrkantente genau gleich eins ist, so dass in der Flusslösung zwischen Servicefahrt- und Zeitfensterkanten alternativ gewählt werden kann. Die Restriktionen (4.3) stellen Flussserhaltung an jedem Knoten sicher. Für die korrekte Kopplung von Umlauf- und Dienstplan sorgen Nebenbedingungen (4.4): Für jede Kante, die vom Fahrzeugfluss abgedeckt wird, muss das zugehörige Dienstelement in ebenso vielen Diensten enthalten sein. Dabei müssen die Dienste dem Depot zugeordnet sein, aus dem auch das jeweilige Fahrzeug stammt. Durch Restriktionen (4.5) wird das maximale Flussvolumen auf den Kanten eingehalten.

Jede zulässige Lösung für das MD-IVCSP-TW besteht aus einer Flusslösung und einer zugehörigen Menge ausgewählter Dienste. Dabei ist zu beachten, dass eine Lösung der Mehrgüter-Fluss-Formulierung (4.2)-(4.3) mehrere gültige bestmögliche Umlaufpläne beinhaltet. Um aus einer Flusslösung Umläufe abzuleiten, wird die Flusslösung in Pfade zerlegt. Jeder Pfad entspricht dabei einem Umlauf. Ein eindeutiger Umlaufplan, der zum gefundenen Dienstplan kompatibel ist, kann durch eine entsprechende Dekomposition des Netzwerkflusses abgeleitet werden (vgl. [9]).

Zum Lösen des Modells wird Column Generation in Kombination mit Lagrange-Relaxation eingesetzt. Das Lagrange-Dual-Problem wird mit einem Subgradientenverfahren gelöst. Das Column Generation Pricing-Problem entspricht einem ressourcenbeschränkten Kürzeste-Wege-Problem und wird mit einem Algorithmus auf Basis der Dynamischen Programmierung gelöst. Für Details sei auf [20] verwiesen. Die Spalten, die in der Column Generation Phase generiert wurden, bilden den Input für die zweite Phase, in welcher eine zulässige ganzzahlige Lösung berechnet wird.

5. Integration in Planungssysteme

Für die Implementierung wurden die bestehenden Komponenten erweitert, die in früheren Arbeiten in der Forschungsgruppe entwickelt und teilweise in die kommerziellen Systeme Interplan bzw. Mobile-Plan integriert sind. Im Einzelnen sind dies Komponenten zum Lösen von Umlaufplanungsproblemen ohne/mit Zeitfenstern (MDVSP/MDVSP-TW), von Dienstplanungsproblemen (CSP), sowie von integrierten Umlauf- und Dienstplanungsproblemen (IVCSP).

Die Interaktion des Planers mit Interplan bzw. Mobile-Plan und den Optimierungskomponenten erfolgt über eine grafische Benutzeroberfläche. So kann der Planer z.B. die in Abschnitt 4.3 beschriebenen praktischen Anforderungen über Parameter an die Optimierungskomponente übergeben, indem er u.a. die Größe der Zeitfenster (und somit die verschiebbaren Fahrten) und Strafkosten für Fahrtenverschiebungen festlegt.

Da in der Dienstplanung eine enorme Vielzahl von betriebsspezifischen Regeln existiert, können nicht alle Regeln effizient in den Optimierungskomponenten abgedeckt werden. Daher werden während des Lösungsprozesses die mit den Optimierungskomponenten erstellten Dienste an einen Black-Box-Verifizierer in Interplan bzw. Mobile-Plan übergeben. Dieser greift auf vom Planer im System abgelegte Regelungen zurück, um zu überprüfen, ob ein Dienst zulässig und erwünscht ist. Die von der jeweiligen Optimierungskomponente errechneten Lösungen werden an Interplan bzw. Mobile-Plan übergeben und dort grafisch dargestellt, so dass dem Planer Vorschläge für Umlauf- und Dienstplan sowie ggf. notwendige Fahrtenverschiebungen aufgezeigt werden.

6. Testergebnisse

Die Lösungsansätze werden auf zwei Gruppen künstlich erstellter Probleminstanzen getestet, die aus jeweils zehn einzelnen Instanzen bestehen und wie in [12] beschrieben erstellt wurden, sowie auf einer Instanz aus der Praxis (von <http://www.dsor.de/bustestset>). Der Instanzname enthält Informationen über die Problemkomplexität: Es sind die Anzahl geplanter Servicefahrten, die Anzahl Depots und die Anzahl verschiedener Fahrzeugtypen (in dieser Reihenfolge) angegeben.

In Tabelle 1 werden die erzielten durchschnittlichen Ergebnisse für zwei Gruppen der künstlich erzeugten Probleme, und die Ergebnisse für eine Instanz aus der Realität zusammengefasst. In der ersten Spalte ist das jeweils genutzte Lösungsverfahren angegeben. Dabei bezeichnet *VSP+CSP* die traditionell in der Praxis genutzte sequentielle Vorgehensweise, *VSP-TW+CSP* das Lösen des (Mehrdepot)-Umlaufplanungsproblems mit Zeitfenstern mit anschließender Dienstplanung, *IVCSP* den integrierten Lösungsansatz, *IVCSP-TW* den integrierten Ansatz mit Zeitfenstern und *IVCSP-TWcut* den Einsatz der Schnitt-Heuristik. Weiterhin angegeben sind: die Größe des benutzten Zeitfensters (TW), die Anzahl der Fahrzeuge (#F) und Dienste (#D) in der errechneten Lösung bzw. deren Summe (#F+D), das Einsparpotential bezogen auf die Fahrzeug- und Dienstanzahl der sequentiellen Planung (P_{seq}) bzw. auf die der integrierten Planung ohne Zeitfenster (P_{int}), die gesamte benötigte Rechenzeit (Cpu_ges) in hh:mm:ss, die notwendigen Fahrtenverschiebungen (vFahrten), sowie die insgesamt verschobene Zeit (vZeit) in Minuten.

Die Rechenzeit für die einzelnen Tests wurde auf jeweils 24 Stunden beschränkt. Alle Tests wurden auf einem PC mit Intel Pentium IV Prozessor mit 3.4 Ghz und 2 GB Hauptspeicher unter Windows XP durchgeführt. Die Lösungsverfahren sind in C# implementiert. Für die Berechnung von ganzzahligen Lösungen wurde ILOG CPLEX 10.0 eingesetzt.

Aus Tabelle 1 wird deutlich, dass eine Berücksichtigung von Zeitfenstern bereits bei geringer Verschiebung der Fahrten zu Einsparung von Fahrzeugen und Diensten führt. Die integrierte Planung mit Zeitfenstern weist im Vergleich zur traditionellen sequentiellen Planung ein Einsparpotential von bis zu 20-30% auf, bei einer maximalen Verschiebung einzelner Fahrten um 4 Minuten. Verglichen mit der integrierten Planung ohne Zeitfenster, liegt das Optimierungspotential bei bis zu 5-10%. Die sequentielle Planung mit Zeitfenstern besitzt weniger Freiheitsgrade, liefert aber ebenfalls gute Ergebnisse im Vergleich zur Ausgangslösung, bei einem Bruchteil der Lösungszeit, die für die integrierte Planung verbraucht wird.

Mit steigender Anzahl betrachteter Fahrten und Verschiebeintervallen werden die benötigten Lösungszeiten für die integrierte Planung extrem lang. Wie in Tabelle 1 unten zu erkennen ist, kann durch Anwenden der Schnitt-Heuristik die Lösungszeit, bei annähernd gleicher Lösungsqualität, deutlich verringert werden.

7. Zusammenfassung

Der Beitrag beschreibt aktuelle Entwicklungen für die Optimierung der Ressourceneinsatzplanung im ÖPNV. Es wurde ein Optimierungsmodell vorgestellt, das Zeitfenster und somit das geringfügige Verschieben bereits geplanter Fahrten mit dem integrierten Mehrdepot-Umlauf- und Dienstpla-

nungsproblem kombiniert. Das vorgestellte Modell bietet enormes Einsparpotential bei der Ressourceneinsatzplanung und lässt sich leicht für Spezialfälle aus der Praxis erweitern. Planern der Verkehrsbetriebe können also zur Unterstützung Einsatzpläne vorgeschlagen werden, die in höchstem Maße kosteneffizient sind, ohne praktische Anforderungen zu ignorieren. Die durchgeführten Tests zeigen, dass die entstehenden Optimierungsprobleme extrem groß werden und dadurch schwer zu lösen sind. Ein geeigneter Ansatz zur Lösung sind Techniken und Verfahren wie die vorgestellte Schnitt-Heuristik, die die zu betrachtende Netzwerkgröße verringern und die Probleme bei guter Lösungsqualität schneller lösbar machen. Um große Praxisprobleme in akzeptabler Zeit lösen zu können, sind weitere Untersuchungen zu möglichen Netzwerkreduktionstechniken nötig.

Tabelle 1: Vergleich der Ansätze für künstliche Instanzen und eine reale Instanz

		tw	#F	#D	#F+D	P_seq	P_int	Cpu_ges	vFahrten	vZeit
Instanzengruppe 080_4_1	VSP+CSP		9,2	25,2	34,4	x		00:00:01		
	VSP-TW+CSP	±1	9,1	24,3	33,4	-2,9%		00:00:02	1,1	1,1
	VSP-TW+CSP	±2	8,8	24,2	33,0	-4,1%		00:00:04	3,4	5,5
	VSP-TW+CSP	±3	8,6	23,6	32,2	-6,4%		00:00:09	5,1	10,7
	VSP-TW+CSP	±4	8,3	23,4	31,7	-7,8%		00:00:20	7,8	25,5
	IVCSP		9,2	19,7	28,9	-16,0%	x	00:05:09		
	IVCSP-TW	±1	9,1	19,5	28,6	-16,9%	-1,0%	00:08:01	1,6	1,6
	IVCSP-TW	±2	8,8	19,1	27,9	-18,9%	-3,5%	00:26:10	5,6	9,0
	IVCSP-TW	±3	8,6	18,7	27,3	-20,6%	-5,5%	01:10:47	9,9	24,0
	IVCSP-TW	±4	8,3	18,5	26,8	-22,1%	-7,3%	02:21:29	13,5	42,0
Instanzengruppe 100_4_1	VSP+CSP		11,0	29,2	40,2	x		00:00:01		
	VSP-TW+CSP	±1	10,8	29,2	40,0	-0,5%		00:00:03	2,5	2,5
	VSP-TW+CSP	±2	10,5	28,1	38,6	-4,0%		00:00:08	6,0	9,8
	VSP-TW+CSP	±3	10,5	27,7	38,2	-5,0%		00:00:18	7,2	15,2
	VSP-TW+CSP	±4	10,2	27,0	37,2	-7,5%		00:00:39	8,7	24,4
	IVCSP		11,0	23,7	34,7	-13,7%	x	00:05:33		
	IVCSP-TW	±1	10,8	23,4	34,2	-14,9%	-1,4%	00:16:49	3,4	3,4
	IVCSP-TW	±2	10,5	22,9	33,4	-16,9%	-3,7%	00:39:46	7,5	12,8
	IVCSP-TW	±3	10,5	22,5	33,0	-17,9%	-4,9%	01:49:12	12,5	29,2
	IVCSP-TW	±4	10,2	22,5	32,7	-18,7%	-5,8%	05:10:56	16,1	51,0
Praxis-Instanz 426_1_1	VSP+CSP		32	73	105	x		00:01:27		
	VSP-TW+CSP	±1	32	73	105	0,0%		00:01:29	0	0
	VSP-TW+CSP	±2	31	68	99	-5,7%		00:01:22	5	8
	VSP-TW+CSP	±3	30	68	98	-6,7%		00:01:33	12	27
	VSP-TW+CSP	±4	29	66	95	-9,5%		00:01:47	19	55
	IVCSP		32	52	84	-20,0%	x	01:34:05		
	IVCSP-TW	±1	32	47	79	-24,8%	-6,0%	03:37:17	45	45
	IVCSP-TW	±2	31	46	77	-26,7%	-8,3%	10:25:58	42	58
	IVCSP-TW	±3	30	44	74	-29,5%	-11,9%	22:44:23	57	94
	IVCSP-TW	±4	-	-	-	-	-	> 24h	-	-
	IVCSP-TWcut	±1	32	48	80	-23,8%	-4,8%	02:14:55	17	17
	IVCSP-TWcut	±2	31	46	77	-26,7%	-8,3%	03:49:55	54	67
	IVCSP-TWcut	±3	30	45	75	-28,6%	-10,7%	07:09:20	71	122
	IVCSP-TWcut	±4	29	44	73	-30,5%	-13,1%	13:34:03	53	118

8. Literaturverzeichnis

- [1] BERTOSSI A. A., CARRARESI P., GALLO G., On some matching problems arising in vehicle scheduling models. *Networks*, 17:271-281, 1987.
- [2] BORNDORFER R., LOEBEL A., WEIDER S., A bundle method for integrated multi-depot vehicle and duty scheduling in public transit. Technical Report ZR-04-14, ZIB – Zuse Institute Berlin, Berlin, Germany, 2004.
- [3] BUNTE S., KLIEWER N., An overview on vehicle scheduling models. Technical Report. Presented at 10th International Conference on Computer-Aided Scheduling of Public Transport (CASPT2006), Leeds, UK, 2006.
- [4] DADUNA J., VOELKER M., Umlaufbildung im ÖPNV mit unscharfen Abfahrtszeiten. *Der Nahverkehr*, 1997.
- [5] DESAULNIERS G., LAVIGNE J., SOUMIS F., Multi-depot vehicle scheduling problems with time windows and waiting costs. *European Journal of Operational Research*, 111:479-494, 1998.
- [6] FISCHETTI M., LODI A., MARTELLO S., TOTH P., The fixed job schedule problem with working-time constraints. *Operations Research*, 37(3):395-403, 1989.
- [7] FISCHETTI M., LODI A., TOTH P., A branch-and-cut algorithm for the multiple depot vehicle scheduling problem. Technical report, DEIS – Università di Bologna, 1999.
- [8] FRELING R., Models and Techniques for Integrating Vehicle and Crew Scheduling. PhD thesis, Erasmus University of Rotterdam, 1997.
- [9] GINTNER V., Modelle und Lösungsverfahren für die integrierte Ressourceneinsatzplanung im öffentlichen Personennahverkehr. PhD thesis, University of Paderborn, 2008.
- [10] GINTNER V., STEINZEN I., SUHL L., A time-space network based approach for integrated vehicle and crew scheduling in public transport, in: *Proceedings of the EWGT2006 Joint Conferences*, pages 371-377, Bari, Italy, 2006.
- [11] HADJAR A., SOUMIS F., Window reduction for the multiple depot vehicle scheduling problem with time windows. Technical Report G-2005-54, HEC Montreal, Canada, 2005.
- [12] HUISMAN D., Integrated and Dynamic Vehicle and Crew Scheduling. PhD thesis, Tinbergen Institute, Erasmus University Rotterdam, 2004.
- [13] KERI A., HAASE K., Simultaneous Vehicle and Crew Scheduling with Trip Shifting, in: J. Kalcsics, S. Nickel, editors, *Operations Research Proceedings 2007*, pages 467-472, Springer, Berlin/Heidelberg, 2008.
- [14] KLIEWER N., Optimierung des Fahrzeugeinsatzes im öffentlichen Personennahverkehr. PhD thesis, PB, 2005.
- [15] KLIEWER N., BUNTE S., SUHL L., Time windows for scheduled trips in multiple depot vehicle scheduling, in: *Proceedings of the EWGT2006 Joint Conferences*, pages 340-346, Bari, Italy, 2006.
- [16] KLIEWER N., MELLOULI T., SUHL L., A new solution model for multi-depot multi-vehicle-type vehicle scheduling in (sub)urban public transport, in: *Proceedings of the 13th Mini-EURO Conference*. Politechnic of Bari, 2002.
- [17] KLIEWER N., MELLOULI T., SUHL L., A time-space network based exact optimization model for multi-depot bus scheduling. *European Journal of Operational Research (EJOR)*, Volume 175, Issue 3, 2006.
- [18] LOEBEL A., Solving large-scale multiple-depot vehicle scheduling problems, in: *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems (LNEMS)*, Computer-Aided Transit Scheduling. Springer, Berlin, 1999.
- [19] RIBEIRO C., SOUMIS F., A column generation approach to the multiple-depot vehicle scheduling problem. *Operations research*, 42(1), 1994.
- [20] STEINZEN I., Topics in Integrated Vehicle and Crew Scheduling in Public Transit. PhD thesis, University of Paderborn, 2007.