Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin
Takustraße 7, D-14195 Berlin-Dahlem, Germany

Ralf Borndörfer, Martin Grötschel, Fridolin Klostermeier, Christian Küttner

Telebus Berlin - Mobilität für Behinderte

Kostenreduktion und Serviceverbesserung mit Hilfe von Mathematik

Preprint SC 96–40 (29. November 1996)

Telebus Berlin - Mobilität für Behinderte*

Kostenreduktion und Serviceverbesserung mit Hilfe von Mathematik

Ralf Borndörfer† Martin Grötschel† Christian Küttner†
Fridolin Klostermeier†

Zusammenfassung. Steigendes Mobilitätsbedürfnis der Behinderten bei angespannter Haushaltslage — diese Situation ergab vor drei Jahren beim Berliner Behindertenfahrdienst *Telebus* Handlungsbedarf. Gleichzeitig stieß die verwendete manuelle (Fahrzeug-)Tourenplanung mit damals etwa 1.000 Fahrtwünschen pro Tag an ihre Grenzen. Zur Lösung dieser Probleme war der effiziente Einsatz von Computern und von *mathematischen Optimierungsverfahren* erforderlich.

Ergebnis des daraufhin gestarteten *Telebus-Projektes* ist die Entwicklung eines neuen, alle Arbeitsabläufe unterstützenden Computersystems, das seit über einem Jahr im Einsatz ist. Herzstück dieses Systems ist ein auf mathematischen Methoden der ganzzahligen Optimierung basierendes Verfahren zur Tourenplanung. Ziel dieses Artikels ist die Beschreibung dieses Verfahrens und seiner Verwendung bei der Behindertenbeförderung. Das Beispiel Telebus zeigt, daß der Einsatz mathematischer Optimierungstechniken neue Möglichkeiten für Kosteneinsparungen bei gleichzeitiger Serviceverbesserung auch in anderen Bereichen des ÖPNV eröffnet.

Schlagworte. Telebus, Behindertenbeförderung, Tourenplanung, Mathematische Optimierungsverfahren, Ganzzahlige Programmierung, Set Partitioning, Rufbus- und Anrufsammeltaxi-Systeme

Mathematics Subject Classification (1991). 90B06, 90C10, 90B90

Viele Städte unternehmen große Anstrengungen, um den öffentlichen Nahverkehr behindertengerechter zu gestalten: Fahrstühle und Rampen werden gebaut, Niederflurbusse angeschafft. Trotzdem können viele behinderte und alte Menschen diese Angebote nicht wahrnehmen. Sie kommen ohne Hilfe nicht aus der Wohnung, die Haltestellen sind zu weit entfernt oder gerade ihre Fahrstrecke ist noch nicht behindertengerecht ausgebaut.

Abb. 1: Abholung eines Rollstuhlfahrers mit einem Telebus.

Diesen Menschen bietet das Land Berlin als freiwillige soziale Leistung den *Telebus* an. Jeder Kunde kann bis zu 50 Fahrten im Monat per Telefon oder Telefax bei der Telebus-Zentrale buchen. Die Telebus-Zentrale disponiert die Fahraufträge und fordert die Fahrzeuge von karitativen und privaten Fahrdiensten an. Sie verspricht den Kunden, daß zum gewünschten Zeitpunkt — mit einer Toleranz von 15 Minuten — ein Telebus oder Teletaxi vor der Tür steht. Das Fahrpersonal leistet auf Wunsch Treppenhilfe. Dieser Service kann täglich von morgens 5 Uhr bis nachts um 1 Uhr benutzt werden. Abb. 1 zeigt die Abholung eines Rollstuhlfahrers.

*Das Telebus-Projekt wird gefördert von der Berliner Senatsverwaltung für Wissenschaft, Forschung und Kultur.
†Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin (ZIB), Takustraße 7, 14195 Berlin, URL: http://www.zib.de/

Das Telebus-System gibt es seit über 15 Jahren in Berlin. Jahr für Jahr wächst die Zahl der Kunden und damit auch die der Fahrten. Die angespannte Haushaltslage in Berlin forderte vor drei Jahren eine Lösung, die dem Bedürfnis der Behinderten nach mehr Mobilität Rechnung tragen sollte, ohne zusätzliche Kosten zu verursachen. Gleichzeitig stieß die Disposition per Hand mit damals etwa 1.000 Fahraufträgen pro Tag an ihre Grenzen. Es war klar, daß die bestehenden Probleme — wenn überhaupt — nur durch den effizienten Einsatz von Computern und mathematischer Optimierungssoftware bewältigt werden können. Damit kam das Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin (ZIB) ins Spiel, welches sich insbesondere Aufgabenstellungen dieser Art widmet.

Das Telebus-Projekt am ZIB

Der Betreiber der Telebus-Zentrale ist der Berliner Zentralausschuß für soziale Aufgaben e.V. (BZA), ein Zusammenschluß Berliner Wohlfahrtsverbände. Im Rahmen eines Kooperationsvertrages wurde zwischen dem BZA, dem Berliner Senator für Soziales und dem ZIB das Telebus-Projekt ins Leben gerufen. Nach zwei Jahren Forschungsarbeit und einem Jahr Entwicklungs- und Beratungstätigkeit in der Telebus-Zentrale ist das Ziel des Projektes erreicht: Kostenreduktion und Serviceverbesserung.

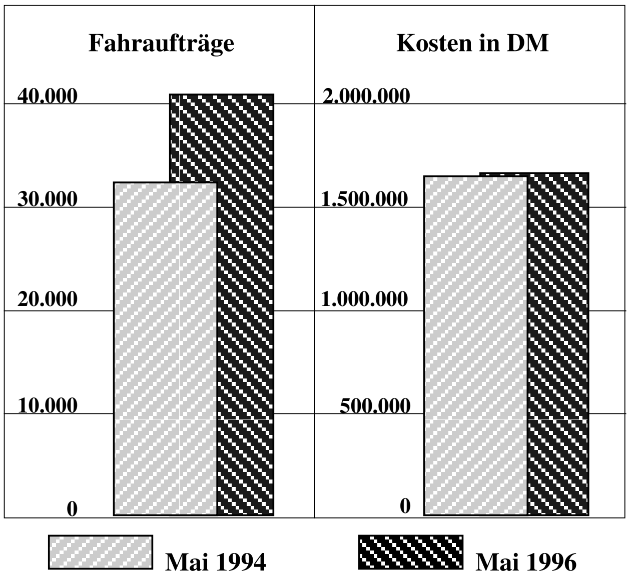


Abb. 2: Die Anzahl der Aufträge und der Kosten, jeweils aufgegliedert nach den drei Fahrzeugtypen im Mai 1994 und im Mai 1996 nach Einführung des neuen Systems.

Die Telebus-Zentrale arbeitet heute mit einem neuen Softwaresystem, dem *Telebus-Computersystem*. Es unterstützt die Aufnahme der Fahrtwünsche, die Anmietung der Fahrzeuge, die Disposition der Aufträge, die Funkleitung am Fahrtag sowie die Abrechnung der Fahrten und Busse — alles integriert in einem Programm. Das Telebus-Computersystem ist seit über einem Jahr rund um die Uhr erfolgreich im Einsatz.

Das vom ZIB entwickelte System hat nicht nur die Arbeitsabläufe in der Telebus-Zentrale vereinfacht. Zusammen mit Veränderungen bei der Fahrzeuganmietung konnte der Telebus-Service so umgestaltet werden, daß er kundenfreundlicher ist, ohne mehr Geld zu kosten. Mußte man früher zum Beispiel einen Telebus mindestens drei Tage vorher bestellen, so reicht heute ein Tag. Auch die Pünktlichkeit hat sich durch genauere Planung deutlich erhöht. Und ganz wichtig: trotz eingefrorenen Jahresetats können heute 30% mehr Fahraufträge bewältigt werden als noch vor drei Jahren.

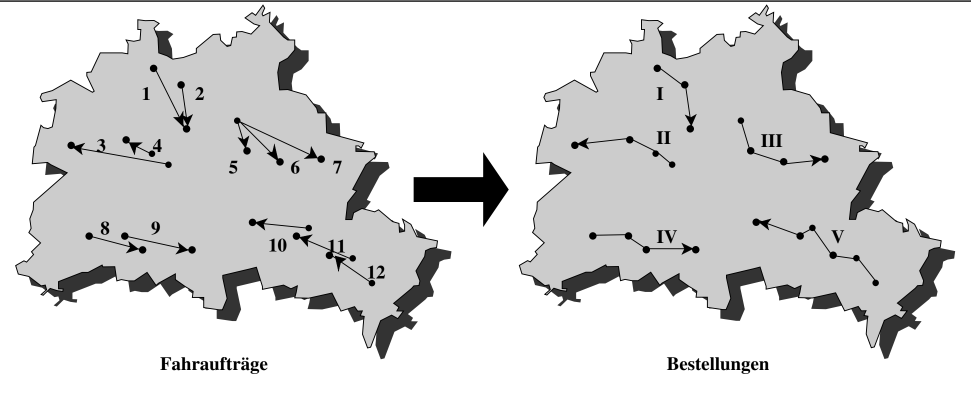
Der Tourenplaner

Das Herzstück des Telebus-Computersystems ist ein Programm zum rechnergestützten Disponieren: der *Tourenplaner*. Zur Zeit läuft beim Telebus noch eine Tourenplaner-Version, die mit speziell für den Telebus entwickelten Heuristiken gute Lösungen liefert. Bald wird eine Version zum Einsatz kommen, die (mathematisch beweisbar) optimale Lösungen findet. In dieses Programm wurde am ZIB die meiste Forschungsarbeit investiert. Die Testreihen zeigen, daß sich damit die Kosten noch einmal um 5 bis 10% reduzieren lassen.

Die Analyse des Telebus-Dispositionsproblems ergab, daß es sich lohnt, in zwei Stufen vorzugehen. Erst wird *verknüpft*, daran anschließend werden die *Touren geplant*. Im folgenden wollen wir vorstellen, wie dieser Tourenplaner arbeitet.

Die Verknüpfungsoptimierung

Wenn zwei oder mehr Fahrgäste denselben Weg haben, ist es immer günstig, diese mit nur einem einzigen Bus zu befördern. Offensichtlich gibt es eine Reihe sinnvoller Möglichkeiten, einzelne Fahrtwünsche zu kombinieren. In der Sprache der Disponenten heißt das: Fahraufträge werden zu *Bestellungen* verknüpft. Bestellungen sind also „vernünftige" Streckensegmente, aus denen sich eine Telebus-Tour zusammensetzt.



Vor der eigentlichen Tourenplanung werden Fahraufträge zu Bestellungen verknüpft.
Z.B. Zielsammelfahrt (I: 1, 2), Einbindung (II: 3, 4), Startsammelfahrt (III: 5, 6, 7),
Anbindung (IV: 8, 9), Mehrfachanbindung (V: 10, 11, 12).

Abb. 3: Ein Blick aus der Vogelperspektive auf Berlin mit 5 Verknüpfungsmöglichkeiten und ihren Namen.

Bestellungen können beim Telebus sieben verschiedene Formen annehmen: Gruppenfahrten, Start- bzw. Zielsammelfahrten, Einbindungen, Anbindungen, Mehrfachanbindungen oder Einbindungen gefolgt von Mehrfachanbindungen. Einige dieser Möglichkeiten sind in Abb. 3 dargestellt.

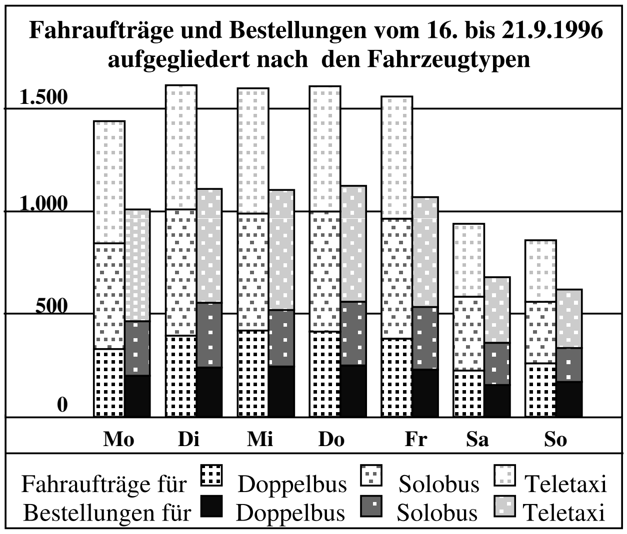


Abb. 4: Reduktion der Fahraufträge, aufgegliedert nach den drei Fahrzeugtypen

Eine Verknüpfung ist für den Tourenplaner nur dann zulässig, wenn die Kunden im Rahmen der vorgegebenen Toleranz pünktlich abgeholt werden und nicht übermäßig lange Umwege in Kauf nehmen müssen. Die erste Stufe der Tourenplanung besteht nun darin, alle derartigen Kombinationsmöglichkeiten zu berechnen, bei denen zwei oder mehr Fahraufträge gleichzeitig befördert werden. Je nachdem, wieviele Fahraufträge vorliegen und wie sie sich an dem jeweiligen Tag zeitlich und räumlich verteilen, ergeben sich zwischen 10.000 und 80.000 Verknüpfungsmöglichkeiten, d.h. Bestellungen. Jede Bestellung führt durch die gleichzeitige Beförderung von Fahrgästen zu einer Reduktion der zurückgelegten Fahrstrecke. Ziel der Verknüpfungsoptimierung ist es, eine solche Kombination von Bestellungen zu finden, daß jeder Fahrauftrag in genau einer Bestellung vorkommt und die Reduktion der Wegstrecke maximal ist. In der Sprache der Disponenten gesprochen: Beim Verknüpfen werden die Besetztkilometer minimiert.

Wie soll man aber unter all diesen Möglichkeiten eine optimale Kombination von Verknüpfungen von Fahraufträgen finden? Dies erledigt ein vom ZIB entwickeltes mathematisches Optimierungsprogramm. Für die Telebus-Disposition ist entscheidend, daß sich dadurch die Zahl der Fahraufträge um bis zu 40% reduzieren läßt. Erfahrene Telebus-Disponenten erreichen hier per Hand maximal 20% Reduktion.

Optimieren mit Hilfe von neuen mathematischen Methoden

Wer alle Möglichkeiten kennt, die rund 80.000 Bestellungen miteinander zu kombinieren, kann die optimale Lösung berechnen. Aber niemand hat die Zeit, alle Kombinationen durchzuspielen, selbst ein Computer nicht. Es gibt jedoch andere Wege, eine optimale Lösung zu bestimmen. Das am ZIB entwickelte Computerprogramm basiert auf einem sehr allgemeinen mathematischen Optimierungsmodell, das in der Fachsprache *Set Partitioning* genannt wird. Zur Lösung dieses Modells werden Methoden aus dem Bereich der „polyedrischen Kombinatorik" verwendet. Unter anderem werden dabei Schnittebenenverfahren und Algorithmen der Linearen Optimierung eingesetzt.

Angewandt auf die Verknüpfungsoptimierung kann man das Set Partitioning Problem wie folgt erklären. Wir führen eine Matrix A ein, die so viele Zeilen hat, wie es Fahrtwünsche gibt, und so viele Spalten wie Bestellungen. Das Element a_{ij} der Matrix, das in der i-ten Zeile und j-ten Spalte steht, hat den Wert 1, wenn der i-te Fahrtwunsch in der j-ten Bestellung vorkommt, sonst ist es 0. Hat a_{ij} den Wert 1 so sagen wir, daß die j-te Spalte die i-te Zeile überdeckt. Jede Spalte erhält einen „Preis". In unserem Falle ist der Preis der Spalte j gleich den Fahrkilometern der Bestellung j. Die Aufgabe ist nun, eine Kombination von Spalten der Matrix zu finden, so daß jede Zeile genau einmal überdeckt ist und die Summe der Preise so gering wie möglich. Das so entstehende mathematische Problem ist im Falle der Verknüpfungsoptimierung ein ganzzahliges Programm mit rund 80.000 Variablen. Mit den am ZIB entwickelten Methoden kann eine optimale Kombination von Bestellungen in wenigen Minuten berechnet werden.

Set Partitioning Modelle und die zugehörigen Optimierungsverfahren können nicht nur bei der Verknüpfungsoptimierung verwendet werden, sie kommen insbesondere auch bei der eigentlichen Tourenplanung zum Einsatz. Andere Anwendungen von Set Partitioning Ansätzen finden sich bei verschiedenen Fahrzeugeinsatzplanungsproblemen (siehe etwa Desrosiers, Dumas, Solomon und Soumis [1995] und Tesch [1994]), in der Crew-Einsatzplanung von Fluggesellschaften (siehe Hoffman und Padberg [1993]) und allgemeiner in verschiedensten Personaleinsatzplanungsproblemen.

Die Tourenplanoptimierung

Aufgrund negativer Erfahrungen mit verschiedenster Dispositionssoftware waren die Telebus-Mitarbeiter skeptisch. Sie glaubten, daß ein Computer die komplizierte Aufgabe der Tourenplanung im Behindertenbereich mit ihren vielen Sonderfällen und Extrawünschen der Kunden nicht angemessen durchführen kann. Aber es zeigte sich, daß es geht.

In einer Vorstudie wurde ein Programm entworfen, das einen Tourenplan mit seinen etwa 100 Touren nach den gleichen Regeln und Verfahren berechnet, wie er zuvor per Hand disponiert wurde. Dieses Programm wurde erheblich weiterentwickelt zu einem *Tourengenerator*, der Tourenpläne nach verschiedenen Gesichtspunkten erzeugen kann. Diese Tourenpläne sind bereits (wie oben erwähnt) wesentlich besser als die Ergebnisse der manuellen Planung. Beim derzeit noch im Einsatz befindlichen System wählt der Disponent einen ihm angemessen erscheinenden Vorschlag aus und nimmt unter Umständen noch Änderungen vor.

In Kürze sollen die für die Tourenplanung entwickelten Set Partitioning Methoden ebenfalls zum praktischen Einsatz kommen. Dabei tritt wieder der Tourengenerator in Aktion. Er prüft — gesteuert durch Parameter, die der Disponent festlegen kann — wie sich die Bestellungen eines Tages zu guten Touren aneinanderreihen lassen und erzeugt auf diese Weise sowohl vollständige Tourenpläne als auch viele Einzeltouren. So entstehen hunderttausende von Touren. Analog zur Verknüpfungsoptimierung ist die Aufgabe der Tourenplanung, aus diesen Touren eine Kombination auszuwählen, so daß jede Bestellung in genau einer Tour vorkommt und die Summe der Kosten der Touren möglichst gering ist. Werden beim Verknüpfen die Besetztkilometer optimiert, so heißt die Formel beim Tourenplanen: Optimiere die Leerzeiten. Das sind die Zeiten im Plan, in denen die Fahrzeuge leer herumfahren oder -stehen. Die Güte eines Tourenplanes hängt neben den Besetztkilometern im wesentlichen von den Leerfahr- und Standzeiten ab.

Die bei der Tourenplanung entstehenden Set Partitioning Probleme sind sehr schwierig und können auf den beim Telebus zur Verfügung stehenden Computern und innerhalb der zur Verfügung stehenden Zeit nur selten optimal gelöst werden. Allerdings kann das mathematische Optimierungsverfahren eine *Gütegarantie* abgeben, d.h. es kann beweisen, daß die Kosten des gelieferten Tourenplanes höchstens um einen gewissen (in der Regel kleinen) Prozentsatz vom Kostenminimum abweichen. Mit dem Einsatz dieses Optimierungspaketes steht dem Telebus ein Verfahren zur Verfügung, daß im Rahmen der Datengenauigkeit nahezu optimale Lösungen liefert. Eine Steigerung der Lösungsgenauigkeit ist aus praktischer Sicht kaum relevant, da viele Daten ohnehin nicht genau erhoben werden können, insbesondere, wenn man die täglich wechselnden und unvorhersehbaren Schwankungen im Verkehrsaufkommen in Betracht zieht.

Perspektiven für den öffentlichen Nahverkehr

Diese und ähnliche mathematische Optimierungstechniken können auch auf andere Bereiche des ÖPNV angewendet werden. Serviceverbesserungen bei gleichzeitiger Kostensenkung sind keine Utopie. Dazu ist allerdings eine enge und vertrauensvolle Zusammenarbeit zwischen Mathematikern, Informatikern, Kaufleuten und Nahverkehrsexperten erforderlich. Ohne eine koordinierte Bündelung des Knowhows gibt es keine Synergieeffekte.

Eine mögliche weitere Anwendung des für Telebus entwickelten Optimierungssystems sehen wir im Bereich von Rufbussen und Sammeltaxis. Einige Nahverkehrsbetriebe verändern derzeit ihre Angebotsstruktur. Statt eines Linienbussystems setzen sie zu gewissen Zeiten oder in bestimmten Gebieten Rufbus- und Sammeltaxisysteme ein. Sie sparen damit Kosten und verbessern ihr Angebot. Mit den über 20.000 Kunden und wochentags etwa 1.500 Fahraufträgen, die per Telefon oder Telefax eingehen und mit Spezialbussen und Taxen bedient werden, sind beim Telebus in Berlin Größenordnungen erreicht, die vergleichbar sind mit den Anforderungen im ÖPNV mittlerer Städte. Das Telebus-Computersystem kann als ein Prototyp zur Steuerung von Rufbus- und Sammeltaxisystemen angesehen werden. Könnte nicht in ländlichen Gebieten und kleinen Kommunen eine professionell geführte Rufbuszentrale das öffentliche Nahverkehrssystem ersetzen? Wäre damit nicht der Behindertentransport vollständig in den ÖPNV integriert?

Ein weiteres Beispiel für mögliche Kostenreduktionen ohne Serviceeinschränkung ist die Umlaufoptimierung. In Zusammenarbeit mit der HanseCom, einer Tochter der Hamburger Hochbahn AG, der Gesellschaft für Informatik, Verkehrs- und Umweltplanung (IVU) und den Berliner Verkehrsbetrieben (BVG) hat das ZIB neue mathematische Methoden zur Optimierung der Busumlaufplanung entwickelt Löbel [1997]. Der Einsatz dieser Verfahren steht unmittelbar bevor Grötschel, Löbel und Völker [1996].

Diese beiden Beispiele zeigen, daß es sich lohnt, auch in anderen Bereichen des öffentlichen Nahverkehrs konzeptionell und aus Sicht der Optimierung neu nachzudenken.

Literatur

Ball, M. O., Magnanti, T. L., Monma, C. L. und Nemhauser, G. L., Editoren (1995). *Network Routing*, Band 8 des *Handbooks in Operations Research and Management Science*. Elsevier Science B.V., Amsterdam.

Desrosiers, J., Dumas, Y., Solomon, M. M. und Soumis, F. (1995). *Time Constrained Routing and Scheduling*. In Ball, Magnanti, Monma und Nemhauser [1995], Kapitel 2, Seiten 35–139.

Grötschel, M., Löbel, A. und Völker, M. (1996). Optimierung des Fahrzeugumlaufs im öffentlichen Nahverkehr. Preprint SC 96-7, Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin. Erhältlich von URL: http://www.zib.de/ZIBbib/Publications/.

Hoffman, K. L. und Padberg, M. W. (1993). Solving airline crew-scheduling problems by branch-and-cut. *Management Science*, 39:657–682.

Löbel, A. (1997). *Optimal Vehicle Scheduling in Public Transit*. Dissertation, Technische Universität Berlin. In Vorbereitung.

Tesch, D. (1994). *Disposition von Anruf-Sammeltaxis*. Deutscher Universitäts Verlag, Wiesbaden.