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

Ralf Borndörfer Martin Grötschel
Fridolin Klostermeier Christian Küttner

Optimierung des Berliner Behindertenfahrdienstes

Preprint SC 97–10 (28. Februar 1997)

Optimierung des Berliner Behindertenfahrdienstes*

Ralf Borndörfer** Martin Grötschel** Fridolin Klostermeier¶ Christian Küttner¶

28. Februar 1997

Zusammenfassung. In diesem Artikel geben wir einen Überblick über das Telebus-Projekt am Konrad-Zuse-Zentrum, Berlin, durch das der Behindertenfahrdienst in Berlin reorganisiert und optimiert wurde. Wir berichten kurz über die mathematischen Probleme und über die nicht-mathematischen Schwierigkeiten, die bei der Durchführung dieses Projektes auftraten.

Schlagworte. Behindertenbeförderung, Tourenplanung, Öffentlicher Personennahverkehr, Optimierungsverfahren, Ganzzahlige Programmierung, Set Partitioning

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

Einführung

„Was forschen Sie denn so?“ Damit begann das Interview des Bild-Reporters. Er wollte einen kurzen Artikel anläßlich der Berufung von M. Grötschel nach Berlin schreiben. Aber der Versuch einer verständlichen Darstellung von Optimierung und Diskreter Mathematik erbrachte nicht viel. Erst bei der Erläuterung des Travelling-Salesman-Problems zündete es. *„Dann sollten Sie mal den Behinderten helfen! Ich komme gerade von einer Demo. Die* (gemeint war der Berliner Senat) *wollen den Telebus abschaffen.“*

Als der Reporter ging, saßen zwei Studenten (F. Klostermeier und Ch. Küttner) vor der Bürotür. Sie hatten beim FU-Kollegen M. Aigner Graphentheorie gehört und wollten jetzt das Erlernte praktisch anwenden. *„Haben Sie schon mal vom Telebus gehört?“* Sie kannten den Berliner Behindertenfahrdienst und waren durch Zivildiensttätigkeiten mit den Schwierigkeiten einer solchen Einrichtung vertraut. *„Wenn wir mit dem Betreiber ins Gespräch kommen und Daten erhalten, könnte das zwei schöne Diplomarbeiten ergeben.“* Zu den zwei Diplomarbeiten (Klostermeier und Küttner [1993]) kamen dann noch eine Dissertation (Borndörfer [1997]), eine Firmengründung (die Intranetz Gesellschaft für Informationslogistik mbH, mit den Gesellschaftern Klostermeier und Küttner) und, die Hauptsache, eine erfolgreiche Reorganisation des Behindertentransportdienstes in Berlin mit beträchtlichen Kosteneinsparungen bei gleichzeitiger Serviceverbesserung.

Ging das alles allein mit Mathematik? Natürlich nicht! Viele Faktoren spielten eine Rolle. Am Anfang stand *Operations Research*: eine sorgfältige Analyse des Telebus-Transportsystems. Daraus entstanden ein mathematisches Modell der Fahrtwunschdisposition, ein Plan für die innerbetrieblichen Organisationsabläufe, die Einführung von Controlling-Systemen und ein Konzept für den effizienten Einsatz von EDV zur Verknüpfung aller Betriebsabläufe. Dazu gehörte auch die Anschaffung geeigneter Hardware, der Einsatz einer neuen Datenbank und das Programmieren benutzerfreundlicher Oberflächen. Ohne erheblichen *persönlichen Einsatz „vor Ort“* hätte sich nichts bewegt: Von der Reorganisation betroffene Mitarbeiter mußten überzeugt, Busunternehmer beruhigt, Ängste der Art *„Das ZIB ruiniert den Telebus“* überwunden werden. F. Klostermeier und Ch. Küttner sind sogar zwei Wochen auf Bussen mitgefahren, um die Praxis des Behindertentransports in Berlin aus nächster Nähe kennenzulernen. Entscheidend war die *Berliner Senatsverwaltung für Soziales.* Senatorin Stahmer und ihre zuständigen Mitarbeiter haben unseren seinerzeitigen Vorschlag (siehe Borndörfer, Grötschel, Klostermeier und Küttner [1993]) nachdrücklich unterstützt und die Mittel für den Aufwand des ZIB (Kosten für 6 1/2 Mitarbeiterjahre) und die Reorganisationskosten des Telebus-Betreibers bereitgestellt. Durch die erziel-

*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, Email: [borndoerfer,groetschel]@zib.de, URL: http://www.zib.de/

¶Intranetz Gesellschaft für Informationslogistik mbH, Klopstockstraße 9, 14163 Berlin, Email: info@intranetz.de, URL: http://www.intranetz.de

ten Einsparungen haben sich diese Investitionen in wenigen Monaten amortisiert.

Der Telebus-Fahrdienst

Das Land Berlin bietet seinen behinderten Bürgern einen Fahrdienst an, den *Telebus*. Er wird finanziert durch die Senatsverwaltung für Soziales und betrieben vom *Berliner Zentralausschuß für Soziale Aufgaben e.V.* (BZA), einem Zusammenschluß Berliner Wohlfahrtsverbände. Jeder Berechtigte (das sind zur Zeit rund 25.000 Personen) kann bis zu 50 Fahrten pro Monat bei der Telebus-Zentrale buchen. Dort werden die Fahraufträge gesammelt und disponiert (das sind während der Woche rund 1.500, am Wochenende etwa 1.000 pro Tag). Die Telebus-Zentrale mietet von karitativen und privaten Fahrdiensten Spezialfahrzeuge (Telebusse und Teletaxis) an. Die Fahraufträge werden jeweils am Vorabend per Fax übermittelt.

Abholung eines Rollstuhlfahrers mit einem Telebus.

Abbildung 1

Das Telebus-System steht unter großem Druck: Die Behinderten möchten einen möglichst guten und umfangreichen Service; die Bus- und Taxiunternehmen machen sich Konkurrenz, zielen aber gleichzeitig gemeinsam auf sichere und angemessene Einnahmen; der Senat will so wenig wie möglich ausgeben. Kompromisse sind schwierig, Versuche von direkten und indirekten Einflußnahmen nicht unbekannt.

EDV

Der Telebus-Fahrdienst benötigt zur Disposition der Fahrzeuge umfangreiche Daten, die bei der Disposition berücksichtigt werden müssen. Standardmäßig wird u.a. abgefragt: Datum, Startzeit, Startort, Zielort, Rollstuhltyp, benötigtes Fahrzeug, Fahrtzweck, ob Treppen- oder Tragehilfe benötigt wird. Zur Steigerung der Servicequalität versuchen die Disponenten sogar, auf „weiche Daten" wie Allergien gegen Tiere oder Abneigungen zwischen Kunden Rücksicht zu nehmen.

Man könnte nun denken, daß die Telebus-Zentrale schon immer mit einem leistungsfähigen Computer- und Softwaresystem zur Erledigung ihrer komplexen Aufgabenstellung ausgestattet war. Weit gefehlt! EDV wurde in der Telebus-Zentrale im Grunde nur zum Abspeichern und Ausdrucken von Daten benutzt. Geplant wurde bis Juni 1995 „manuell": Ein fahrbarer Plan konnte in etwa 16 Personenstunden erstellt werden. Als aber vor drei Jahren die Anzahl der Fahrtwünsche auf mehr als 1.000 pro Tag anstieg, stießen die Disponenten an die Grenzen ihres „Überblicks". (Der Grund für die starke Zunahme der Buchungen war die bessere Versorgung Ost-Berlins mit Telefonen. Erst dadurch konnten Ost-Berliner Behinderte das Telebus-System in Anspruch nehmen.)

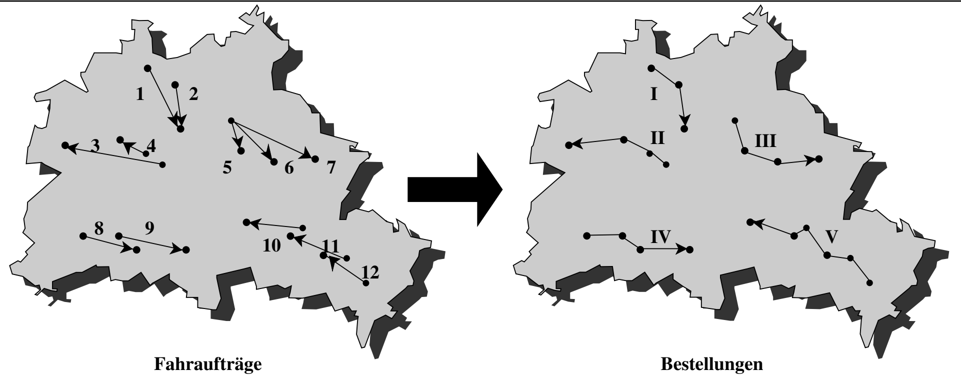
Inzwischen wurde ein Netzwerk von 20 Macintosh-Computern mit einem von uns entwickelten Software-System installiert. Dieses wurde aus der Analyse der Arbeitsläufe heraus konzipiert und integriert die Auftragsannahme, die Disposition, die Funkleitung der Fahrzeuge, die Abrechnung der Fahrzeuge und Fahrten und die Statistik. Es ist ohne aufwendige Schulung benutzbar. Für weitere Details zur Verbesserung der Organisation verweisen wir auf Borndörfer, Grötschel, Klostermeier und Küttner [1996].

Das Dispositionsproblem

Die schwierigste Aufgabe beim Telebus besteht darin, täglich folgendes Problem zu lösen:

Gegeben sind etwa 1.500 Fahrtwünsche und rund 100 voraussichtlich verfügbare Fahrzeuge. Erstelle einen Tourenplan, so daß alle Kundenwünsche erfüllt, alle technischen, rechtlichen etc. Nebenbedingungen eingehalten werden und die Beförderungskosten minimal sind.

In diesem *Dispositionsproblem* stecken interessante mathematische Aufgabenstellungen. Als erstes stellt sich die Frage der Modellierung. Es gibt viele Möglichkeiten: graphentheoretische Ansätze, Netzwerkfluß-Modelle oder das Aufstellen ganzzahliger Programme, siehe etwa Desrosiers, Dumas, Solomon und Soumis [1995]. Wir haben uns unter Berücksichtigung der vielen Telebus-spezifischen Nebenbedingungen für einen *Set-Partitioning-Ansatz* entschieden. Wir gehen dabei in zwei Schritten vor: Im ersten Schritt *verknüpfen* wir Fahrtwünsche zu *Bestellungen*; im zweiten Schritt gehen wir an die eigentliche *Tourenplanung*. In beiden Schritten werden dabei strukturell gleiche mathematische Probleme erzeugt, sogenannte Set-Partitioning-Probleme — ein für die mathematische Untersuchung und die Programmentwicklung wichtiger Aspekt.



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).

Abbildung 2

Verknüpfungsoptimierung

Wenn zwei Fahrgäste zur selben Zeit vom selben Start- zum selben Zielpunkt fahren wollen, dann ist es offensichtlich sinnvoll, beide zusammen zu befördern. Oder wenn neun Behinderte zu einem gemeinsamen Treffen fahren wollen, sind nicht unbedingt neun Telebusse nötig, drei reichen vielleicht schon aus. Überlegungen dieser Art führen dazu, die verschiedenen Möglichkeiten der gleichzeitigen Beförderung mehrerer Fahrgäste festzulegen: Gruppenfahrten, Start- bzw. Zielsammelfahrten, Einbindungen, Anbindungen, Mehrfachanbindungen, Einbindungen gefolgt von Mehrfachanbindungen. Solche durch Verknüpfung zusammengefaßten Fahrtwünsche nennen wir *Bestellungen.* Einige dieser Möglichkeiten sind in Abb. 2 dargestellt.

Wir erzeugen mit Hilfe eines Programms alle Möglichkeiten, Fahrtwünsche zu Bestellungen zu verknüpfen. (Hier betrachten wir auch Einzelfahrten als Bestellungen.) Dabei wird darauf geachtet, daß die Kunden keine zu langen Umwege oder Wartezeiten in Kauf nehmen müssen. Abhängig von der Zahl der Fahrtwünsche und ihrer zeitlichen und räumlichen Verteilung ergibt vollständige Enumeration zwischen 10.000 und 80.0000 zulässige Bestellungen pro Tag.

Der zeitweise gemeinsame Transport von Personen ermöglicht es, im Vergleich zur Einzelbeförderung Wegstrecken zu sparen. Im Jargon der Verkehrsexperten geht es um die Reduzierung der „Besetztkilometer". Das Optimierungsproblem beim Verknüpfen läßt sich dann wie folgt beschreiben:

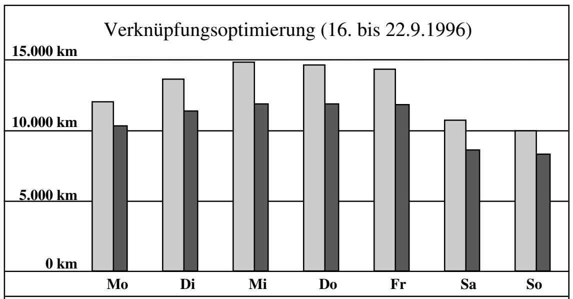
Gegeben seien m Fahrtwünsche und n Bestellungen. Gesucht ist eine Kombination von Bestellungen, so daß jeder Fahrtwunsch in genau einer Bestellung enthalten ist und die Summe der Besetztkilometer der ausgewählten Bestellungen minimal ist.

Dieser Ansatz führt auf das folgende ganzzahlige lineare Programm:

$$\begin{aligned} &\min \quad c^T x \\ &Ax = \mathbb{1} \\ &x_j \in \{0,1\},\ j = 1, \ldots n. \end{aligned} \qquad \text{(SP)}$$

Dabei ist A diejenige (m,n)-Matrix, deren Eintrag a_{ij} eine Eins enthält, falls Fahrtwunsch i in Bestellung j enthalten ist, andernfalls hat a_{ij} den Wert Null; c ist der Vektor, dessen Koeffizient c_j die Besetztkilometer der j-ten Bestellung angibt. Für jede zulässige Lösung x ist $\{j | x_j = 1\}$ eine zulässige Kombination von Bestellungen. Eine Optimallösung von (SP) ergibt eine optimale Verknüpfung von Fahrtwünschen zu Bestellungen bzgl. der Besetztkilometer.

Programme des Typs (SP) werden in der ganzzahligen Optimierung *Set-Partitioning-Probleme* genannt.



Durch das Verknüpfen von Fahraufträgen zu Bestellungen lassen sich die Besetztkilometer um 20% reduzieren.

Abbildung 3

Beim Berliner Telebus-System führt die Verknüpfungsoptimierung zu 0/1-Optimierungsproblemen mit 1.500 Gleichungen und 10.000 bis 80.000 Variablen. Diese Set-Partitioning-Probleme können wir in wenigen Minuten optimal lösen. In Abb. 3 sind die in einer typischen Woche erzielten Reduzierungen graphisch dargestellt. Die Anzahl der Besetztkilometer wird dabei in der Regel um etwa 20% verringert. die Zahl der Bestellungen beträgt nur noch 60–70% der Zahl der Fahraufträge.

Tourenplanoptimierung

Bei der Tourenplanung werden die in Schritt 1 berechneten Bestellungen zu zulässigen Telebus-Touren verbunden. Im Prinzip gehen wir dabei genauso vor wie in Schritt 1. Wir betrachten alle Möglichkeiten, die gegebenen Bestellungen zu zulässigen Touren zusammenzustellen und stehen damit vor der Aufgabe:

Wähle aus der Menge aller zulässigen Touren die preiswerteste Kombination von Touren aus, so daß jede Bestellung in genau einer Tour enthalten ist.

Wir erhalten wiederum ein Set-Partitioning-Problem, wobei die Zeilen diesmal Bestellungen, die Spalten Touren und die Zielfunktionskoeffizienten Preisen (für die anzumietenden Busse) entsprechen.

In der Praxis ist die Bestimmung *aller* zulässigen Touren unmöglich. Es gibt zu viele. Wir erzeugen stattdessen durch verschiedene Heuristiken eine Auswahl von sehr vielen guten, ein paar mittelmäßigen und ein paar schlechten Touren (die unter Umständen zur Komplettierung von sehr guten Touren benötigt werden). Jede solche Tour wird dabei auf ihre Zulässigkeit bezüglich arbeitsrechtlicher und technischer Regeln und bezüglich der Anmietungsbedingungen geprüft; auch die „weichen“ Nebenbedingungen werden berücksichtigt. Auf diese Weise entstehen riesige Set-Partitioning-Probleme mit bis zu 1.000 Zeilen und, je nach Tourenerzeugungsstrategie, 10.000 bis mehrere Millionen Spalten. In der Praxis hat sich die Erzeugung von rund 100.000 Spalten bewährt. Die Set-Partitioning-Probleme, die bei der Tourenplanung entstehen, können wir (noch) nicht optimal lösen. Wir schaffen es aber in der Regel, zulässige Tourenpläne und untere Schranken zu berechnen, die etwa 10% voneinander abweichen. Für die Praxis (aber noch nicht für uns) ist das einigermaßen zufriedenstellend. Es ist uns allerdings bewußt, daß wir bei dem von uns gewählten Modellierungsansatz niemals den Beweis der Optimalität eines von uns gefundenen Tourenplans erbringen können, da wir nicht über alle theoretisch möglichen Touren optimieren. Aber was heißt schon optimal bei so vielen weichen Nebenbedingungen und unscharfen Daten?

Lösungsmethodik

Wir wollen hier kurz die Methoden skizzieren, die wir zur Lösung der bei der Verknüpfungsoptimierung bzw. der Tourenplanung auftretenden Set-Partitioning-Probleme benutzen. Wir verwenden den Ansatz der *Polyedrischen Kombinatorik*. Dabei werden die Lösungen des Set-Partitioning-Problems (SP) als Ecken eines Polyeders aufgefaßt, des *Set-Partitioning-Polytops*

$$\mathrm{PART(A)} := \mathrm{conv}\ \{x \in R^n | Ax = 1, x \in \{0,1\}^n\}.$$

Dieses Polytop ist technisch schwierig zu untersuchen. Bereits die Frage, ob PART(A) nichtleer ist, ist $\mathcal{NP}$-vollständig im Sinne der Komplexitätstheorie. Stattdessen betrachten wir die Polyeder

$$\mathrm{STAB(A)} := \mathrm{conv}\ \{x \in R^n | Ax \leq 1, x \in \{0,1\}^n\}$$

$$\mathrm{COV(A)} := \mathrm{conv}\ \{x \in R^n | Ax \geq 1, x \in \{0,1\}^n\},$$

die eng mit dem Set-Partitioning-Polytop zusammenhängen: PART(A) = STAB(A) ∩ COV(A). Wenn wir die Spalten von A als Knoten eines Graphen G_A, des *Intersektionsgraphen* von A, ansehen, wobei zwei Spalten genau dann adjazent sind wenn ihr inneres Produkt verschieden von Null ist, dann kann man zeigen, daß die Ecken von STAB(A) genau den *stabilen Mengen* von G_A (das sind Knotenmengen, bei denen je zwei Knoten nicht benachbart sind) entsprechen. STAB(A) kann damit als das sogenannte *Stabile-Mengen-Polytop* von G_A interpretiert werden, welches bereits intensiv in der Literatur untersucht wurde und für das viele Klassen von Facetten bekannt sind, siehe etwa Balas und Padberg [1976] und Borndörfer [1997]. Ähnlich kann man COV(A), das sogenannte *Covering-Polytop*, interpretieren (siehe etwa Nobili und Sassano [1989]). Über dessen Facettialstruktur ist aber wesentlich weniger bekannt.

Wir haben weitere Studien dieser Polytope vorgenommen und insbesondere verschiedene Separationsverfahren (exakt und heuristisch) für die uns bekannten Klassen von Facetten entworfen und implementiert. Diese bilden die Grundlage zur Entwicklung eines *Branch-and-Cut-Verfahrens* zur Lösung von Set-Partitioning-Problemen. Der Algorithmus beginnt mit der Lösung der *LP-Relaxierung* von (SP), d.h. des linearen Programms

$$\begin{aligned} &\min \quad c^T x \\ &Ax = \mathbb{1} \\ &0 \leq x \leq 1 \end{aligned} \qquad \text{(LP)}$$

dessen Optimalwert eine untere Schranke für den Optimalwert des Set-Partitioning-Problems bildet. Ist die Optimallösung selbst ganzzahlig, so sind wir bereits fertig. Falls nicht, versuchen wir auf heuristische Weise, aus der gebrochenen Lösung eine ganzzahlige zu gewinnen, die besser als die bisher beste bekannte Lösung ist; und wir versuchen, durch Einsatz der Separationsalgorithmen Ungleichungen zu bestimmen, die gültig für alle Lösungen des Set-Partitioning-Problems sind, aber die gegenwärtige gebrochene Lösung abschneiden. Diese Ungleichungen fügen wir zum gegenwärtigen linearen Programm hinzu und wiederholen dieses Verfahren, bis wir entweder eine ganzzahlige Optimallösung gefunden haben oder bis wir die gegenwärtige gebrochene Lösung nicht mehr abschneiden können. In diesem Fall „branchen“ wir, d.h. wir zerlegen das Problem in zwei kleinere Teilprobleme, die wir rekursiv mit der gerade beschriebenen Methode weiterbearbeiten.

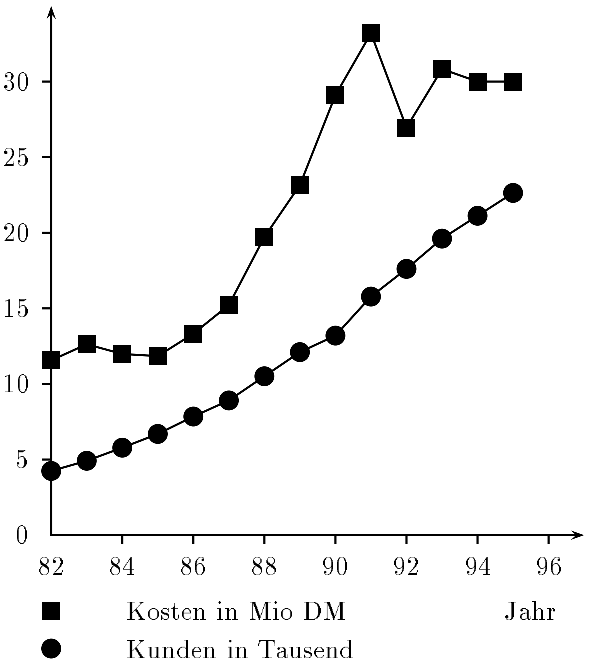
In der Praxis kombinieren wir dieses Verfahren mit verschiedenen, zum Teil speziell für den Telebus entwickelten Tourenplanungsheuristiken, siehe Klostermeier und Küttner [1993]. Diese finden sehr schnell Lösungen, die einer Handplanung deutlich überlegen sind, siehe hierzu Borndörfer, Grötschel, Klostermeier und Küttner [1997].

Der praktische Einsatz

Unser Projekt begann mit den Diplomarbeiten Klostermeier und Küttner [1993]. Anhand realer Datensätze des BZA wurde ein Einsparungspotential von 25% oder mehr aufgezeigt. Wir glaubten, dies würde auf große Begeisterung stoßen. Stattdessen gab es Skepsis.

Ein Grund war historischer Natur. Der Telebus-Fahrdienst war Anfang der 80er Jahre mit anspruchsvollen Ankündigungen gestartet worden. Mehr als 50 Millionen DM (vornehmlich des Bundesministeriums für Forschung und Technologie) wurden eingesetzt, um das Telebuskonzept zu entwickeln, geeignete Busse zu konstruieren, die Abläufe und das System zu planen sowie Hardware anzuschaffen und Software zu programmieren. In die Entwicklung des Dispositionssystems flossen über 10 Millionen DM. Das Ergebnis dieser seinerzeitigen Entwicklung war ein komplettes Desaster. Die Disponenten gingen nach kurzer Zeit wieder zur manuellen Disposition über.

Ein zweiter Grund für die Skepsis waren die für die optimierte Disposition notwendigen Änderungen in der Organisationsstruktur des Telebus-Fahrdienstes. Das Einsparungspotential unseres Dispositionsprogramms war am höchsten, wenn die Fahrzeuge so kurzfristig und flexibel wie möglich angemietet wurden. Im Idealfall sollten die Einsatzzeiten als Ergebnis der Tourenplanung festgelegt werden. In der Realität wurden die Einsatzzeiten der Telebusse aber für einen Monat im voraus festgelegt, unabhängig von der tatsächlichen Auftragslage. Die Subunternehmer hatten Angst, daß ihre Gewinnmargen durch eine Verdichtung der Pläne und die Bereitstellung von mehr Flexibilität deutlich geschmälert würden. Unser erstes einsatzfähiges Programmsystem war im Sommer 1994 fertig. Es dauerte jedoch bis Juni 1995, bis es verwendet wurde. Der Betriebsrat des BZA nutzte die Einführung der neuen Technik, um Vereinbarungen über die Sicherung der Arbeitsplätze zu erzielen. Viele Disponenten fürchteten um ihre Arbeitsplätze — einige waren allerdings von den neuen Möglichkeiten auch begeistert. Die Meinungen beim BZA und bei den Subunternehmern gingen weit auseinander, ob der vom Computer erzeugte Tourenplan tatsächlich fahrbar war. In der Tat haben wir deswegen den Disponenten die Möglichkeit eingeräumt, unsere Lösungen ihrem „Planungsstil“ durch Nachbearbeitung anzupassen. Das führte zwar zu Mehrarbeit und Mehrkosten, erhöhte aber die Akzeptanz.



Entwicklung der Telebus-Gesamtkosten 1982–95 laut Bericht des Rechnungshofs von Berlin.

Abbildung 4

Zum Schmunzeln war in diesem Zusammenhang ein interessanter psychologischer Vorfall: Als der Senat für Soziales die Umstellung des Telebus-Systems auf Computer-Disposition zum 1. Juni 1995 ankündigte, hagelte es am Abend dieses Tages Proteste durch die Busfahrer. Sie hielten die Computer-Touren für unfahrbar. Das Programm kam aber aufgrund des notwendigen Vorlaufs für die Tourenplanung erst am 3. Juni 1995 zum Einsatz!

Seitdem wird die erste Ausbaustufe der Dispositionssoftware beim BZA benutzt. Sie liefert täglich gute Lösungen. Sie enthält jedoch noch nicht die oben beschriebenen mathematischen Optimierungsalgorithmen. Das wird sich voraussichtlich im Sommer 1997 ändern, wenn der Branch&Cut-Ansatz in Verbindung mit einem neuen LP-Löser des ZIB (siehe Wunderling [1996]) und leistungsfähigeren PCs zum Einsatz kommen wird. Die mit diesem Verfahren produzierten Lösungen des Tourenplanungsproblems sind im Durchschnitt um 10% besser als die augenblicklich erzeugten heuristischen Lösungen und haben ein zusätzliches Verbesserungspotential von weiteren 10%.

Ergebnisse

Obwohl wir unsere beste Optimierungssoftware aus den oben genannten Gründen noch nicht zum Einsatz bringen konnten, haben sich die von uns empfohlenen Maßnahmen auf vielfältige Weise ausgezahlt. Das Programmsystem ist mit seinen vielen hilfreichen Funktionen allseits akzeptiert. Der Service hat sich in jeder Hinsicht (Bestellzeitpunkt, Pünktlichkeit, Behandlung durch die telefonische Fahrtwunschannahme) verbessert. Seit Beginn unseres Projektes im Jahre 1993 hat sich die Anzahl der täglichen Fahrtwünsche um rund 30% erhöht, während die Mitarbeiterzahl beim BZA um über 20% sank. Das Telebus-System war in früheren Jahren wegen hoher Kostensteigerungen dauernd in der politischen Diskussion. Das hat – trotz der derzeit miserablen Finanzsituation Berlins – aufgehört. Die Kosten für das Telebus-System sind seit 1993 stabil, siehe Abb. 4. Die Optimierung hat also dafür gesorgt, daß ein 30%iger Zuwachs an Fahrtwünschen kostenneutral aufgefangen werden konnte.

Man mag uns vorwerfen, daß wir die Vernichtung von Arbeitsplätzen bei den Busunternehmen und im BZA betrieben haben. Wir halten dagegen, daß die von Berlin bereitgestellten Finanzmittel optimal im Sinne der Behinderten eingesetzt werden müssen. Sie sind nicht zur Förderung der Bürokratie oder des Taxi- und Busgewerbes gedacht. Wir hoffen, daß unsere neue Software das Telebus-System so stabilisieren wird, daß auch in den nächsten Jahren — trotz höherer Nutzung — keine Kostensteigerungen eintreten werden.

Literatur

Balas, E. und Padberg, M. (1976). Set partitioning: a survey. *SIAM Review*, 18:710–760.

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.

Borndörfer, R. (1997). *Set Partitioning and its Application to a Vehicle Routing Problem*. Dissertation, Technische Universität Berlin. Erscheint 1997.

Borndörfer, R., Grötschel, M., Klostermeier, F. und Küttner, C. (1993). Telebus-Disposition: Ein Konzept zur Serviceverbesserung bei gleichzeitiger Kostensenkung. Technischer Report TR 93-03, Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin.

Borndörfer, R., Grötschel, M., Herzog, W., Klostermeier, F., Konsek, W. und Küttner, C. (1996). Kürzen muß nicht Kahlschlag heißen — das Beispiel Telebus-Behindertenfahrdienst Berlin. Preprint SC 96-41, Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin. Erhältlich per ftp oder WWW*.

Borndörfer, R., Grötschel, M., Klostermeier, F. und Küttner, C. (1997). Berliner Telebus bietet Mobilität für Behinderte. *Der Nahverkehr*, 1–2/97:20–22. Auch erhältlich per ftp oder WWW* als Preprint SC 96-41, Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin.

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, Seite 35–139.

Klostermeier, F. und Küttner, C. (1993). Kostengünstige Disposition von Telebussen. Diplomarbeit, Technische Universität Berlin.

Nobili, P. und Sassano, A. (1989). Facets and lifting procedures for the set covering polytope. *Mathematical Programming*, 45:111–137.

Wunderling, R. (1996). Paralleler und objektorientierter Simplex. Technischer Report TR 96-09, Konrad Zuse Zentrum für Informationstechnik Berlin. Erhältlich per ftp oder WWW*.

*Erhältlich per anonymous-ftp: `ftp ftp.zib.de` ... `cd /pub/zib-publications` oder von URL: `http://www.zib.de/ZIBbib/Publications/`.